

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN FRACTURA E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL



TESIS DOCTORAL

**DAÑO MICROESTRUCTURAL PRODUCIDO
DURANTE LA FABRICACIÓN DE ACEROS DE
PRETENSADO Y CONSECUENCIAS EN SU
COMPORTAMIENTO EN FRACTURA**

por:

ROCÍO RODRÍGUEZ GÓMEZ
Ingeniero Geólogo

Directores de Tesis:

JESÚS ANDRÉS TORIBIO QUEVEDO
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (UPM)

FCO. JAVIER AYASO YÁÑEZ
Doctor por la Universidad de La Coruña (UDC)

2015

Zamora, diciembre de 2015

EL TESISANDO

LOS DIRECTORES DE LA TESIS

Rocío Rodríguez Gómez

Jesús Toribio Quevedo

Fco. Javier Ayaso Yáñez

RESUMEN

Esta Tesis Doctoral versa sobre el comportamiento en fractura de probetas entalladas de aceros perlíticos de trefilado sometidos a ensayos bajo sollicitaciones de tracción y flexión por cuatro puntos, ensayos los cuales producen diferentes estados tenso-deformacionales. Dentro de dicho estudio se han analizado los micro-defectos presentes en los alambres pertenecientes a los distintos pasos de la cadena real de trefilado, en especial los generados por inclusiones.

El *primer capítulo* expone los objetivos perseguidos en esta investigación, además de realizar una revisión bibliográfica sobre los antecedentes de interés analizados sobre la materia objeto de estudio.

En el *segundo capítulo* se ha detallado la composición y caracterización del material utilizado, acero perlítico trefilado, para la mecanización de las probetas. En éste se clasifican los micro-defectos observados en los alambres perlíticos pertenecientes a los distintos pasos de la cadena de trefilado, durante el propio proceso de conformado en frío. En dicho capítulo se ha realizado el estudio microestructural de los alambres pertenecientes a la cadena de trefilado y de las probetas mecanizadas a partir de éstos. Se describen los ensayos realizados sobre las probetas objeto de estudio y se analizan los resultados obtenidos de los mismos. El análisis se ha centrado en los micro-defectos presentes en la microestructura del alambre producido por el propio proceso de conformado en frío y por los campos tenso-deformacionales producidos durante los ensayos mecánicos. Como parte indispensable del estudio se exponen los tipos de ensayos y probetas entalladas utilizadas, prismáticas y axisimétricas, bajo sollicitaciones de tracción y flexión por cuatro puntos.

En el *tercer capítulo* de la presente Tesis se ha realizado el análisis fractográfico de las probetas sometidas a ensayos de fractura. En éste se han estudiado los distintos micro-mecanismos que imperan en la superficie de fractura además del análisis de la fractura anisótropa presente en algunas de estas probetas.

El *cuarto capítulo* se ha centrado en la modelización numérica de los ensayos de fractura realizados mediante el uso del método de elementos finitos. Se han expuesto los resultados de las variables internas más relevantes obtenidas de la modelización de dichos ensayos. Una vez realizadas las modelizaciones numéricas de éstos, mediante el método de celda unidad, se ha procedido a las modelizaciones numéricas paralelas en las cuales se han incluido los micro-defectos producidos por las inclusiones, con el objetivo de determinar la influencia de éstos en los procesos de fractura.

En el *quinto capítulo*, en el cual se ha ubicado la discusión de la presente Tesis, se establece la relación propia de la ciencia de materiales. Dicha relación se basa en la comparación entre los resultados del análisis microestructural y fractográfico con los resultados de los campos tenso-deformacionales obtenidos de las modelizaciones numéricas de los ensayos.

En el *sexto capítulo* se han detallado las conclusiones de la presente Tesis en las cuales se determinan las posibles causas de los distintos tipos de fractura, además de la influencia de los cambios microestructurales sufridos por el acero perlítico así como de sus micro-defectos, durante el proceso de trefilado y durante la realización de los diferentes tipos de ensayos, entre los que cabe señalar los micro-defectos generados por las inclusiones.

APORTACIONES ORIGINALES

- Estudio micrográfico de los alambres pertenecientes a la cadena real de trefilado de las familias de aceros E, B y C, así como de las probetas lisas, prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, y de las probetas prismáticas entalladas sometidas a flexión por cuatro puntos, todas ellas procedentes de los alambres de la cadena de trefilado de acero de la familia E.
- Análisis de los micro-defectos presentes en la microestructura de los distintos alambres de trefilado y probetas mecanizadas a partir de éstos, así como de la evolución de los mismos durante el proceso de trefilado y durante la realización de los ensayos de fractura.
- Clasificación de micro-defectos analizados en intracoloniales e intercoloniales. Dentro de los micro-defectos intracoloniales clasificación en *piel de leopardo* (rotura de láminas de cementita de una misma colonia cuyas láminas están orientadas en la dirección del eje longitudinal del alambre), *garras de leopardo* (producido por la unión de las micro-cavidades generadas por la rotura de las láminas de cementita durante el trefilado en colonias cuyas láminas están orientadas próximas a la dirección principal del alambre), *rotura por curvaturas* (se observa dentro de las láminas de una colonia las cuales aparecen curvadas debido al acomodamiento microestructural), *micro-descolonizaciones* (se producen como consecuencia de la separación entre colonias en los límites de éstas), *pseudocolonias perlíticas* (colonias cuyas láminas no se han orientado en la dirección longitudinal del alambre, las cuales poseen un espaciado interlaminar anómalo y grandes curvaturas) y *desgarros intracoloniales* (producidos por la unión de uno a varios de los micro-defectos anteriores). Dentro de los micro-defectos intercoloniales cabe señalar los producidos por inclusiones.
- Clasificación de las inclusiones en inclusiones de *tipo blando* (sulfuros de manganeso principalmente), de *tipo duro* (óxidos, nitruros y carburos) y *mezcla* (normalmente formadas por una inclusión de tipo duro y una o varias de tipo blando).
- Evolución de los micro-defectos a lo largo del proceso de trefilado así como durante los ensayos realizados. Estableciendo relación entre la evolución de los micro-defectos generados por inclusiones, estudio morfológico y modelización numérica, y el grado de trefilado del alambre. Análisis de los micro-defectos generados por inclusiones en las probetas entalladas, su evolución dentro de las zonas sometidas a una mayor triaxialidad durante los ensayos y la posible influencia de éstos en los procesos de fractura.

- Estudio de las pseudocolonias perlíticas con morfología de tipo *cuña* que evidencian su menor resistencia en comparación con las colonias cuyas láminas están orientadas a favor de la dirección de trefilado.
- Cuantificación del factor de forma de las inclusiones y de los micro-defectos generados por las mismas en los alambres pertenecientes a los distintos pasos de la cadena de trefilado así como en las probetas entalladas.
- Realización de ensayos bajo sollicitación de tracción (probetas prismáticas entalladas y axisimétricas entalladas), bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos (probetas prismáticas entalladas). Análisis de las curvas carga-desplazamiento obtenidas en dichos ensayos bajo las distintas sollicitaciones. Obtención de la rigidez y la carga correspondiente al límite elástico en las probetas ensayadas.
- Análisis fractográfico de las probetas objeto de estudio sometidas a ensayos bajo sollicitaciones de tracción y flexión por cuatro puntos, así como de los micro-mecanismos que imperan en dichas superficies, estableciéndose los procesos de fractura.
- Cuantificación de las distintas zonas presentes en las superficies de fractura de las probetas ensayadas bajo distintas sollicitaciones: *zona de proceso de fractura (ZPF)*, *zona intermedia (Z_{INT})* y *corona externa (CE)*, además de establecer la relación entre dichas zonas con el grado de trefilado del alambre, el radio de curvatura y la profundidad de entalla de las probetas.
- Estudio de la fractura anisótropa presentada en las probetas mecanizadas a partir de alambres fuertemente trefilados, estableciéndose la relación con la microestructura del alambre, además de con el radio y profundidad de la entalla y la sollicitación aplicada en dichas probetas.
- Observación a nivel fractográfico de *estrías* presentes en la ZPF con independencia del tipo de entalla de la probeta y del tipo de ensayo realizado. La posible causa de dicha morfología puede ser debida a los límites entre colonias previos a la fractura.
- Modelización mediante el método de los elementos finitos (MEF), determinado las variables internas que imperan en el instante final de la fractura. Simulaciones numéricas paralelas de los elementos de mayor triaxialidad en las cuales se han introducido micro-defectos generados por inclusiones.

- Análisis de las variables internas; tensiones normales (σ_x , σ_y , σ_z), tensión hidrostática (σ), tensión equivalente de von Mises (σ_{eq}) y deformación plástica (ϵ^p_{eq}) que imperan en las probetas ensayadas. Se establece además la relación de éstas con el grado de trefilado de los alambres de procedencia, los tipos de probetas entalladas (radio y profundidad de entalla) y la sollicitación ejercida (tracción y flexión por cuatro puntos).
- Obtención de la triaxialidad (t) en todas las superficies de fractura a partir de las variables internas obtenidas en las simulaciones numéricas de dichos ensayos objeto de la presente Tesis Doctoral.
- Análisis de las variables internas en los micro-defectos generados por inclusiones mediante la simulaciones numéricas paralelas, por el método de *celda unidad*, en los elementos de mayor triaxialidad obtenidos de las modelizaciones numéricas previas. Realización de la comparativa entre estas variables y las variables internas obtenidas en las probetas modelizadas, pudiendo determinar la posible influencia de los micro-defectos generados por inclusiones en los procesos de fractura.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su gratitud a todas aquellas personas e instituciones que han contribuido de una u otra forma a la realización de esta investigación, en especial:

Dr. Jesús Toribio Quevedo, Catedrático de Universidad y Director del Grupo de Investigación en Fractura e Integridad Estructural de la Universidad de Salamanca, por la dirección de esta Tesis Doctoral.

Dr. Francisco Javier Ayaso Yañez, Profesor Titular de Universidad, por la dirección de esta Tesis Doctoral.

El resto de miembros del equipo de investigación, y en especial a Dña. Leticia Aguado Ferreira y al Dr. Miguel Ángel Lorenzo Fernández, por su ayuda y apoyo durante la realización de la Tesis.

D. Juan José Morillo Vega, Técnico de Laboratorio de Ensayos Mecánicos y de Análisis Microestructural, por su colaboración en la preparación de muestras y ensayos.

D. Juan Monar, de TREFILERÍAS QUIJANO (Los Corrales de Buelna, Cantabria), por la cesión desinteresada del material utilizado para la parte experimental de la presente Tesis Doctoral.

Familia y amigos por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. OBJETIVOS	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1. Perlita	2
2.2. Inclusiones	6

CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. INTRODUCCIÓN	13
2. MATERIALES EMPLEADOS	14
3. EQUIPO EXPERIMENTAL	16
4. DEFECTOS MICRO-ESTRUCTURALES VS. PROCESO DE TREFILADO	19
4.1. Materiales empleados y preparación de las muestras	21
4.2. Micro-defectos intracoloniales	23
4.2.1. <i>Piel de leopardo</i>	23
4.2.2. <i>Garras de leopardo</i>	28
4.2.3. <i>Rotura por curvaturas</i>	31
4.2.4. <i>Micro-descolonización</i>	33
4.2.5. <i>Pseudocolonias perlíticas</i>	37
4.2.6. <i>Desgarros intracoloniales</i>	53
4.3. Micro-defectos intercoloniales	55
4.4. Micro-fisuras entorno a inclusiones	56
4.4.1. <i>Clasificación de inclusiones y factor de forma</i>	56
4.4.2. <i>Evolución de las inclusiones a lo largo del proceso de trefilado</i>	65
5. ESTUDIO DEL CUELLO DE ESTRICCIÓN	73
5.1. Fundamento teórico	73
5.2. Ensayos de tracción simple	74
5.3. Estudio microestructural	78
5.3.1. <i>Micro-dureza Vickers</i>	80

6. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN.....	86
6.1. Equipo experimental y método de ensayo.....	87
6.2. Curvas carga-desplazamiento.....	88
7. PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN.....	98
7.1. Equipo experimental y método de ensayo.....	100
7.3. Curvas carga-desplazamiento.....	101
8. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS.....	113
8.1. Equipo experimental y método de ensayo.....	114
8.2. Curvas carga-desplazamiento.....	116

CAPÍTULO III: ANÁLISIS MACRO-MICRO-FRACTOGRÁFICO

1. INTRODUCCIÓN.....	123
2. ESTUDIO MICROGRÁFICO DEL CUELLO DE ESTRICCIÓN.....	124
3. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN.....	134
3.1. Fractura anisótropa.....	147
3.2. Análisis micrográfico de probetas de ensayos interrumpidos.....	154
4. PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN.....	163
4.1. Fractura anisótropa.....	184
4.2. Análisis micrográfico de probetas de ensayos interrumpidos.....	193
5. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS.....	200
5.1. Fractura anisótropa.....	215
5.2. Análisis micrográfico de probetas de ensayos interrumpidos.....	223

CAPÍTULO IV: MODELIZACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

1. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURA A TRACCIÓN EN PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS DE ACERO PERLÍTICO.....	239
--	-----

1.1. Modelización como medio continuo	239
1.2. Modelización de micro-defectos generados por las inclusiones.....	266
2. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURA A TRACCIÓN EN PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS DE ACERO PERLÍTICO.....	275
2.1. Modelización como medio continuo	275
2.2. Modelización de micro-defectos generados por inclusiones.....	311
3. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURA A FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS EN PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS	317
3.1. Modelización como medio continuo	317
3.2. Modelización de microdefectos generados por inclusiones.....	338

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

1. MICRODAÑOS Y EVOLUCIÓN.....	346
2. MECANISMOS DE FRACTURA.....	357
2.1. Probetas prismáticas entalladas sometidas a tracción.....	357
2.2. Probetas axisimétricas entalladas sometidas a tracción.....	360
2.3. Probetas prismáticas entalladas sometidas a flexión por cuatro puntos.....	364
2.4. Comparativa mecanismos de fractura vs entallas.....	369
3. MICRODEFECTOS GENERADOS POR INCLUSIONES.....	369
4. FRACTURA ANISÓTROPA.....	371

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

1. MICRO-DEFECTOS Y SU EVOLUCIÓN.....	381
2. ANÁLISIS FRACTOGRAFICO Y MECANISMOS DE FRACTURA.....	383
2.1. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de tracción.....	383
2.2. Probetas axisimétricas entalladas bajo sollicitación de tracción.....	383
2.3. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos.....	384
3. MODELIZACION NUMÉRICA Y VARIABLES INTERNAS.....	385
3.1. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de tracción.....	385
3.2. Probetas axisimétricas entalladas bajo sollicitación de tracción.....	386

3.3. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos.....	386
4. MECANISMOS DE FRACTURA Y FRACTURA ANISÓTropa.....	388
BIBLIOGRAFÍA	391
ANEXOS	401
Anexo I.	
Anexo II.	
Anexo III.	
Anexo IV.	

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

a	Eje mayor de la elipse
A	Área
a_r	Distancia radial desde el fondo de entalla
A_S	Área total de la superficie de fractura
b	Eje menor de la elipse
B	Espesor de la entalla
BCC	Body –centered cubic
C	Clivaje
CE	Corona exterior
CMH	Coalescencia de Micro-huecos
CMH*	Microhuecos de gran tamaño
E	Modulo de Young
e	Deformación ingenieril
EDS	Espectroscopia de energía dispersiva
EDX	Energía de dispersión de rayos X
EMPA	Electron probe microanalyzer
EXP	Curvas experimentales
F^*	Fuerza de parada
FESEM	Field emission scanning electron microscopy
F_{max}	Carga máxima aplicada
F_R	Carga de rotura
F_Y	Carga correspondiente al límite elástico
GIFIE	Grupo de Investigación de Fractura e Integridad Estructural
HV	Micro-dureza Vickers
IDIM	Interfase producida por la descohesión entre la inclusión y la matriz perlítica
ϕ	Diámetro
k	Rigidez
MB	Micro-defectos generados por inclusiones de tipo blando
MD	Micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro

MEB	Microscopio electrónico de barrido
MEF	Método de elementos finitos
MET	Microscopio electrónico de transmisión
MM	Micro-defectos generados por inclusiones de tipo mezcla
NUM	Curvas numéricas
R	Radio de entalla
S	Factor de forma
S_0	Espaciado interlaminar de la perlita
S_{0C}	Espaciado interlaminar medio zona central cuello de estrangulación
S_{0P}	Espaciado interlaminar medio en la periferia del cuello de estrangulación
SR	Susceptibilidad de rotura
t	Triaxialidad
u	Desplazamiento
USAL	Universidad de Salamanca
Z_{INT}	Zona intermedia
ZPF	Zona de proceso de fractura
ε	Deformación verdadera
ε^p	Deformación plástica
ε_{eq}^p	Deformación plástica acumulada
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensión hidrostática
σ_{eq}	Tensión equivalente de von Mises
σ_{NY}	Tensión neta correspondiente al límite elástico
σ_R	Tensión de rotura
σ_r	Tensión radial
σ_x	Tensión axial
σ_Y	Límite elástico
σ_y	Tensión normal eje y
σ_z	Tensión normal eje z
σ_θ	Tensión circunferencial

I. INTRODUCCIÓN

1. OBJETIVOS

El objetivo principal de la presente Tesis Doctoral consiste en estudiar la influencia del proceso de fabricación mediante trefilado sobre el comportamiento mecánico y en fractura de alambres de acero de pretensado, haciendo especial hincapié sobre su relación con el comportamiento anisótropo en fractura que se observa en los mismos cuando éstos están sometidos a diversos estados triaxiales de tensión. Para ello se han realizado ensayos de fractura sobre probetas entalladas axisimétricas y prismáticas sometidas a sollicitaciones de tracción y flexión, estudiando detalladamente el micro-daño estructural que se genera en los alambres de acero a causa del propio proceso de trefilado, así como durante los distintos ensayos, y la posible influencia del mismo sobre el comportamiento anisótropo en fractura.

La presente Tesis Doctoral versa sobre el comportamiento mecánico en fractura de alambres correspondientes a cada una de las etapas del proceso de trefilado. Dichos alambres se han sometido a ensayos de tracción simple estudiando; por una parte los dos niveles microestructurales del acero (colonias de perlita y láminas de ferrita y cementita) en cuanto a su evolución y caracterización (espacio interlaminar, tamaño de colonia, orientación...), y por otra parte el análisis cuantitativo y cualitativo del daño microestructural que se produce durante la fabricación del alambre de pretensado en las distintas etapas del mismo debido a la existencia de inclusiones y al propio proceso de trefilado en sí [formación de pequeñas microfisuras generalmente orientadas en la dirección del eje longitudinal del alambre, análisis tenso-deformacional mediante cálculos por el Método de Elementos Finitos del proceso de trefilado y los ensayos así como su influencia de partículas de segunda fase duras (óxidos) y blandas (sulfuros de Mn)]. Para el estudio del comportamiento mecánico de alambres de pretensado se han sometido bajo distintas sollicitaciones de carga (ensayos de tracción y flexión) y distinto grado de triaxialidad tensional (diversos tipos de entalla) estudiando la influencia del grado de trefilado sobre los distintos micro-mecanismos (fractura frágil/dúctil) que gobiernan el comportamiento en fractura del material a nivel microscópico para las diversas situaciones a estudiar (distinta triaxialidad tensional). Por último, se ha establecido la relación propia de la Ciencia de Materiales entre el daño microestructural producido durante el proceso de trefilado y su posible influencia sobre el comportamiento anisótropo en fractura mostrado en los alambres con alto grado de trefilado.

2. ANTECEDENTES

2.1. Perlita

Los aceros eutectoides tienen una estructura completamente perlítica. La reacción eutectoide hierro-carburo de hierro para la formación de la perlita sigue una determinada reacción denominada reacción perlítica o eutectoide tal y como se describe en la expresión 1.1.



Al enfriar la austenita con una concentración intermedia de carbono ésta se transforma en fase ferrita, con un contenido de carbono inferior, y en cementita, con un porcentaje muy superior en carbono. Los átomos de carbono necesitan difundirse con el fin de segregar selectivamente para formar la futura perlita. Dichos átomos se difunden de la región ferrítica a las capas de cementita para conseguir la concentración del 6,70% en peso de C, y la perlita se propaga a través de los límites de grano al interior de los granos austeníticos. La microestructura perlítica se compone de ésta forma por láminas alternas de ferrita y cementita las cuales se agrupan en colonias dependiendo de la dirección de las mismas (CALLISTER, 1995).

Son muchos los científicos que se han dedicado a la investigación de la estructura perlítica. SORBY (1886) descubrió la composición de la perlita.

Pero el verdadero avance lo protagonizó la teoría de CARPENTER y ROBERTSON (1932) en la cual se hace referencia a la formación de láminas de cementita y de ferrita de forma simultánea, lo que se denominó el proceso cooperativo (*cooperative process*). Estos investigadores no sólo establecieron el proceso de formación sino que también incluyeron los factores de los que depende dicho proceso, estableciendo que el contenido de carbono era un factor delimitante para la formación de perlita (regla de la palanca o *Lever rule*). CARPENTER y ROBERTSON (1932) plasmaron en sus teorías la importancia del grano austenítico dentro del cual se formarían colonias de perlita, en la dirección de las láminas de ferrita y cementita. Estos científicos fueron los primeros en enunciar mecanismos de formación, el mecanismo de formación radial y el paralelo a la cara del grano austenítico previo.

Según KAVISHE Y BAKER (1986), las láminas de ferrita y cementita en aquellas colonias que constituyen un nódulo simple tienden a tener una orientación cristalográfica propia que normalmente no es compartida por las láminas de los nódulos vecinos. Cuando un nódulo creciente afecta a otro nódulo se forma una frontera. Aunque las colonias de perlita se nuclean en las fronteras de grano de la austenita, las láminas de ferrita y cementita pueden crecer a través de una frontera de austenita sin dificultad. Las láminas dejan de crecer sólo cuando se encuentran unas con otras. El tamaño del grano austenítico previo es una de las características que controlan la velocidad de nucleación de la perlita y está relacionado con el tamaño del nódulo perlítico.

Los tamaños de grano austenítico previo y de colonia de perlita, así como el espaciado interlaminar perlítico muestran una gran independencia entre sí, pudiéndose variar uno de ellos sin alterar los otros dos. Esta independencia nos permite las relaciones entre propiedades del material y los parámetros microestructurales. El tamaño del grano austenítico previo determinará la existencia de varias colonias nucleadas en la misma cara de éste, al igual que la generación de colonias con un mismo núcleo de partida. El grano austenítico previo de menor tamaño presentará, para el mismo tamaño de colonia, orientaciones más diversas de las mismas, así como una mayor resistencia al avance de la fisura (NAM Y BAE, 1995).

El espaciado interlaminar depende de la temperatura de transformación isotérmica (HYZAK Y BERNSTEIN, 1976). Por debajo de una temperatura de 650°C se obtiene una relación inversa entre el espaciado interlaminar y la temperatura de transformación, produciéndose para temperaturas mayores a ésta una desviación de dicha linealidad (RIDLEY, 1984). Con el aumento del grano austenítico previo el espaciado interlaminar disminuye (HYZAK Y

BERNSTEIN, 1976). El espaciado ínterlaminar disminuye cuando se incrementa la deformación (LANGFORD, 1977).

En este tipo de aceros sometidos a ensayos bajo sollicitación de tracción se puede producir la deformación en las colonias cuyas láminas se muestran paralelas al eje de tracción, deformación en bandas estrechas de intensas tensiones cortantes (DOLLAR, BERNSTEIN y THOMPSON, 1988).

El proceso de trefilado produce una gran variación en la microestructura del acero perlítico. Las colonias muestran una mayor esbeltez cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre observado pudiéndose modelizar como elipsoides (TORIBIO y OVEJERO, 1997; 1998c; OVEJERO, 1998). Las láminas de perlita disminuyen su espaciado ínterlaminar y se alinean progresivamente en la dirección de trefilado a medida que aumenta la deformación plástica (EMBURY y FISHER, 1966; LANGFORD, 1977; DOLLAR, BERNSTEIN y THOMPSON, 1988; TORIBIO y OVEJERO, 1998a; 1998b). Para deformaciones pequeñas la orientación de las láminas es más acusada, mientras que en deformaciones plásticas más altas ($\epsilon_{eq}^p=1.10$), con una orientación de las láminas de perlita ya próxima a la dirección longitudinal del alambre, es más evidente el fenómeno de disminución del espaciado ínterlaminar, que continua reduciéndose de manera uniforme (TORIBIO y OVEJERO, 1998b; 1998c). En las colonias que poseen láminas de cementita alineadas transversalmente al eje de trefilado, éstas aparecen fuertemente flexionadas, curvadas e incluso se llegan a presentar fragmentadas, dando lugar a un tipo de colonias especiales denominadas *pseudocolonias perlíticas* (TORIBIO, OVEJERO y TOLEDANO, 1997; TORIBIO *et al.*, 2008). Una deformación cortante pura sobre acero plenamente perlítico produce cambios en la microestructura y unas propiedades mecánicas muy similares a las que se producen con el trefilado (WETSCHER, STOCK y PIPPAN, 2007).

Si la deformación plástica es aún mayor ($\epsilon_{eq}^p=2.32$), independientemente de los parámetros de la microestructura inicial (espaciado ínterlaminar y tamaño de colonia), las láminas de cementita se encuentran completamente alineadas a lo largo del eje de trefilado y es menos frecuente encontrar láminas curvadas y rizadas (NAM, BAE y LEE, 1996). A mayores deformaciones se forman partículas de cementita globular, mediante la densificación de la cementita durante el trefilado. Estas partículas de cementita, proporcionan un lugar efectivo para la formación de huecos, debido al incremento de la concentración de tensiones en las proximidades de esas partículas, siempre y cuando continúe aumentándose la deformación (NAM y BAE, 1995).

En la sección transversal las colonias de perlita muestran la curvatura típica de granos y láminas en una estructura Body –centered cubic (BCC), los cuales se flexionan para mantener

la compatibilidad de con sus vecinos. Este efecto se atribuye a la elongación de la ferrita bajo condiciones de deformación plana, asociada a la forma de textura en las direcciones $\langle 110 \rangle$ durante el trefilado (GIL SEVILLANO y AERNOUDT, 1987; NAM, BAE y LEE, 1996; ZELIN, 2002). OCENÁSEK *et al.* (2007), mediante una simulación, predijeron el desarrollo de la textura, la elongación de los granos y el curvado de los mismos en el proceso de trefilado

Se cree que la cementita es un componente del acero más bien frágil, pero sin embargo, en las micrografías de los distintos estudios se presentan las láminas con morfologías curvas que demuestran un cierto comportamiento dúctil. La deformabilidad de las láminas de cementita se ve influida significativamente por el espaciado interlaminar y por el estado de tensiones en las mismas (dirección que presentan con respecto al eje de trefilado), mientras que no lo está por el tamaño de colonia (LANGFORD, 1977; NAM *et al.*, 2000)

Las láminas de cementita se ven sometidas no sólo a las fuerzas ejercidas por el proceso de trefilado, sino también al constreñimiento de las colonias vecinas. Muchos son los científicos que estudian el comportamiento, al parecer anómalo, que presentan las láminas de cementita. Entre ellos cabe destacar la importante aportación de GAVRILJUK (2002) el cual ha publicado varios estudios sobre la disolución de las láminas de cementita.

La disolución propiamente dicha de la cementita se refiere a que debido al proceso de trefilado, la composición de la cementita se ve alterada, pues se desprende una fracción de carbono que hace que las láminas tengan capacidad de curvarse.

Para la observación de la disolución de las láminas de cementita se utilizaron métodos como el análisis termomagnético, la espectroscopía de Mössbauer y la fricción interna. Estos procedimientos experimentales permitieron concluir que la separación de las láminas y las tensiones ejercidas estaban relacionadas con la descomposición de la cementita.

GAVRILJUK (2003) concluyó que cuanto menor es la separación de las láminas de ferrita y de cementita, mayor es la descomposición de la cementita, y que a mayores tensiones, más intensa es dicha descomposición. Al mismo tiempo observó la relación de la disolución de la cementita con la interacción de las dislocaciones de carbono.

DANOIX *et al.* (1998) determinaron la eficacia de las pruebas atómicas tomográficas en la observación de la disolución de las láminas de cementita, así como consideraron la posibilidad del estudio de la extensión de la misma con dicho procedimiento.

LANGUILLAUME *et al.* (1997), publicaron estudios acerca de las formas en que se podría producir la disolución de las láminas de cementita en los aceros perlíticos a lo largo del proceso de trefilado. Estos investigadores demostraron que el grosor de dichas láminas influye en las curvaturas de las mismas, siendo las láminas más delgadas las que aparecen con curvaturas más pronunciadas.

NAM *et al.* (2000), utilizando también microscopía electrónica de alta resolución y análisis de Mössbauer, determinaron la influencia de las características microestructurales en la disolución de la cementita tales como el espaciado interlaminar y el tamaño de las colonias. Con estas investigaciones se puede afirmar que existe un umbral microestructural de disolución de la cementita, pues a medida que disminuye el espaciado interlaminar la fracción de cementita que se disuelve se reduce. Sin embargo el tamaño de las colonias influye muy poco en la disolución de la cementita.

OHKI *et al.* (1997), mediante las técnicas de difracción de rayos X, la microscopía electrónica de transmisión y el termoanálisis diferencial, estudiaron el cambio de la cementita durante el proceso de trefilado (el cambio de carbono inducido por el proceso) y como ésta variaba de las zonas externas del alambre a el interior de éste.

NIEHAJOWICZ y TOBOTA (2000), elaboraron artículos sobre la influencia de la temperatura en el contenido de carbono y cómo el cambio de la estructura en el proceso de trefilado va influir en la estructura final y ésta en las propiedades mecánicas del producto final del proceso, el alambre de pretensado.

Con el termoanálisis y la difracción de rayos X se pudo corroborar la sobresaturación de carbono de la ferrita y el déficit presentado de ese componente en las láminas de cementita (BATTEZATTI, BARICCO y CURIOTTO, 2005). No obstante, hay que considerar que siendo la cementita un componente del acero perlítico que aporta dureza, a veces y debido a las tensiones ejercidas durante el proceso de trefilado se comporte como un material ciertamente dúctil.

En realidad la posible ductilidad de la cementita sigue siendo hoy en día un enigma, pues la comunidad científica todavía no ha encontrado pruebas irrefutables de que esté componente del acero perlítico posea dicha cualidad. Sin embargo es difícil explicar como un material que no posea ductilidad puede presentarse describiendo curvaturas tan acentuadas, como las observadas por distintos científicos, sin llegar a fragmentarse.

2.2. Inclusiones

Otro de los aspectos a destacar dentro de la microestructura de estos aceros es la presencia de inclusiones en los mismos. El acero puede contener una gran variedad de inclusiones no-metálicas, las cuales se generan durante el proceso de elaboración, ya sea por las reacciones que ocurren en el baño metálico o por la interacción con agentes externos. Estas inclusiones pueden perjudicar o favorecer las propiedades mecánicas del producto final. Las inclusiones que se encuentran en los aceros pueden clasificarse a partir de su composición, tamaño, morfología, procedencia....A continuación se describen algunas de las clasificaciones más utilizadas.

Según el origen de las inclusiones, éstas se pueden clasificar en *exógenas* y *endógenas*. Las inclusiones exógenas proceden del exterior y también son denominadas escorias, mientras las inclusiones endógenas proceden de la precipitación de diversos elementos durante la solidificación del acero (WILSON, 1979).

Las inclusiones exógenas presentan un tamaño mayor que las endógenas por lo que las primeras son más perjudiciales para las propiedades mecánicas del acero. Las inclusiones endógenas se pueden formar por desoxidación o por precipitación, sin embargo las exógenas se forman por reoxidación, emulsificación o por el desgaste de refractarios. La reoxidación del acero se produce cuando el acero se pone en contacto con un agente oxidante, principalmente el aire atmosférico o una escoria con alto contenido de óxidos de hierro. El proceso de emulsificación de la escoria es un agitado muy intenso, en el cual la baja viscosidad de la escoria puede provocar que algunas partículas de la misma queden atrapadas en el acero. El desgaste de refractarios se produce por la velocidad de los movimientos del acero a altas temperaturas, en estos movimientos se pueden desprender pequeñas partículas de refractario que pasan al acero.

La composición de las inclusiones es muy variada; normalmente las inclusiones exógenas están formadas por sulfuros de manganeso, óxidos de silicio y aluminio; sin embargo las inclusiones endógenas están compuestas fundamentalmente de óxidos de titanio, silicatos de magnesio y aluminio (WILSON, 1979). Además de estos compuestos también se encuentran presentes en el acero sulfuros de Ca y Mn. Las inclusiones producto de la desoxidación, modificadas posteriormente, están compuestas por distintas fases de conjuntos de óxidos. En el caso de aceros calmados al aluminio, tratados con calcio, estos óxidos tienen porcentajes variables de Al_2O_3 , CaO y MgO.

Las inclusiones pueden estar compuestas por cualquiera de los aleantes comentados anteriormente. La composición química de las inclusiones no sólo va a condicionar el comportamiento de éstas en la solidificación del material, sino también en el proceso de trefilado, en el cual la deformación plástica sufrida por el acero tendrá diferentes consecuencias en las inclusiones.

Las inclusiones se pueden clasificar, según su tamaño, en macro y microinclusiones. Las microinclusiones son normalmente inclusiones endógenas, son las más abundantes y suelen estar distribuidas uniformemente; debido a su menor tamaño, son menos nocivas que las macroinclusiones con respecto a las propiedades del producto final. Las inclusiones exógenas suelen ser macro-inclusiones y pueden originar discontinuidades importantes en el acero, actuando como concentradores de tensiones. Varios investigadores, ZHANG *et al.* (2006); MEURLING *et al.* (2001); COLLINS y MICHAL (1995), han intentado hallar el tamaño crítico de la inclusión para que ésta genere una grieta, que puede o no producir la fractura del material. El tamaño de la inclusión es uno de los factores más estudiados, por su posible influencia en la fractura del acero. El estudio y análisis de los tamaños críticos iniciadores de las microfisuras ayudará en la mejora de los tratamientos del acero para la obtención de aceros de mejor calidad y de una mayor resistencia.

Actualmente, hay numerosos artículos que tratan sobre las técnicas para el análisis de las inclusiones en distintos aceros. Dentro de las técnicas existente una de las empleadas consiste en la modificación del haz de electrones del MET (microscopio electrónico de transmisión). En el artículo de BLAIS *et al.*, (1997) se utiliza como metodología experimental dicha técnica para la observación de inclusiones de sulfuro de manganeso en aceros, que han sido sometidos a un tratamiento de Ca, obteniéndose una mejor resolución de las inclusiones.

Las técnicas de pulido y atacado facilitan el análisis de la micro-estructura de los aceros para su observación en el MEB, entre éstas destaca un pulido mecánico seguido por una combinación de ataque con aguafuerte del electro-pulimento. Dicha técnica ha sido utilizada para la observación de inclusiones en aceros de carril por KANG y GOW (1978).

La caracterización y el análisis de las inclusiones se centra en el estudio de la morfología, el tamaño, la composición y la distribución de las mismas. En la mayoría de los artículos científicos se intenta clasificar las inclusiones a partir de su tamaño y forma para posteriormente relacionar estos aspectos con la fractura del material.

Para cuantificar la morfología y para la realización de una posterior clasificación de inclusiones a partir de éste aspecto se utiliza la denominada técnica de espectroscopia de

energía dispersiva (EDS). Dicha técnica es utilizada a modo experimental por autores como KANG *et al.*, (2005) y MAINY (1996). Sin embargo la clasificación y determinación del tamaño de las inclusiones se realiza en la mayoría de los casos por medio de estimaciones basadas en métodos matemáticos (ANDERSON *et al.*, 2005). Algunos de los métodos experimentales para la estimación del tamaño y la determinación de la vida en fatiga se basan en la emisión del campo del MEB denominada FESEM (*field emission scanning electron microscopy*) y en la prueba de micro-análisis electrónico EPMA (*electron probe microanalyzer*). Estas técnicas se han utilizado para el análisis de aceros hipoeutectoides, combinándolas con una máquina de fatiga de ultrasonidos para altos ciclos de fatiga (ZHANG *et al.*, 2006a). La distribución de las inclusiones es un parámetro de vital importancia para comprender el comportamiento de los aceros. De los estudios que abordan esta temática cabe señalar el de COLLINS y MICHAL (1995); dicho trabajo trata la distribución espacial y la forma de las inclusiones mediante modelización matemática, por el método denominado control de forma. La modelización matemática se realizó en inclusiones cuya composición es sulfuro de manganeso, en aceros AISI 4140 (hipoeutectoides, aleados con Mn, Cr, Si y Mo).

Los diferentes parámetros de clasificación comentados no son sólo para la clasificación de las inclusiones presentes en un acero sino también para evaluar y comprender la influencia de éstas sobre el comportamiento en fractura y fatiga del material. Algunos autores proponen la inclusión como lugar de iniciación de la grieta en fatiga, distinguiendo tres posibles mecanismos: el primero de ellos sería la iniciación de la grieta en la parte delantera de la inclusión (por concentración de tensiones), el segundo mecanismo consistiría en la creación de la grieta en la interfase entre la matriz y la inclusión debido a la descohesión entre ambas, y por último, el tercer mecanismo es el basado en la iniciación de la grieta en la propia inclusión producida por la rotura de la misma (LIU *et al.* 1993). La iniciación de la grieta en fatiga va a depender de la composición química de la inclusión, de su tamaño, de su distribución espacial y de su morfología (CHEN *et al.* 1991). Los autores, del artículo citado, lograron establecer una clasificación, en cuanto al tamaño crítico de las inclusiones, para la iniciación de la grieta en fatiga de aceros de cojinete, hipereutectoides.

Uno de los parámetros que más influencia tiene en la creación de la grieta es el tamaño de la inclusión. Las inclusiones de gran tamaño pueden ser desastrosas para los aceros, éstas suelen ser de origen exógeno, mientras las inclusiones de menor tamaño suelen ser inevitables y generalmente no peligrosas. El tamaño crítico para la creación de las grietas ha sido muy estudiado, pero generalmente no se puede concluir en un tamaño exacto, pues depende del tipo de acero y de las características de la inclusión (ZHANG *et al.*, 2006b). El tamaño crítico de la inclusión ha sido cuantificado para aceros de herramienta (MEURLING *et al.* 2001), aceros AISI 4140 (COLLINS y MICHAL, 1995), ADF1 (acero producido por Dalian Iron y el

grupo CO basado en la composición química del acero comercial 42CrMo disminuyendo el contenido de O, N, P, S y H, y aumentando el contenido de V y Ti) (ZHANG *et al.* 2005) y para aceros utilizados como resortes (ZHANG *et al.*, 2006b y CHAPETTI *et al.* 2003).

Para los aceros perlíticos la iniciación de la grieta en fatiga puede ser debida a la presencia de las inclusiones compuestas por sulfuros de manganeso, silicatos y óxidos. De este modo se ha demostrado como la composición, el tamaño y la morfología de las inclusiones influyen en el límite en fatiga, al igual que el tamaño del grano austenítico previo (KHALIFA, 1988). Se disminuye el tamaño crítico, necesario para la creación de la grieta, si son inclusiones angulosas y si el eje principal es perpendicular a la dirección de aplicación de la tensión. En las inclusiones alargadas y estrechas que presentan ductilidad la grieta de fatiga se inicia por descohesión (ATKINSON y SHI, 2003). La influencia de la morfología fue estudiada en este artículo en aceros limpios (con pocas inclusiones).

En cuanto a la influencia de la composición de las inclusiones se ha demostrado que los óxidos duros y frágiles son peligrosos, y que los sulfuros de manganeso son las inclusiones cuya composición resulta menos peligrosa, siendo las composiciones más perjudiciales para la iniciación de la grieta los óxidos de aluminio y el rubí sintético. Los sulfuros soportan mucha deformación, y por ello son menos peligrosos que los óxidos. Las inclusiones de tipo silíceo se comportan de una manera intermedia a ambos (óxidos y sulfuros). Para las inclusiones cuya composición tiene óxidos duros la iniciación de la grieta por fatiga ocurre debido a la descohesión entre la matriz y la inclusión. Sin embargo las inclusiones formadas por cristal de silicato son más frágiles, de ahí que la inclusión rompa y actúe como una microfisura. Como conclusiones se extrae que en los aceros limpios el proceso de creación de huecos y fractura comienza por las inclusiones de MnS, por su mayor tamaño, después en las inclusiones más pequeñas como óxidos y por último en los carburos (ATKINSON y SHI, 2003).

A partir de la composición de las inclusiones se han realizado estudios de la presencia de cementita y sulfuros de manganeso, determinándose que en la nucleación de la grieta no influyen dichos compuestos, pero sí el aluminio. Los aceros de los que se extraen estas conclusiones son aceros del tipo hipoeutectoides con bajo contenido en aleantes y que han sido sometidos a ensayos de fatiga (EID y THOMASON, 1979).

Los carburos frágiles, que forman parte de las inclusiones del acero austenítico (AISI 316), se encuentran muy enlazados en la matriz perlítica. Los carburos cuyo tamaño es superior a una micra acortan perceptiblemente la vida en fatiga del material a altos ciclos de fatiga (BARNBY y PEACE, 1971).

En cuanto a la distribución de las inclusiones en aceros de cojinete sometidos a fatiga, basándose en el estudio de la iniciación de la grieta, se determinó que cerca de la superficie son más peligrosas dichas inclusiones debido a la concentración de tensiones en ésta (CHEN *et al.*, 1991).

Considerándose el total de los defectos superficiales e interiores se puede obtener la vida en fatiga de los aceros. En los estudios realizados sobre aceros de resorte (acero con Cr) se utilizan métodos estadísticos para cuantificar la distribución de las inclusiones y su posterior influencia en la fractura (BERGENGREN, LORSSON y MELONDER, 1995).

La iniciación de la grieta debida a las inclusiones se produce por fenómeno de descohesión, denominado en inglés *debonding*, el cual consiste en la separación de la matriz metálica y de la inclusión. La descohesión se produce en los procesos como la laminación en caliente, el trefilado y la fatiga, en los cuales el acero sufre una gran deformación plástica. La diferencia de comportamiento entre la inclusión y la matriz metálica, pues poseen características mecánicas distintas, es la principal causa de éste fenómeno (ATKINSON y SHI, 2003). En algunas inclusiones se llegan a formar vacíos u hoyuelos alrededor. Estos vacíos están asociados a inclusiones cuyo tamaño es aproximadamente 0,6 mm.

Otro efecto de las inclusiones es la potencia de nucleación. Artículos como el de PAN *et al.* (2006) tratan de analizar por medio de métodos isotérmicos la influencia de las inclusiones en la nucleación de la ferrita intergranular, en aceros hipoeutectoides. La nucleación de las inclusiones no-metálicas de ferrita en aceros es diferente dependiendo de la composición. Experimentalmente, se observó que no son potenciadores de la ferrita intergranular los siguientes compuestos: SiO_2 , MnO-SiO_2 , Al_2O_3 , TiN y MnS . Por el contrario, las inclusiones de MnS y Al_2O_3 , contaminadas con V y N, son potenciadoras de la nucleación de la ferrita intergranular (SHIM *et al.*, 2001).

Un estudio realizado sobre aceros perlíticos demuestra que al agregar Ti en más de 50 ppm se reduce la cantidad de inclusiones compuestas por manganeso. El Ti_2O_3 en partículas, junto con Mn-contaminado, se convierten en $\text{TiMn}_2\text{-O}_3$, el cual muestra gran eficacia al introducir la ferrita intergranular (BYUN *et al.*, 2003).

Actualmente los estudios relativos a las inclusiones presentes en los distintos aceros se han centrado en la caracterización de los mismos así como en la influencia de aquéllas en los procesos de fractura, siendo clave para tal fin además de la composición química de éstas sus morfologías, tamaño y distribución dentro de la microestructura (LUO y SÄHLBERG, 2001; YU *et al.*, 2003).

En la presente Tesis Doctoral se han obtenido las composiciones químicas, tamaños y morfologías de las distintas inclusiones presentes en el acero perlítico de trefilado para posteriormente examinar la influencia de las mismas en la fractura anisótropa de los aceros perlíticos fuertemente trefilados objeto del estudio.

El comportamiento en fractura para todos y cada uno de los alambres correspondientes al proceso del trefilado ha sido obtenido en los distintos estudios que versan sobre este tipo de acero a partir de ensayos de tracción simple sobre probetas lisas (AYASO *et al.*, 2005), de ensayos de fractura bajo sollicitación de tracción sobre probetas entalladas con simetría de revolución (AYASO, 2001), y de ensayos de fractura a tracción sobre probetas previamente fisuradas por fatiga (TOLEDANO 1998 y GONZÁLEZ 2007). Estos investigadores han observado dos comportamientos en fractura bien diferenciados incluso a simple vista; por una parte, un comportamiento en fractura en el que la superficie de fractura que se genera es relativamente plana y suave, encontrándose contenida en un plano transversal al eje longitudinal del alambre (eje el cual es plenamente coincidente con el eje de la carga creciente aplicada durante los distintos ensayos), denominando así a este comportamiento en fractura como *comportamiento isótropo en fractura*, siendo este tipo de comportamiento mostrado por los alambres pertenecientes a los primeros pasos del proceso del trefilado (aceros débilmente trefilados); por otra parte, se encuentran los alambres de acero correspondientes a los últimos pasos del trefilado (aceros fuertemente trefilados) los cuales muestran una vez finalizados los distintos ensayos, una superficie de fractura contenida en planos claramente distintos de aquel que contiene la sección neta transversal de los diferentes alambres estudiados, esto es, presentan superficies de fractura muy abruptas con claras deflexiones del camino de fractura en forma de grandes valles y crestas, siendo denominado este comportamiento en fractura como *comportamiento anisótropo en fractura*.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. INTRODUCCIÓN

Para poder llevar a cabo uno de los objetivos de la presente Tesis se han realizado estudios metalográficos de todos los alambres de una cadena real de trefilado compuesta por siete hileras de tres familias de acero denominadas B, C y E. En dichos estudios se han examinando los daños micro estructurales que se han producido durante el trefilado así como los micro-defectos existentes y la progresión de los mismos (Apartado 4).

En la presente Tesis se han realizado tres tipos de ensayos: de tracción simple (Apartado 5), ensayos bajo sollicitación de tracción sobre probetas axisimétricas y prismáticas entalladas (Apartados 6 y 7) y ensayos bajo sollicitación de flexión sobre probetas prismáticas entalladas (Apartado 8). Todos los ensayos se han realizado utilizando los alambres pertenecientes a la cadena real de trefilado de la familia E, a partir de los cuales han sido mecanizadas las probetas utilizadas en los dos últimos tipos de ensayos.

2. MATERIALES EMPLEADOS

En la presente Tesis se han utilizado tres familias de acero perlítico pertenecientes a distintas coladas, B, C y E, procedentes de una cadena real de trefilado compuesta por siete hileras. Dichas familias de aceros han sido caracterizadas en estudios previos por el Grupo de Investigación de Fractura e Integridad Estructural (GIFIE) de la Universidad de Salamanca (USAL), extrayendo de éstos las características que se exponen a continuación (AYASO *et al.*, 2005). La presente Tesis Doctoral, aunque englobe diferentes tipos de familias de acero, sobre todo en lo referente a los estudios microestructurales, se ha centrado en el análisis de la familia de aceros E. A continuación se indica la composición química (Tabla 2.1), las características geométricas de los distintos alambres que componen la cadena de trefilado (Tabla 2.2) y las características mecánicas más representativas de los alambres de pretensado (Tablas 2.3-2.5).

Tabla 2.1. Composición química de los aceros B, C y E (%).

ACERO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	V
B	0.790	0.070	0.226	0.010	0.005	0.003	0.271	0.078
C	0.790	0.670	0.200	0.010	0.010	0.003	0.187	0.053
E	0.790	0.680	0.210	0.010	0.010	0.003	0.220	0.060

Tabla 2.2. Diámetros de los aceros B, C y E, ϕ (mm).

ACERO	0	1	2	3	4	5	6	7
B	12.10	11.23	10.45	9.68	9.02	8.54	8.18	7.00
C	10.44	9.52	8.49	7.68	6.95	6.36	5.86	5.03
E	11.03	9.90	8.95	8.21	7.49	6.80	6.26	5.04

En las siguientes tablas (Tablas 2.3-2.5) correspondientes a las propiedades mecánicas de las distintas familias de aceros, B, C y E, se muestra el modulo de Young (E), el límite elástico (σ_Y), la tensión de rotura (σ_R) y la deformación plástica acumulada (ϵ_{eq}^P) obtenidas a partir de ensayos de tracción simple para cada uno de los alambres que componen los distintos pasos de la cadena de trefilado.

En la Fig. 2.1 se muestra las curvas tensión vs. deformación verdadera ($\sigma-\epsilon$) del acero de la familia E, en el cual se ha centrado dicho estudio, obtenida en los estudios previos anteriormente comentados. Estas curvas corresponden a los distintos alambres procedentes de los distintos pasos de la cadena del proceso de trefilado y serán posteriormente utilizadas en las modelizaciones numéricas por medio de método de elementos finitos (MEF) realizadas en la presente Tesis Doctoral.

Los alambres pertenecientes a la cadena real de trefilado serán nombrados primero con la letra de la familia de aceros de la cual proceden seguida de un número que indicará el grado de trefilado de dicho alambre, siendo 0 el alambón inicial ó alambre sin trefilar y 7 el alambre de pretensado comercial.

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas del acero tipo B.

ACERO	E (GPa)	σ_Y (GPa)	σ_R (GPa)	ε_{eq}^P
B0	202	0.72	1.27	0.00
B1	204	0.84	1.34	0.15
B2	204	0.88	1.37	0.29
B3	203	0.95	1.43	0.45
B4	203	1.01	1.49	0.59
B5	201	1.09	1.55	0.70
B6	201	1.12	1.58	0.78
B7	205	1.58	1.84	1.10

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del acero tipo C.

ACERO	E (GPa)	σ_Y (GPa)	σ_R (GPa)	ε_{eq}^P
C0	203	0.69	1.23	0.00
C1	199	0.78	1.27	0.18
C2	201	0.90	1.36	0.41
C3	204	0.97	1.42	0.61
C4	204	1.06	1.50	0.81
C5	204	1.14	1.58	0.99
C6	204	1.23	1.64	1.15
C7	208	1.65	1.91	1.46

Tabla 2.5. Propiedades mecánicas del acero tipo E.

ACERO	E (GPa)	σ_Y (GPa)	σ_R (GPa)	ε_{eq}^P
E0	199	0.72	1.23	0.00
E1	192	0.83	1.28	0.22
E2	194	0.91	1.36	0.42
E3	192	0.93	1.41	0.59
E4	196	1.02	1.50	0.78
E5	199	1.13	1.60	0.97
E6	200	1.16	1.62	1.13
E7	208	1.49	1.83	1.57

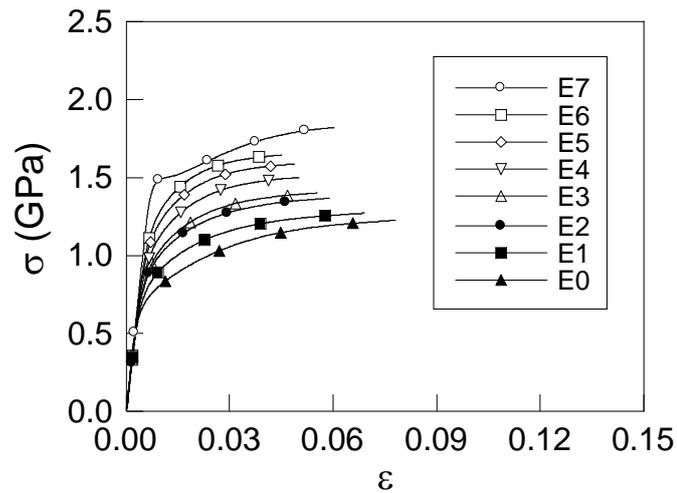


Fig. 2.1. Leyes de comportamiento (curvas σ - ε) del acero E.

3. EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental utilizado para la realización de los diferentes tipos de ensayos mecánicos (tracción simple fractura bajo sollicitación de tracción y fractura bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos) así como para la preparación de muestras para su posterior estudio micrográfico se encuentra ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela Politécnica Superior de Zamora, perteneciente a la USAL.

Para la preparación de las muestras se ha utilizado el siguiente equipo experimental:

- Aparato de ultrasonidos Struers modelo Metason 120T para la limpieza de las muestras.
- Cortadora Struers modelo Labotom con disco de 1.5 mm de espesor, para la realización de cortes transversales.
- Minicortadora Struers modelo Minitom con disco de corte diamante de 0.5mm de espesor, para realizar los cortes longitudinales.
- Máquina Struers Labo Press-3 para montaje por compresión en caliente, usándose resinas fenólicas termoendurecibles con carga de serrín.
- Máquina Struers Roto Pol 21 y Struers Roto Force 4 para esmerilado y pulido, con sistema MD Disc con fijación magnética.

Para la observación microscópica y las mediciones de las distintas muestras se han utilizado el siguiente equipo experimental:

- Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-5610 LV, capaz de generar imágenes de electrones secundarios y electrones retrodispersados acelerados.
- Equipo de análisis de imágenes Soft Imaging System GmbH formado por un ordenador tipo PC y el programa de análisis de imagen AnalySIS versión 3.1.
- Proyector de perfiles NIKON con objetivos de 10x, 20x y 50x, empleado para obtener las geometrías de las distintas entallas, utilizando para ello los tornillos micrométricos con precisión de hasta una milésima de milímetro.

El equipo experimental empleado para la realización de los ensayos mecánicos:

- Máquina de ensayo universal servomecánica MTS modelo Alliance RT/100, disponible para operar con dos células de carga (de 100 kN ó de 10 kN de capacidad) y con un canal de extensometría (Fig. 2.2).



Fig. 2.2. Máquina de ensayo universal servomecánica MTS modelo Alliance RT/100.

- Máquina de ensayo universal servomecánica MTS modelo Alliance RF/200, dispuesta con una célula de carga de 200 kN de capacidad y con doble canal de extensometría (Fig. 2.3).
- Dos extensómetros axiales MTS modelos 634.25F-24 y 634.315F-24 con una base de medida 50 y 25 mm respectivamente (Fig. 2.4).



Fig. 2.3. Máquina de ensayo universal servomecánica MTS modelo Alliance RF/200.

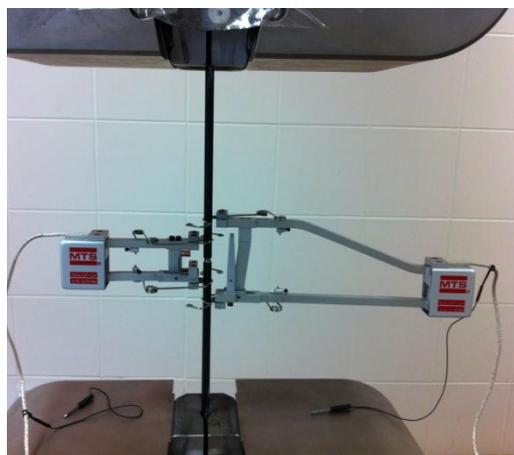


Fig. 2.4. Extensómetros dinámicos axiales MTS con base de medida de 50 y 25 mm centrados con respecto a la entalla de la probeta a ensayar.

- Programa de adquisición de datos TestWorks 4 de MTS, que permite registrar y almacenar los distintos datos del ensayo para poder ser tratados posteriormente.
- Micro-durometro de Vickers, Struers modelo Duramin.

4. DEFECTOS MICRO-ESTRUCTURALES VS. PROCESO DE TREFILADO

A lo largo de este capítulo se van a describir y analizar los micro-defectos producidos en los alambres de acero perlítico durante el proceso de trefilado. Para llevar a cabo dicho análisis se han realizado micrografías correspondientes a las secciones longitudinales de los alambres de tres familias de acero trefilado (B, C y E) con el microscópico electrónico de barrido (MEB).

Dentro de las familias de acero estudiadas se han obtenido cortes longitudinales de todos los alambres de cada paso del proceso de trefilado, para poder evaluar no sólo los micro-daños sino la evolución de los mismos a lo largo de dicho proceso. En total se han realizado de forma aproximada unas sesenta micrografías de cada paso del proceso de trefilado para cada familia de acero examinada.

El análisis se ha centrado en la observación del micro-daño, no sólo en los producidos dentro de las colonias de perlita sino también los generados entre las mismas. El proceso de trefilado produce ciertos cambios en la microestructura del acero tales como la reducción del espaciado interlaminar, la orientación progresiva de las colonias de perlita y las láminas que las conforman a favor de la dirección del trefilado (TORIBIO y OVEJERO 1997, 1998a, 1998b, 1998c), así como un aumento en la densidad de dislocaciones (KIM *et. al.*, 2009). Como consecuencia de los cambios micro-estructurales durante el trefilado se producen mejoras en las características mecánicas de los alambres tales como el aumento del límite elástico, de la resistencia a la rotura y de la tenacidad de fractura. El proceso de trefilado produce una mejora de propiedades gracias a los mecanismos de endurecimiento por deformación.

Entre los cambios micro-estructurales sufridos por la estructura perlítica durante el proceso de trefilado, cabe destacar la gran deformación sufrida por las láminas de cementita, las cuales a veces aparecen fragmentadas. Las láminas de ferrita son capaces de soportar grandes deformaciones plásticas mientras las láminas de cementita contiguas a éstas no. Dichas láminas de cementita son capaces de deformarse plásticamente bajo grandes tensiones hidrostáticas. Por diferencia de comportamiento entre las láminas de cementita y ferrita, las de cementita tienden a fragmentarse, aunque se puede ver en algunas micrografías como dichas láminas de cementita aparecen deformadas plásticamente, exhibiendo ciertas curvaturas (EMBURY y FISHER, 1966). Cuanto más rápido se produzca el proceso de trefilado menor es la deformación de las láminas de cementita (DE BRITO y GROW ROWE, 1980).

Entre los numerosos estudios sobre los cambios micro-estructurales que sufre la perlita cabe destacar los realizados sobre acero de raíl en los cuales se demuestra como el aumento de densidad de dislocaciones, formadas entre la interfase de las láminas de ferrita y cementita, produce un aumento del límite elástico. En estos estudios se analiza la tensión necesaria para producir la rotura de las láminas de cementita (DOLLAR, BERNSTEIN y. THOMPSON, 1988).

Las láminas de cementita que se encuentran inclinadas con respecto a la dirección de trefilado tienden a deformarse y rotar a favor de la misma. Cuando las láminas se encuentran perpendiculares a esta dirección, se acomodan formándose curvaturas en dichas láminas. En la perlita gruesa la deformación se muestra de forma más heterogénea que en la perlita fina; además en la perlita gruesa no se produce un adelgazamiento de la lámina previo a la fractura. Las láminas de cementita de la perlita fina, de menor espesor, van a presentar mayores curvaturas y un adelgazamiento de la lámina previo a la rotura. Como han demostrado PORTER y EASTERLING (1978) la perlita gruesa es capaz de asumir una menor deformación plástica que la perlita fina y como consecuencia su acomodamiento no se produce por medio del curvado de las láminas.

En algunas colonias cuyas láminas están en dirección perpendicular a la del proceso de trefilado se producen roturas de las láminas de cementita. Dichas roturas generan huecos durante el proceso de trefilado produciéndose, de forma eventual, la cementita globular por difusión del carbono debido a la concentración de tensiones en dichos huecos. Se definen mediante el análisis de micrografías tres tipos de globulización, los cuales quedan detallados a continuación. El primero de ellos es debido a ligeras curvaturas de láminas de cementita, que están sometidas durante el trefilado simultáneamente a tensiones de compresión y flexión, que posteriormente se fracturan dando lugar a cementita globular en los vacíos generados entre los fragmentos de dichas láminas. El segundo de los tipos ocurre con una menor frecuencia y consiste en la formación de cementita globular a partir de láminas fuertemente curvadas sin llegar a producir la fractura de las mismas. El tercer tipo es frecuente en láminas de cementita sometidas a procesos de trefilado con altas tensiones, la globulización se genera por la reorientación de las mismas que se fracturan en dicho proceso produciéndose la globulización en los extremos curvados próximos a éstas. Ambos tipos de globulización quedan esquematizados en la siguiente Fig. 2.5 (NAM y BAE, 1995).

Cabe mencionar algunos estudios realizados sobre probetas de acero perlítico trefilado ensayados bajo sollicitaciones de torsión, en éstos se muestra como el espesor de las láminas de cementita orientadas en la dirección de trefilado disminuye durante dicho ensayo y cómo la generación de vacíos tras la fractura de las mismas produce lugares idóneos (concentradores

de tensiones) para la rotura final del alambre. El proceso de delaminación se produce más fácilmente en la perlita gruesa que en la fina (BAE, NAM y LEE, 1996).

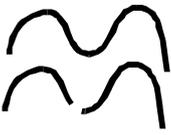
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Inicial			
Final			

Fig. 2.5. Tipos de deformación de las láminas de cementita que dan lugar a la cementita globular (NAM y BAE, 1995).

4.1. Materiales empleados y preparación de las muestras

Para el estudio de los microdefectos generados durante el proceso de trefilado se han utilizado los alambres de acero perlítico de las familias de acero B, C y E. Sin embargo dicho estudio se ha centrado, como se ha comentado en apartados anteriores, en la familia de aceros E.

Para llevar a cabo el análisis de los microdefectos presentes en los distintos alambres que componen la cadena de trefilado se han realizado cortes transversales. Una vez cortados transversalmente los alambres obteniéndose muestras de aproximadamente 1cm de altura se procede a la realización de un corte longitudinal por el plano diametral, obteniéndose dos superficies de corte. Una de las secciones longitudinales obtenidas de cada alambre objeto de estudio, siete de cada familia, ha sido preparada para su posterior observación materialográfica en el microscopio electrónico de barrido (MEB).

Para poder realizar las micrográficas del estudio dichas secciones se han embutido en una resina tipo fenólica endurecida térmicamente, Fig. 2.6, mediante un montaje de compresión en caliente. El siguiente paso una vez embutidas las muestras es la realización de la preparación mecánica; esmerilado y pulido. Este paso tiene como objetivo conseguir una superficie especular, que no presente apenas rayas, para así poder ver la micro-estructura del material mediante un ataque químico. Los primeros pasos de la supresión mecánica del material se conocen con el nombre de esmerilado, la finalidad de este paso es eliminar la superficie de la

muestra rayada o deformada, haciendo que dicha superficie sea lo más plana posible. Para realizar el esmerilado plano de las muestras se ha utilizado un paño que contiene diamante embutido en resina, idóneo para materiales con dureza mayor a 150 HV. La velocidad de giro empleada ha sido de 300 rpm, el lubricante que se necesita en este tipo de paños es agua, y la fuerza que se ha ejercido en las muestras durante el proceso ha sido de 30 N durante 30 segundos. Para algunas muestras muy dañadas por la cortadora se ha repetido el proceso de esmerilado hasta un máximo de dos veces.

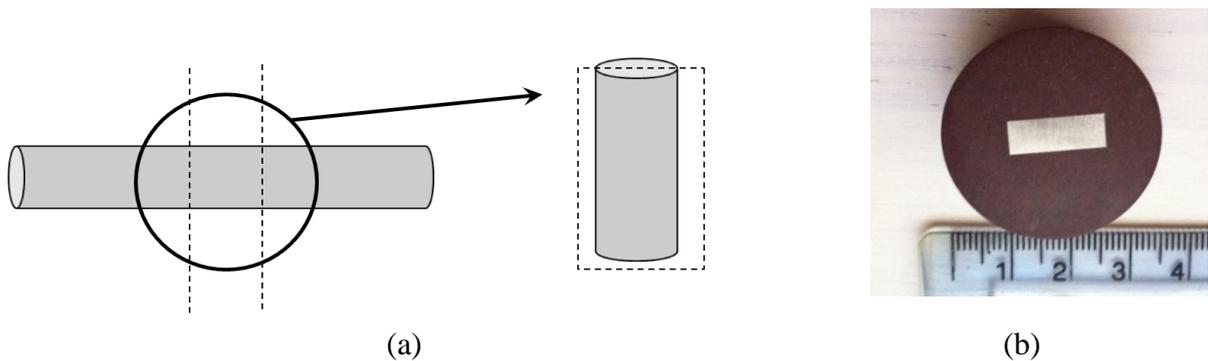


Fig. 2.6. Preparación muestra: (a) esquema de corte y (b) embutido de probeta.

Para el posterior proceso, el esmerilado fino, se ha empleado un paño que permite la inclusión de partículas de diamante de 9 μm a modo de spray entre sus entre sus fibras. La velocidad de giro empleada ha sido de 150 rpm, el paño requiere un lubricante especial con una base alcohólica, y la fuerza que se ha ejercido sobre las muestras durante el proceso ha sido de 30 N durante 1 minuto.

Para el pulido se han utilizado paños más finos que para el proceso anterior, basados en la suspensión de partículas de diamantes sobre ellos. El primero de los paños que se ha utilizado emplea unas partículas de abrasivo de diamante de 3 μm , con una velocidad de giro de 150 rpm, la presión ejercida sobre las muestras ha sido de 30 N durante 1 minuto, siendo el lubricante que se necesita para este paño el mismo que para el caso del pulido fino.

La última fase del pulido se ha completado con un paño de partículas de diamante de 1 μm , el resultado ha sido aceptable y no ha hecho falta recurrir a abrasivos de inferior tamaño. En esta última etapa, la velocidad de giro ha sido de 150 rpm y la fuerza aplicada de 20 N cada 2 minutos. En este caso también se ha utilizado el lubricante de base alcohólica utilizado en las dos etapas previas, utilizando para ambos procesos una pulidora mecánica y los diferentes paños de pulido.

Para poder visualizar y distinguir las microestructuras perlíticas en el MEB las superficies de la muestra han sido atacadas químicamente mediante una disolución al 3% de ácido nítrico (nital) disuelto en etanol comercial puro, de esta forma se produce una distinta reacción de las láminas de cementita (que no son atacadas por el nital) y las láminas de ferrita que conforman la perlita (que sí son atacadas por el nital), siendo así posible su observación y estudio mediante MEB, que es la técnica más adecuada para poder distinguir con claridad suficiente la micro-estructura de la perlita: láminas de cementita de apariencia clara y láminas de ferrita de apariencia oscura. El ataque de las muestras no ha sobrepasado los 5 segundos siendo a continuación lavadas con agua destilada y secadas para ser introducidos en el portamuestras del MEB.

Una vez preparadas las muestras procedentes de los distintos alambres de los diferentes pasos de la cadena de trefilado se ha procedido a su observación metalográfica empleando técnicas de microscopía electrónica de barrido y obteniendo con dichas técnicas las micrografías de éstas para su posterior análisis dentro del presente estudio.

4.2. Micro-defectos intracoloniales

4.2.1. Piel de leopardo

Este microdefecto consiste en la rotura de láminas de cementita de una misma colonia, aunque pudiera presentarse por continuidad el mismo defecto en colonias aledañas. Mayoritariamente este micro-defecto se inicia en colonias cuyas láminas están orientadas en la dirección del eje longitudinal del alambre, la cual coincide a su vez con la dirección del proceso de trefilado. Se ha observado como la mayoría de estos micro-daños muestran orientaciones próximas a los 45° con respecto a la dirección del proceso de trefilado. Este micro-defecto se puede ver en las micrografías pertenecientes a todos los aceros estudiados, B, C y E, desde el primer paso del proceso de trefilado en colonias cuyas láminas poseen una dirección paralela al eje longitudinal del alambre.

El aspecto que presenta el micro-daño de piel de leopardo en forma de motas oscuras es debido al ataque químico producido por el ácido (nital), el cual se introduce en los microvacíos generados por las roturas de las láminas de cementita produciendo un sobreataque local.

En el caso de las micrografías pertenecientes al alambroón inicial se observa la falta de continuidad entre algunas láminas de cementita, debido al proceso de formación de aceros perlíticos, dichas discontinuidades se pueden confundir a simple vista con este micro-defecto.

Los micro-defectos causados como consecuencia de la formación de la perlita que se muestran en la siguiente micrografía han podido producirse por la laminación en caliente a la cual ha sido sometido el alambρόn inicial [Fig. 2.7(a)].

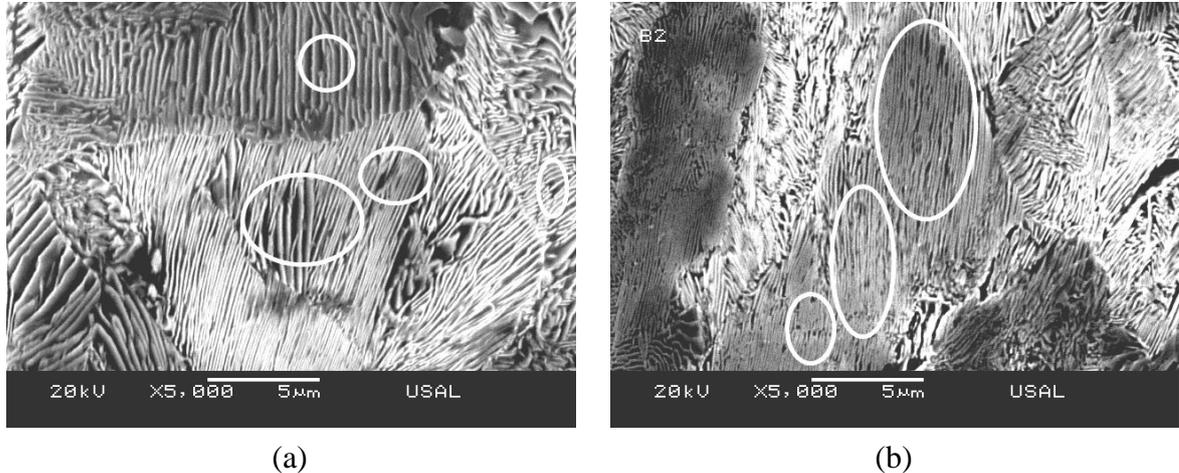


Fig. 2.7. (a) Micrografía perteneciente al acero B0. (b) Micrografías con piel de leopardo perteneciente al acero B2.

El micro-daño denominado piel de leopardo [Fig. 2.7 (b)] aparece como consecuencia de las elevadas tensiones ejercidas durante el proceso de trefilado, tensiones las cuales son suficientes para romper las láminas de cementita y con ellas las de ferrita

El micro-daño denominado *piel de leopardo* puede evolucionar a lo largo del proceso de trefilado hacia las siguientes formas:

- ✓ *Garras de leopardo*: formados por la unión entre los micro-daños de piel de leopardo formando micro-roturas con direcciones próximas a los 45° con respecto a la dirección del proceso de trefilado [Fig. 2.8 (a)].
- ✓ *Desgarros*: bien entre colonias o entre las láminas de una misma colonia, produciéndose en ocasiones la fractura de las colonias de perlita en cuestión. El proceso consiste en la unión de micro-defectos de piel de leopardo generándose un desgarro del material compuesto por una oquedad sin láminas de cementita perceptibles en su interior. En la etapa que precede a la formación del desgarro, a partir del micro-defecto de piel de leopardo, se puede ver como la piel de leopardo se deforma en la dirección del trefilado [Fig. 2.8 (b)].
- ✓ *Constreñimiento*: debido al gran constreñimiento entre colonias, las láminas de cementita que se han fragmentado pueden llegarse a unir, a desplazarse, generándose grandes laberintos [Fig. 2.8 (c)]

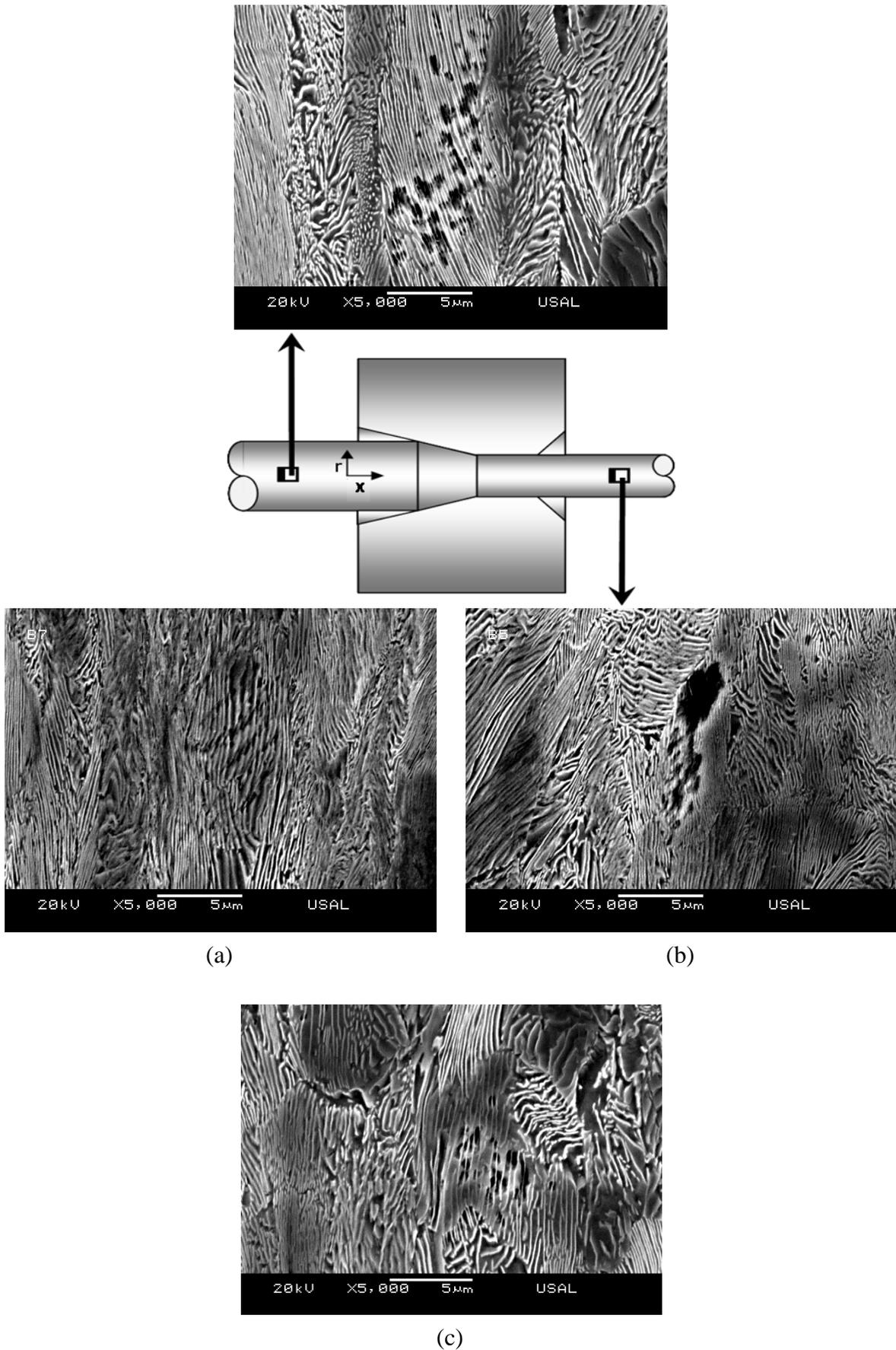


Fig. 2.8. Evolución de la piel de leopardo a lo largo del proceso de trefilado.

Las bandas de deformación de Miller y Smith son precursoras del micro-daño denominado piel de leopardo como se puede observar en la Fig. 2.9 en la cual se muestra el esquema de la formación de dichas bandas. Las bandas de deslizamiento se producen en direcciones próximas a los 45°, dónde se localizan las tensiones cortantes máximas. De forma previa a la rotura de las láminas de cementita, se produce el crecimiento y posterior coalescencia de microhuecos. Éstos microhuecos son el micro-daño tipo piel de leopardo, que una vez generados pueden evolucionar a los microdaños anteriormente citados.

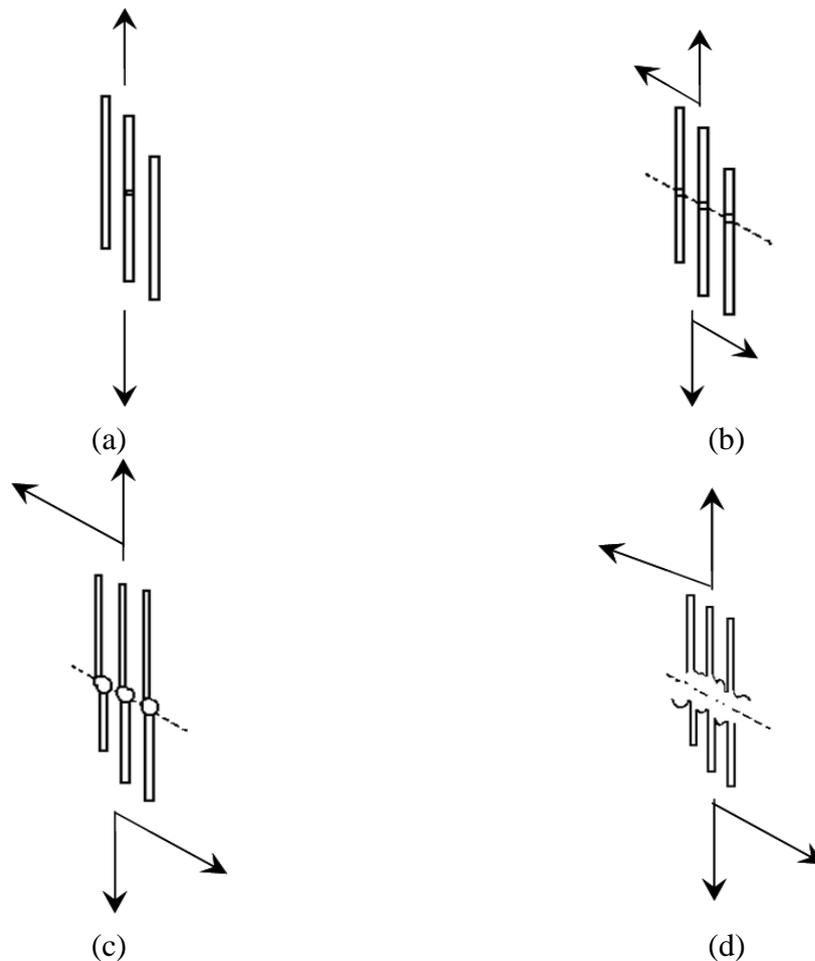


Fig. 2.9. Micromecanismo de Miller y Smith de fisuración por cortante de la microestructura laminar perlítica (MILLER y SMITH, 1970).

Como cabía esperar este micro-defecto, piel de leopardo, se ha observado en las micrografías pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado (Fig. 2.10), puesto que de forma continua en el proceso de trefilado se están produciendo reorientaciones de las láminas a favor de la dirección del trefilado. Este fenómeno también se observa en alambres de acero correspondientes con los primeros pasos de trefilado, particularmente se observa en aquellas colonias de perlita que ya disponen de una orientación, en cuanto a sus láminas se refiere, muy próxima a la dirección longitudinal del alambre (dirección principal del trefilado).

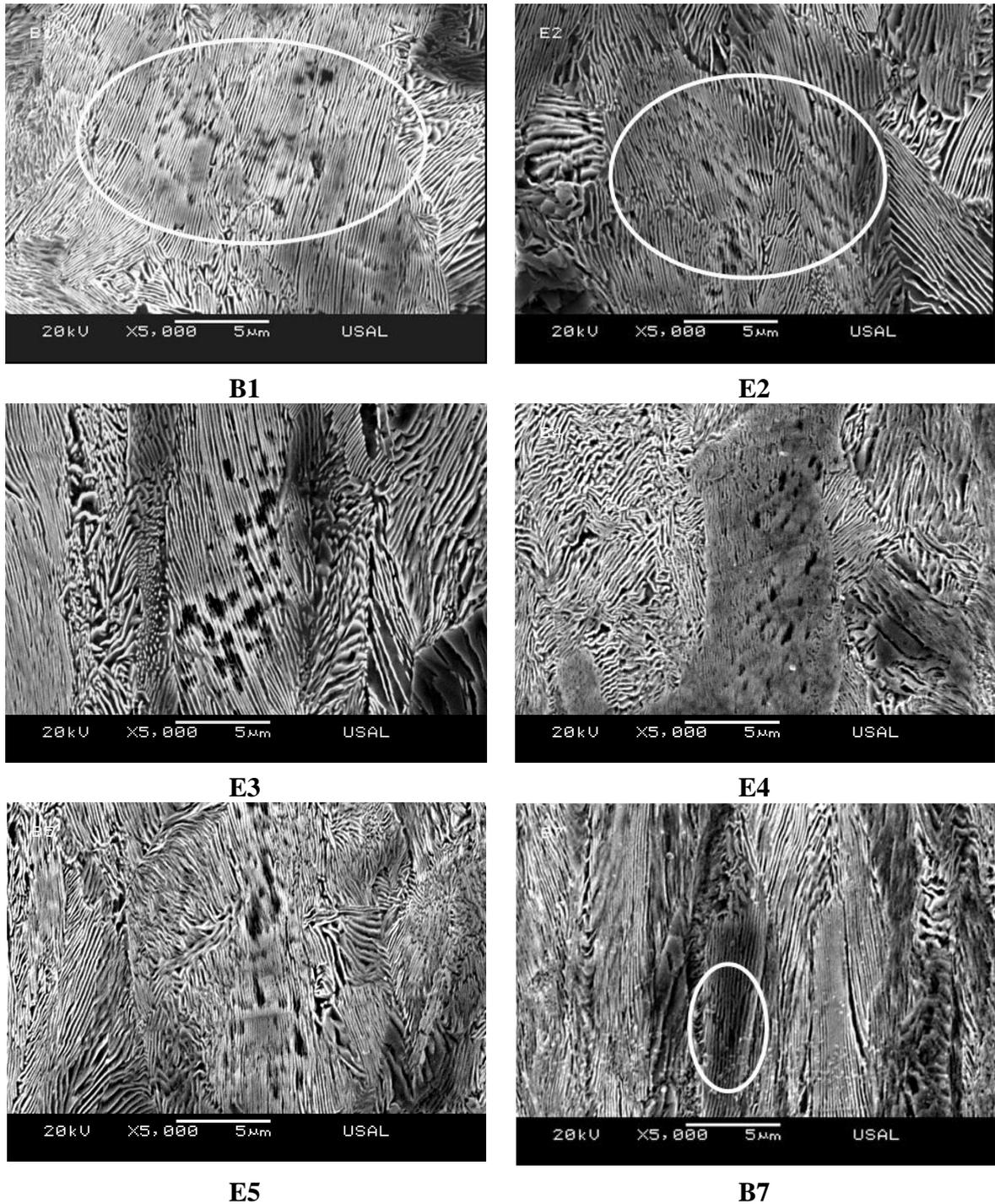


Fig. 2.10. Micrografías en las que se muestra el micro-daño piel de leopardo.

Una particularidad de este micro-defecto se produce en colonias cuyas láminas están orientadas en la dirección del proceso de trefilado, presentándose pseudocolonias perlíticas, con láminas perpendiculares al eje longitudinal del alambre, en ambos lados del micro-daño (Fig. 2.11). Se ha nombrado dicha particularidad como *enjambre de micro-daño*. Dichos enjambres de micro-daño se forman en zonas dónde las colonias adyacentes poseen láminas próximas a la perpendicularidad (pseudocolonias perlíticas), pues éstas son capaces de admitir

una mayor deformación sin llegar a fracturarse, contrariamente a lo que le sucede a aquellas colonias con láminas paralelas a la dirección del trefilado (eje longitudinal del alambre). Las colonias colindantes que están próximas a orientarse en la dirección del trefilado admitirán una menor deformación plástica y favorecerán el estreñimiento de las láminas que conforman la colonia orientada. La evolución de este micro-daño, con el proceso de trefilado, es hacia un desgarramiento intracolonia que generará discontinuidades del material.

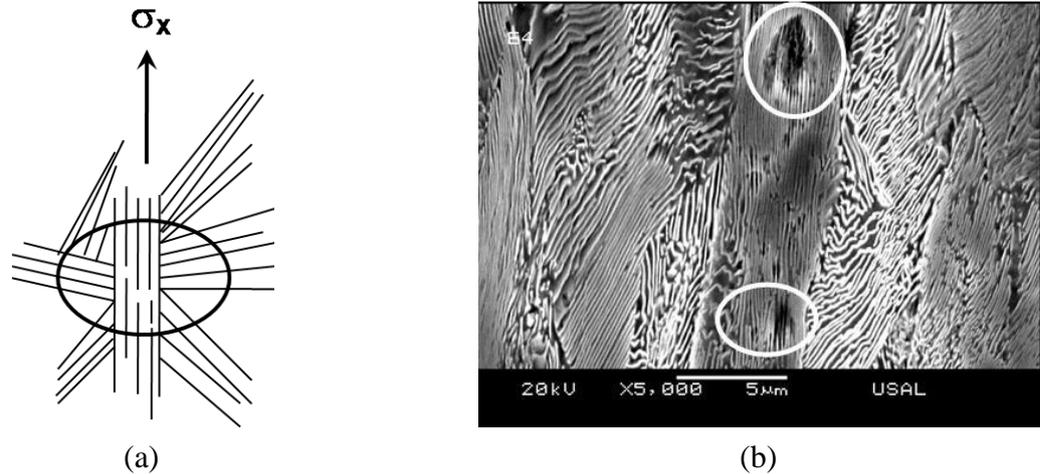


Fig. 2.11. Micro-defecto tipo enjambre de daño: (a) esquema y (b) micrografía con enjambre de daño correspondiente al cuarto paso del proceso de trefilado, acero B4.

4.2.2. Garras de leopardo

Es un micro-defecto producido por la unión de las microcavidades generadas por la rotura de las láminas de cementita durante el trefilado. Se puede observar en colonias cuyas láminas están orientadas próximas a la dirección principal del alambre (eje longitudinal). Dicho micro-defecto posee una orientación aproximada de 45°, debido a un mecanismo de formación tipo Miller y Smith, observándose incluso en micrografías pertenecientes al primer paso del trefilado, con lo cual el trefilado de una sola hilera bastaría para generar dicho micro-daño en las colonias cuyas láminas están orientadas en la dirección del eje longitudinal del alambre (eje principal del trefilado). En algunos casos se pueden distinguir pequeños fragmentos de láminas de cementita dentro del micro-daño de garra de leopardo, aunque en la mayoría de los analizados la oquedad generada por dicho micro-defecto no presenta fragmentos de láminas de cementita en el interior (Fig. 2.12). Las garras de leopardo aparecen a lo largo de todo el proceso. Como se muestra en las micrografías de la Fig. 2.12, dichas garras al igual que el micro-daño precursor de éste, piel de leopardo, se muestran en colonias cuyas láminas ya están orientadas a favor de la dirección del proceso de trefilado. A medida que avanza el proceso de trefilado el micro-defecto denominado *garra de leopardo*, generado en las primeras etapas de dicho proceso, puede evolucionar hacia:

- ✓ La formación de un desgarro intracolonia [Figs. 2.13 (a) y (b)], especialmente en aquellas colonias con láminas que apenas sufren rotación alguna durante el proceso de conformación por estar éstas orientadas en la dirección longitudinal del alambre.
- ✓ Como microfisuras cuasi-paralelas a la dirección longitudinal del alambre [Fig. 2.13(c)]: en aquellas colonias cuyas láminas sí han rotado notablemente hacia la dirección del eje longitudinal del alambre durante el proceso de trefilado.

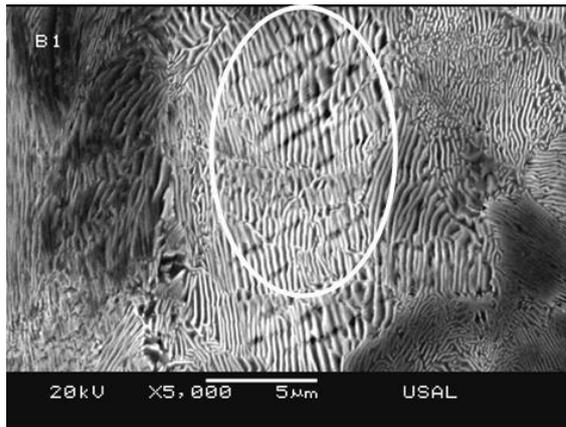
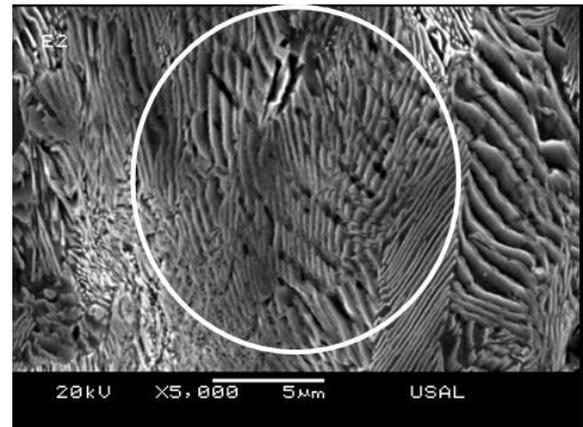
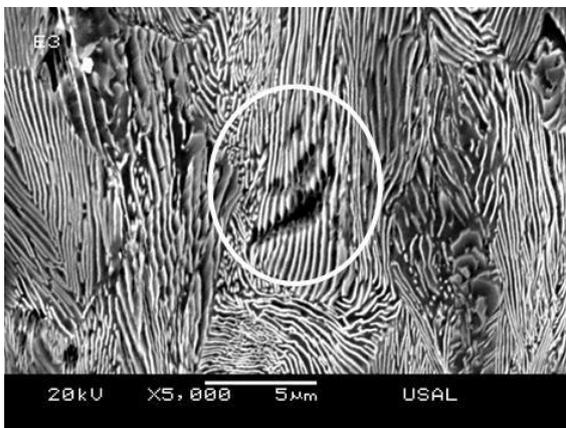
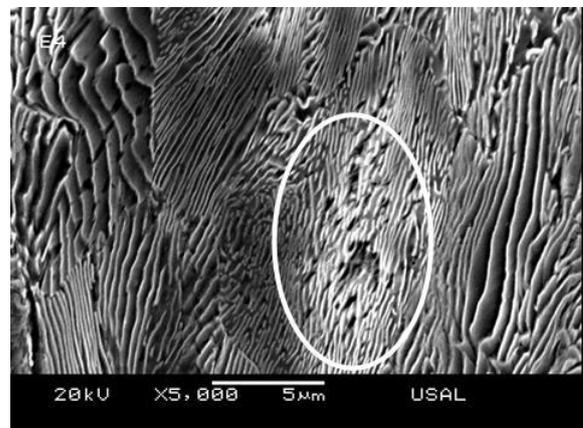
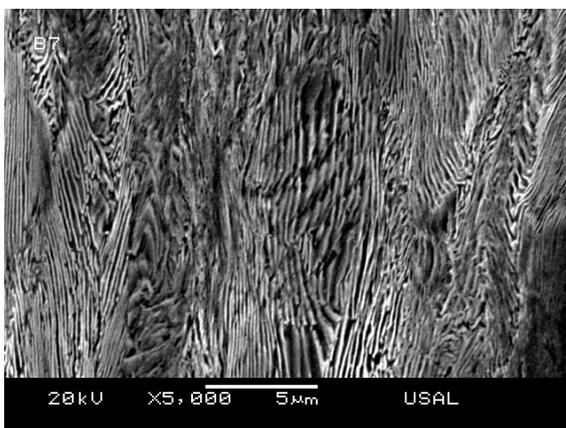
**B1****E2****E3****E4****B7**

Fig. 2.12. Micrografías pertenecientes a diferentes pasos del proceso de trefilado en las que se muestra el micro-daño garras de leopardo (aceros tipo B y E).

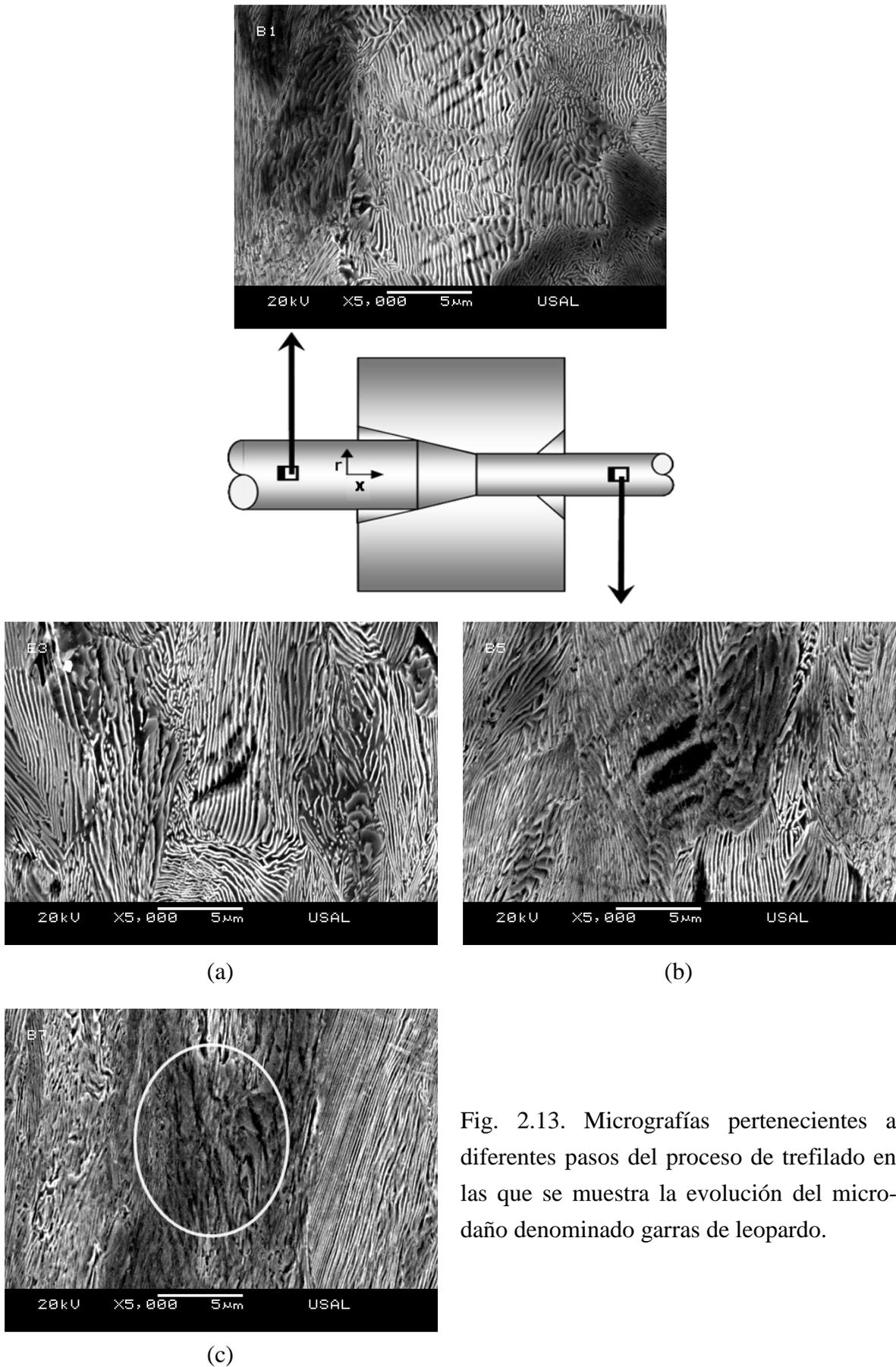


Fig. 2.13. Micrografías pertenecientes a diferentes pasos del proceso de trefilado en las que se muestra la evolución del micro-daño denominado garras de leopardo.

4.2.3. Rotura por curvaturas

Es un tipo de micro-daño puntual que se observa dentro de las láminas de una colonia, las cuales aparecen curvadas debido al acomodamiento de ésta durante el proceso de trefilado. La mayoría de las láminas que conforman las colonias de perlita se curvan al ser sometidas a las tensiones propias del proceso de trefilado, siendo más apreciables las curvaturas cuanto más difiere la orientación de las láminas con respecto a la del proceso de trefilado. Uno de los casos más claros de este tipo de micro-daño se presenta en las pseudocolonias perlíticas. En los micro-daños de rotura por curvatura, las láminas de cementita se fragmentan debido al acomodamiento de la colonia con respecto a las colonias vecinas (Fig. 2.14)

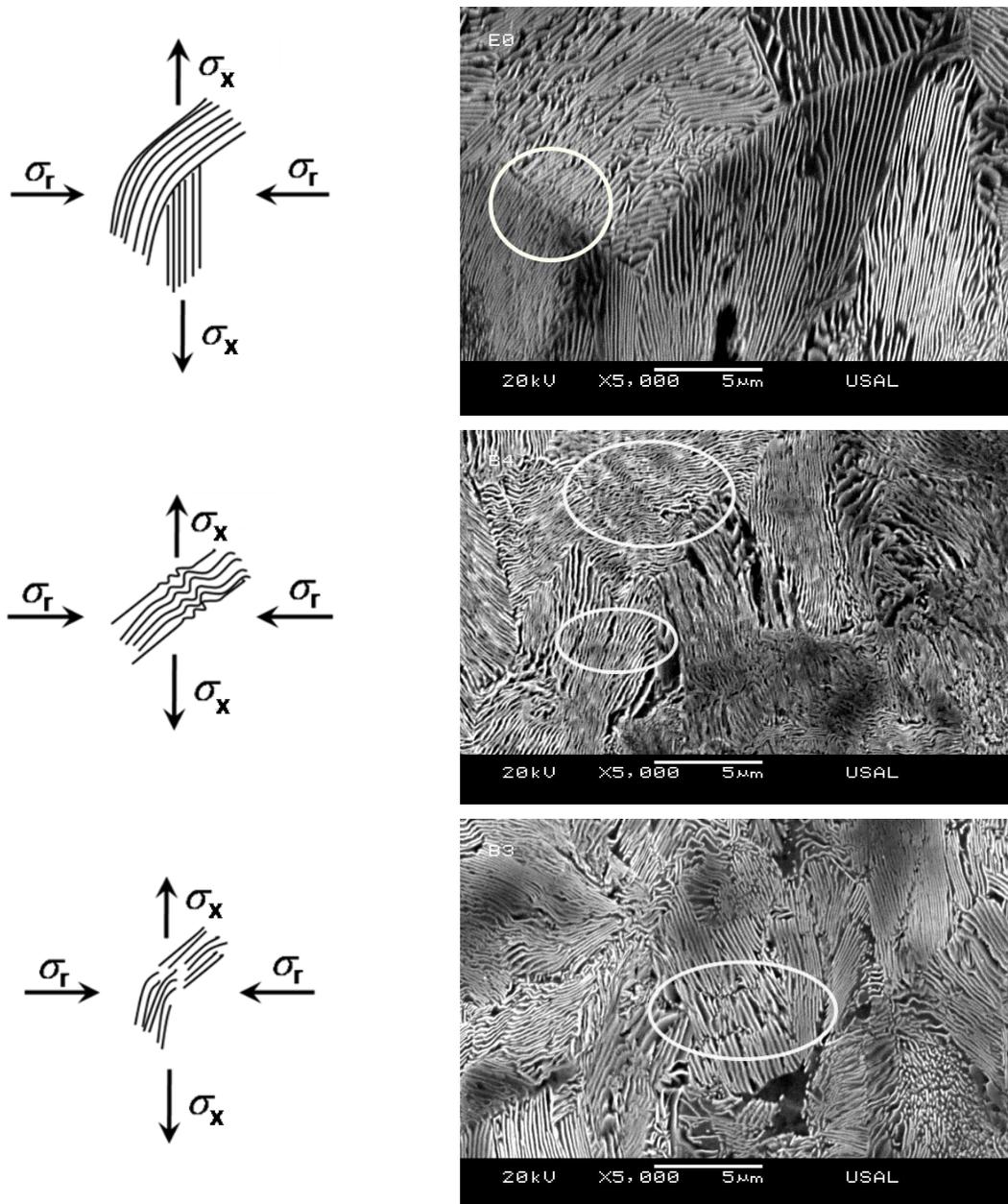


Fig. 2.14. Simulación proceso de generación de rotura por curvatura.

Los esfuerzos a los que la matriz perlítica es sometida durante el proceso de trefilado hacen que las láminas de las colonias se orienten hacia la dirección del eje longitudinal del alambre; no obstante, algunas de estas láminas no soportan tales deformaciones y se fragmentan. Las colonias cuyas láminas se fragmentan pueden llegar a tener parte de los fragmentos orientados en la dirección del proceso de trefilado mientras el resto de los mismo pueden llegar a orientarse de forma cuasi perpendicular a éstos apareciendo como posibles láminas de una futura pseudocolonia, Fig. 2.15.

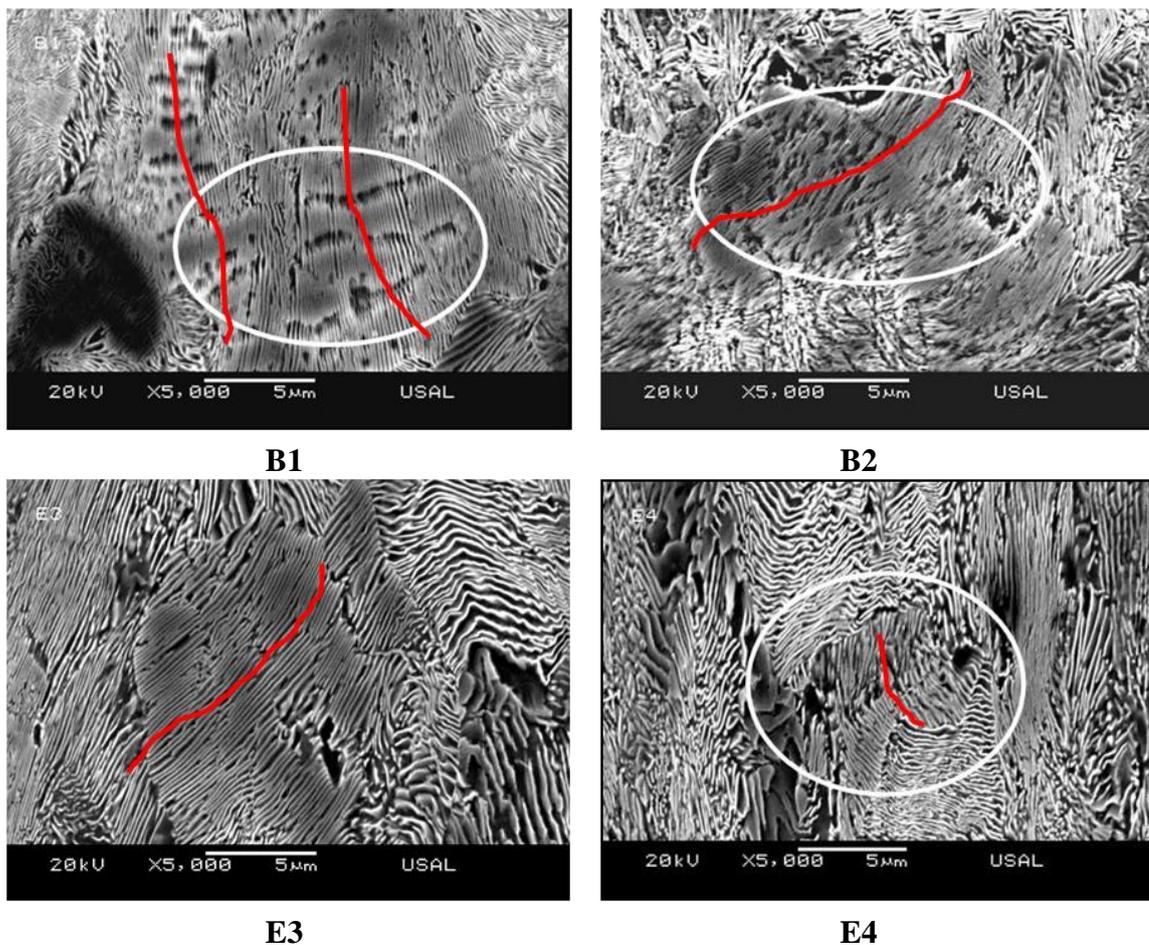


Fig. 2.15. Micrografías pertenecientes a los diferentes pasos del proceso de trefilado en las que se muestra el micro-daño rotura por curvatura.

El micro-daño puede evolucionar a lo largo del proceso de trefilado de las siguientes formas:

- ✓ Deformándose en la dirección del proceso de trefilado (eje longitudinal del alambre), aumentando su anchura [Fig. 2.16 (a)].
- ✓ Llegando a crear verdaderos laberintos con el material fragmentado, a veces constreñido en diferente direcciones [Fig. 2.16 (b)].

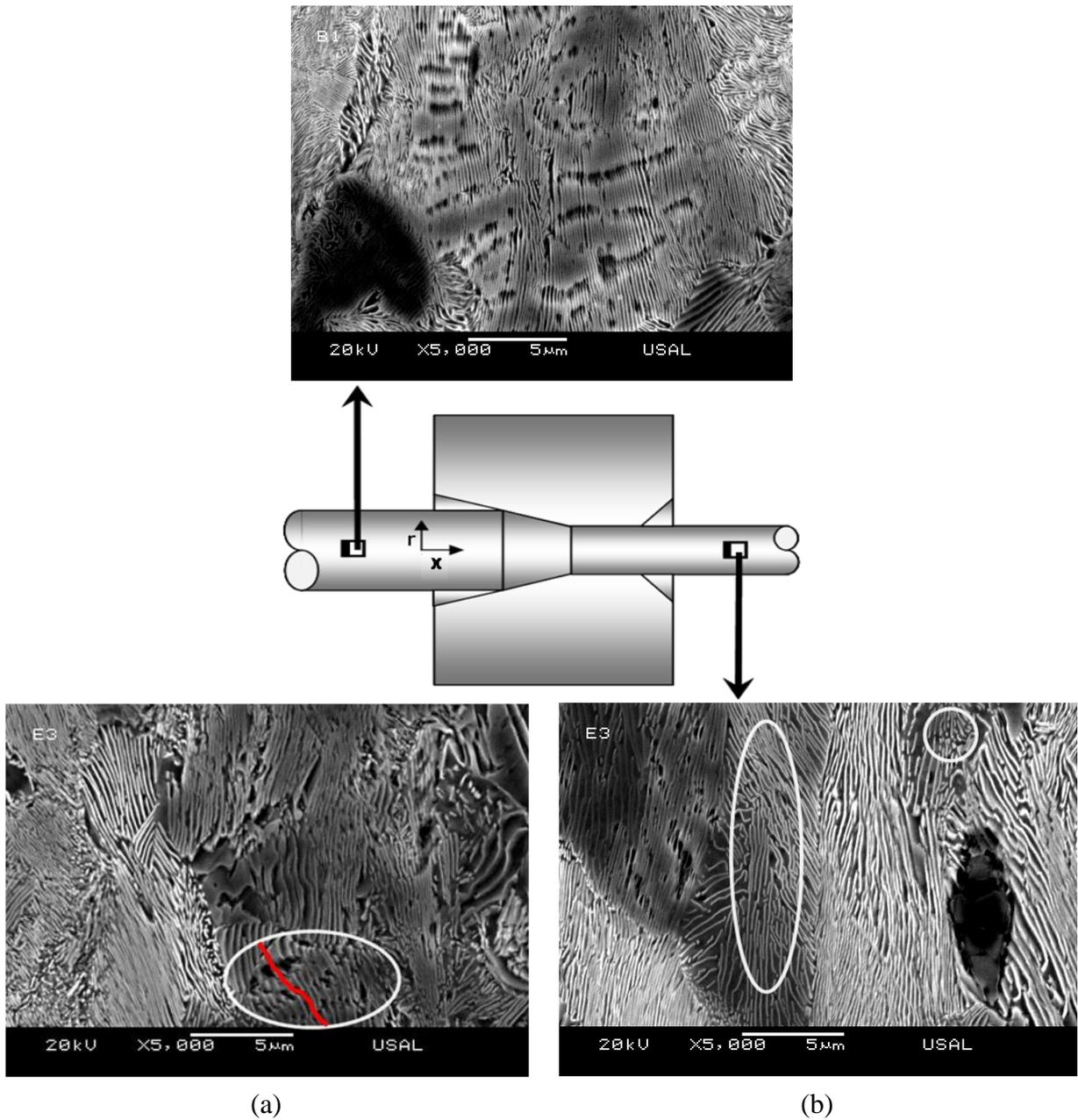


Fig. 2.16. Evolución del micro-daño denominado rotura por curvatura de láminas de cementita durante el proceso de trefilado.

4.2.4. Micro-descolonización

La micro-descolonización es un micro-defecto que se produce durante el trefilado como consecuencia del no acomodamiento entre colonias. Este micro-daño es específico de límites de colonia. Dicho micro-defecto comienza con la generación de huecos en el límite entre dos colonias, las láminas que conforman ambas colonias limítrofes parecen separarse formando huecos entre ambas. La generación de huecos en el límite de las colonias sigue un mecanismo similar a la formación de microhuecos descrita por Miller y Smith. Se puede observar desde el

primer paso del proceso de trefilado y evoluciona a lo largo del mismo (Fig. 2.17). La creación de este micro-daño por micro-descolonización sigue el siguiente proceso:

- ✓ Aumento del tamaño de los huecos en la dirección paralela al proceso de trefilado [Fig. 2.18 (a)].
- ✓ Unión de los huecos y rotura total entre el límite de ambas colonias [Fig. 2.18 (b)].

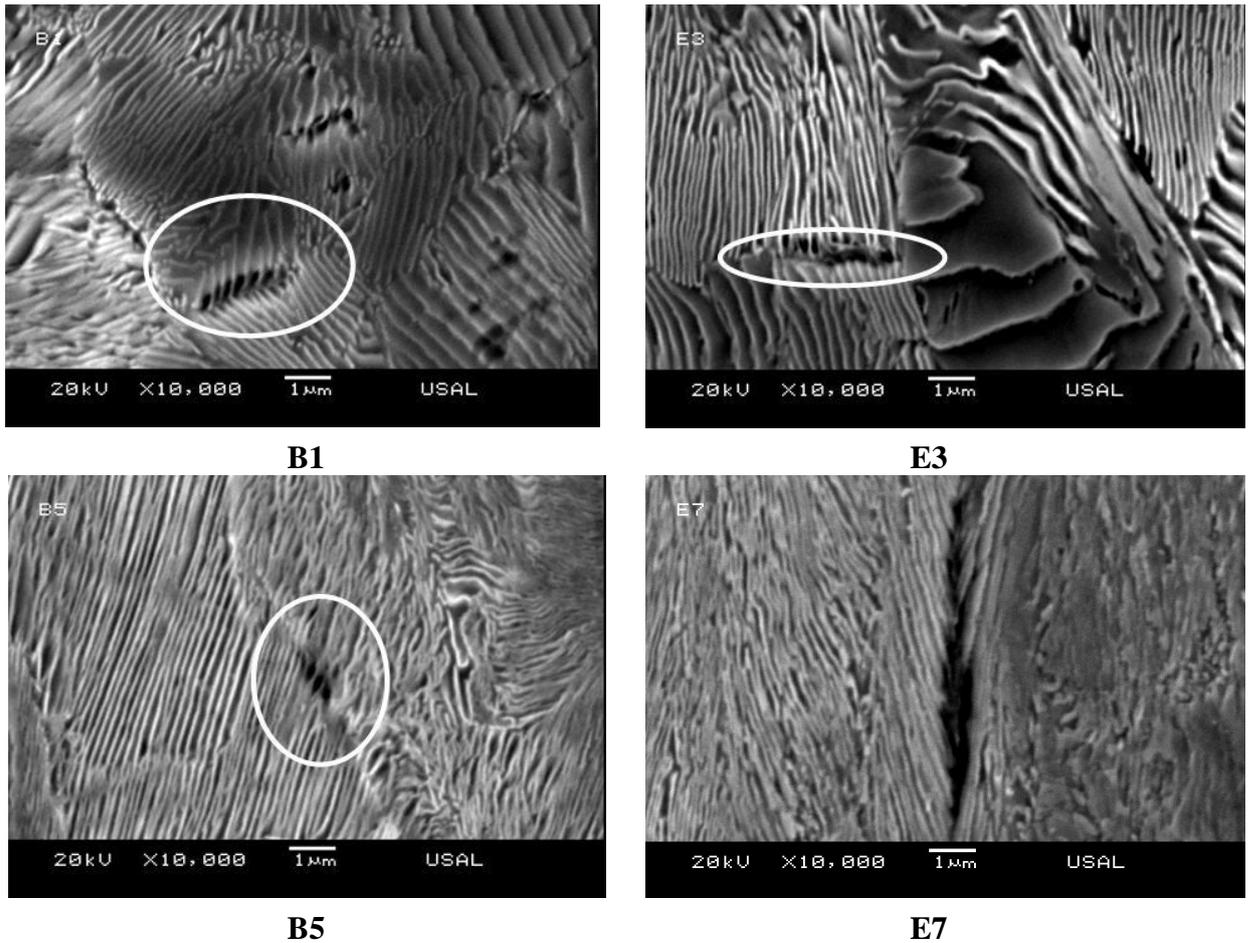


Fig. 2.17. Micrografías pertenecientes a diferentes pasos del proceso de trefilado (aceros B y E) en las que se muestra el micro-daño por micro-descolonización

La generación del micro-daño de micro-descolonización es similar al crecimiento y coalescencia de micro huecos que se observa de forma general en la fractura del acero perlítico (Fig. 2.19). La micro-descolonización puede evolucionar durante el proceso de trefilado a un desgarramiento intercolonial en el cual no se han observado fragmentos de láminas de cementita en el interior. Dicho desgarramiento intercolonial generado a partir de este micro-daño puede tener influencia en el camino de fractura del material al igual que en la generación de daños en las colonias vecinas. A lo largo del proceso de trefilado este tipo de micro-daño podrá evolucionar como la piel de leopardo, a desgarramiento intracoloniao o intercolonial en los

límites entre colonias, siendo el desgarro intercolonial la evolución más factible. Este microdaño genera grandes discontinuidades dentro de la microestructura perlítica, discontinuidades las cuales podrán tener una posterior influencia en la fractura final del material.

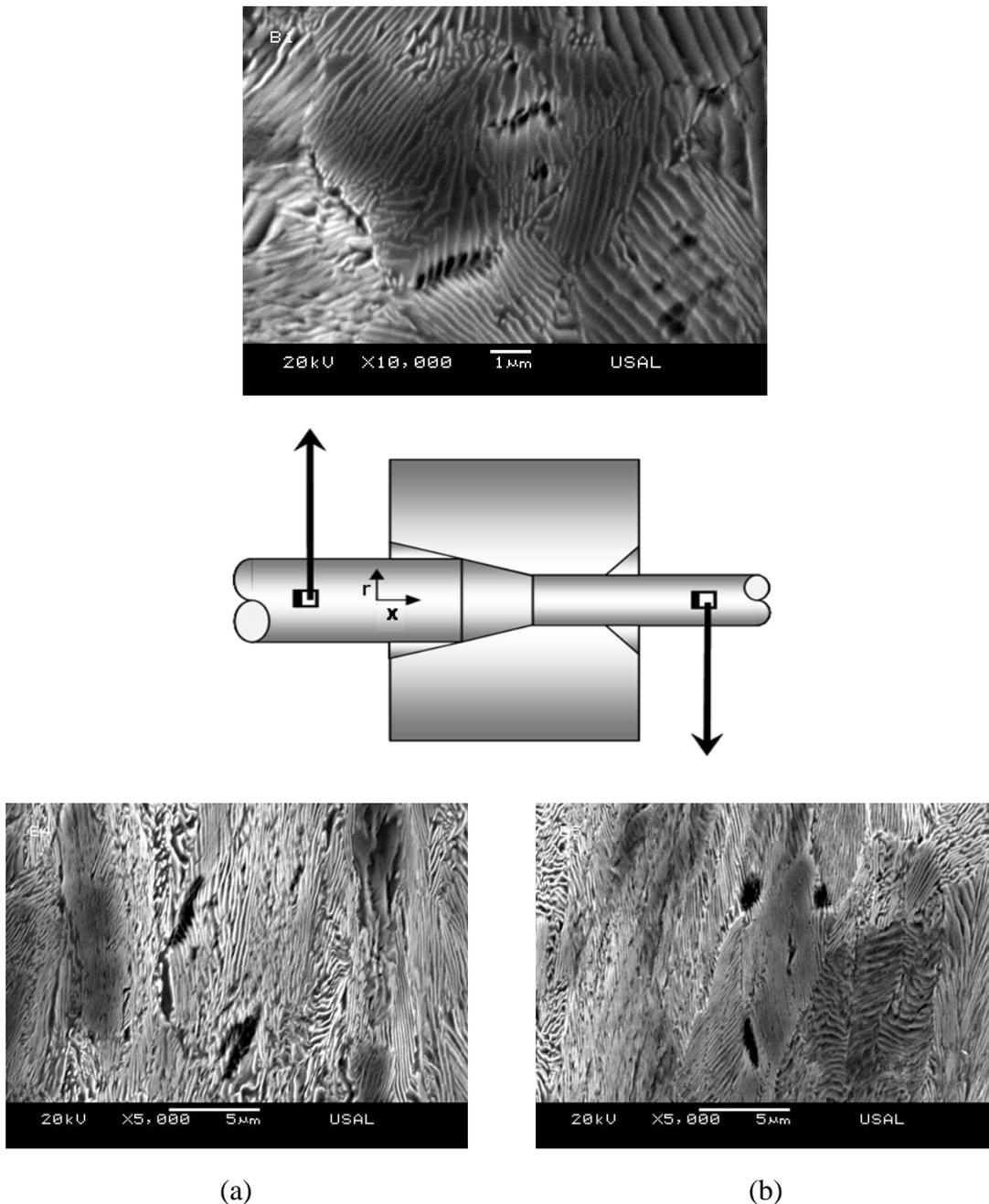
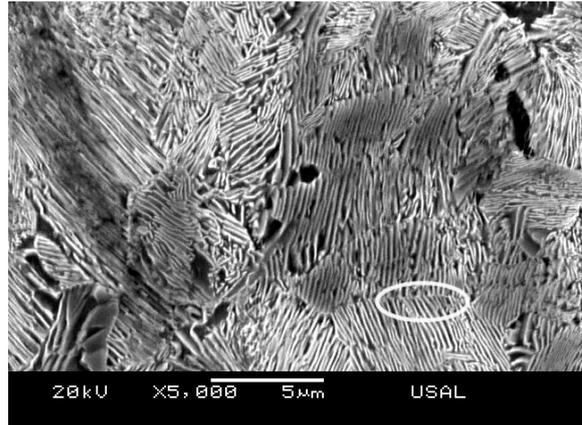
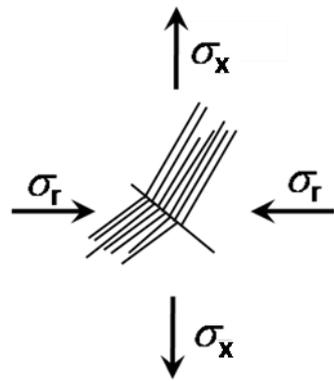
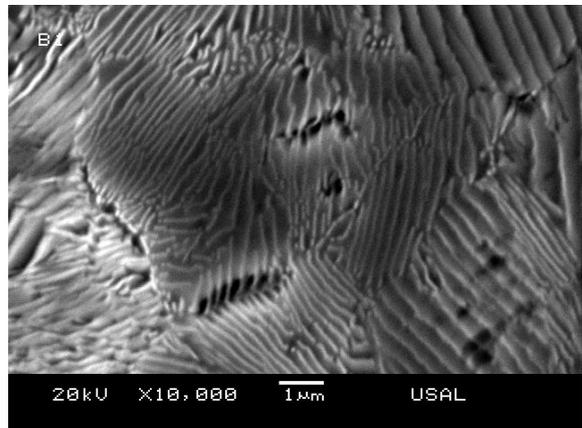
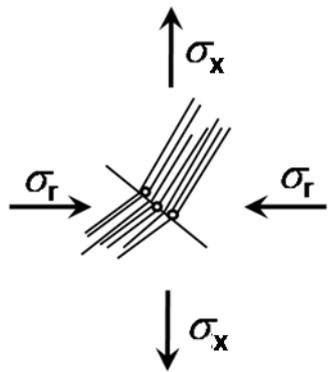


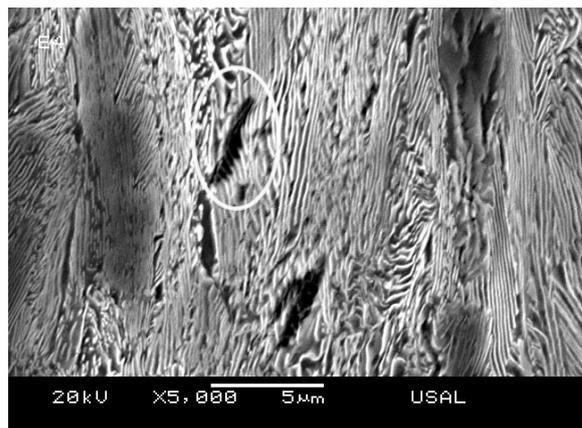
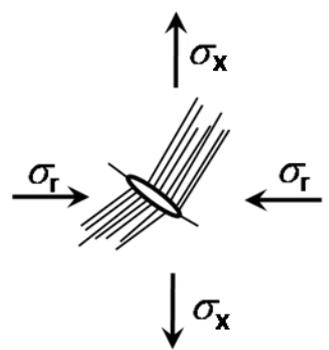
Fig. 2.18. Evolución de las microdescolonizaciones a desgarros intracoloniales durante el proceso de trefilado.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.19. Simulación proceso de generación de la microdescolonización.

4.2.5. Pseudocolonias perlíticas

Las pseudocolonias perlíticas son colonias cuyas láminas no han podido orientarse en la dirección del trefilado debido a la orientación, menos favorable al trefilado, que dichas láminas poseían al comienzo del proceso y a las tensiones ejercidas por las colonias adyacentes al orientarse durante el trefilado. Estas pseudocolonias se comportan de manera diferente al resto, siendo uno de sus aspectos más llamativos el grado de deformación plástica que presentan sus láminas de cementita, las cuales aparecen muy curvadas. Otra de las diferencias que hacen que sean distinguibles hasta en los pasos más avanzados del proceso de trefilado es su gran espaciado interlaminar, que en vez de decrecer aumenta a medida que el alambre de acero pasa por las hileras de trefilado (TORIBIO *et al.*, 2006).

En los primeros estadios del proceso de trefilado la geometría de las pseudocolonias es igual a la del resto de colonias, sin embargo según va avanzando el proceso de trefilado la geometría cada vez es más elipsoidal. La geometría de las pseudocolonias vendrá influida por las tensiones que ejerzan las colonias de perlita de su alrededor.

Para el estudio de las pseudocolonias perlíticas y su evolución durante el proceso de trefilado se ha escogido una serie de micrografías representativas de cada paso de trefilado, en las cuales se ha remarcado las posibles pseudocolonias y, a partir del tercer paso del proceso de trefilado, las pseudocolonias bien diferenciadas. Más adelante se cuantificará el espaciado interlaminar de las pseudocolonias a lo largo del proceso de trefilado.

En la secuencia de micrografías expuesta se han querido comparar los mismos pasos de trefilado de las dos familias de aceros estudiados, C y E, con ello se podrá ver no sólo la evolución de las pseudocolonias, sino comparar si en los dos aceros las colonias y las láminas exhiben una evolución semejante. La deformación de las láminas de cementita es un hecho que se puede apreciar de forma visual, por lo tanto se intentará describir lo mejor posible el grado de curvatura. En la secuencia de figuras siguientes, compuestas por micrografías, se muestra la evolución de las pseudocolonias en los sucesivos pasos del proceso de trefilado (Fig. 2.20-2.27).

En las micrografías pertenecientes al alambrón inicial, primer paso y segundo paso del proceso de trefilado (Figs. 2.20-2.22) todavía no se han formado las pseudocolonias. Sin embargo podemos observar colonias con orientación perpendicular a la dirección de trefilado, que serán posibles futuras pseudocolonias, debido a que las pseudocolonias se forman por no ser capaces de orientarse, puesto que la dirección transversal de las láminas es la que más oposición presenta.

Las pseudocolonias con orientación transversal pueden llegar a ser o no pseudocolonias, esto dependerá no sólo del proceso de trefilado sino también de la orientación de las colonias adyacentes y los esfuerzos que ejerzan sobre éstas.

Las pseudocolonias como tales se pueden ver a partir del tercer paso del proceso de trefilado (Fig. 2.23). La evolución de las pseudocolonias es muy diferente de unas a otras, pero se tratará de describir las generalidades que presentan en su evolución.

Las láminas que forman las pseudocolonias aparecen curvadas desde su creación, pero hay que diferenciar la curvatura ondulada de los estadios iniciales de las curvaturas tan acentuadas que se pueden observar en los últimos pasos de trefilado. La diferencia es claramente observable en la secuencia de micrografías que presentan las pseudocolonias y es debida a la reducción de sección cada vez mayor a lo largo del proceso de trefilado, lo que supone una mayor deformación plástica acumulada. Algunas de estas micrografías presentan pseudocolonias cuyas láminas están tan curvadas que incluso se cierran entre ellas mismas (podría asemejarse a una onda sinusoidal).

Las tensiones a las que están sometidas las láminas que forman las pseudocolonias perlíticas, a veces son suficientes para que éstas se rompan. En algunas micrografías, sobre todo de pasos del proceso de trefilado avanzados (Fig. 2.24), aparecen pseudocolonias con láminas de cementita bastante fragmentadas.

Tanto las curvaturas como la fragmentación de las láminas de cementita son un hecho clave en su evolución, pues aumenta a medida que se avanza en el proceso de trefilado, es decir, a mayor grado de trefilado, las láminas que forman las pseudocolonias presentarán más curvaturas y aparecerán más láminas fragmentadas dentro de la misma. Como se puede observar en las micrografías obtenidas, las pseudocolonias marcadas presentan un espaciado interlaminar anómalo, esto es debido al constreñimiento al que están sometidas, pues las colonias adyacentes se están orientando en la dirección del proceso de trefilado.

Se han remarcado las pseudocolonias perlíticas en las micrografías seleccionadas para así analizar de forma visual cómo la esbeltez de estas colonias es cada vez mayor a lo largo del proceso de trefilado, partiendo de morfologías elipsoidales redondeadas a elipsoides completamente aplastados. La evolución de las pseudocolonias desde las micrografías pertenecientes al cuarto paso del proceso de trefilado (Fig. 2.24), hasta las pertenecientes al último paso del proceso de trefilado (Fig. 2.27) muestra que las pseudocolonias presentan cada vez formas más alargadas. El comportamiento y evolución de las pseudocolonias es el mismo en las dos familias de acero estudiados.

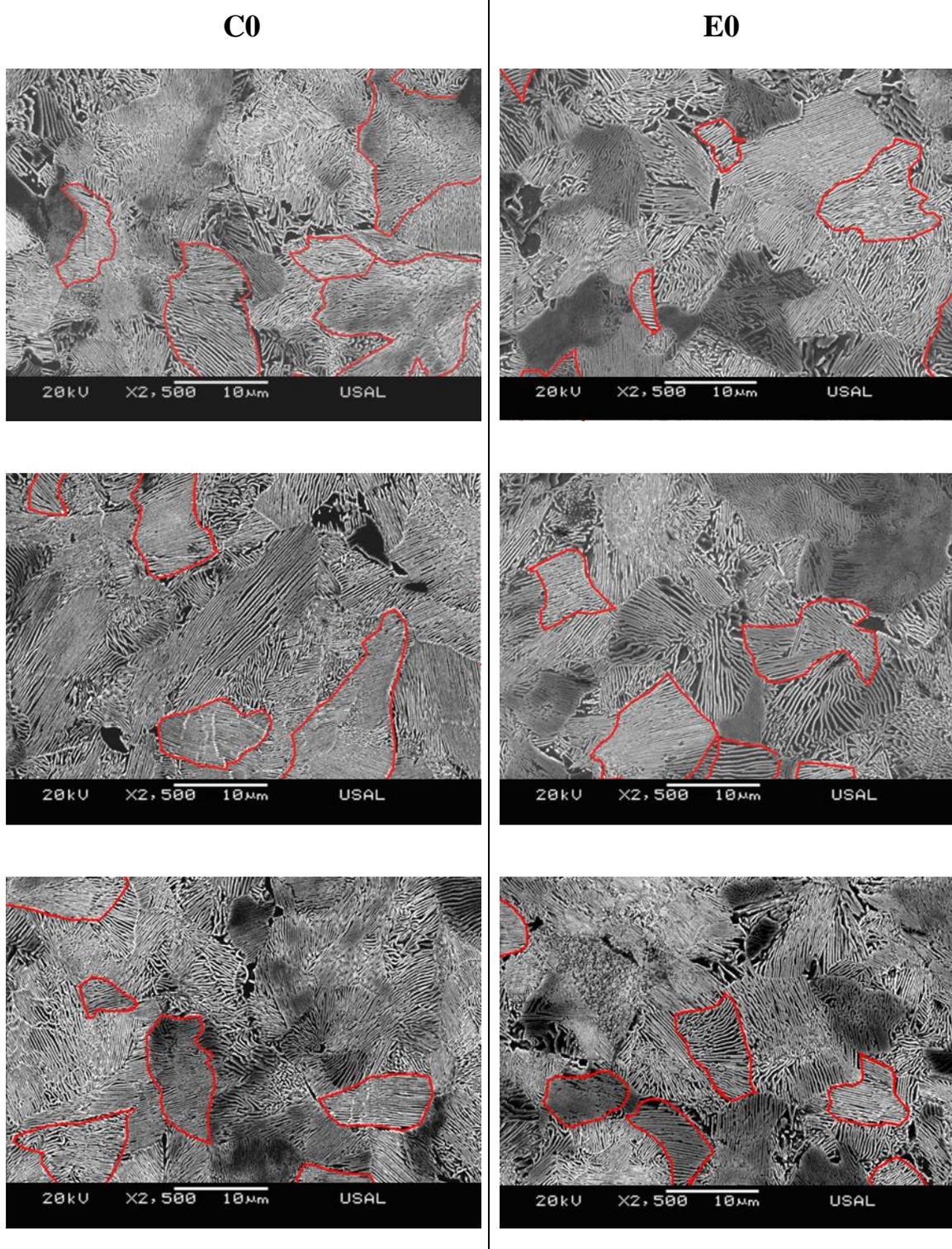


Fig. 2.20. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; alambρόn inicial: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

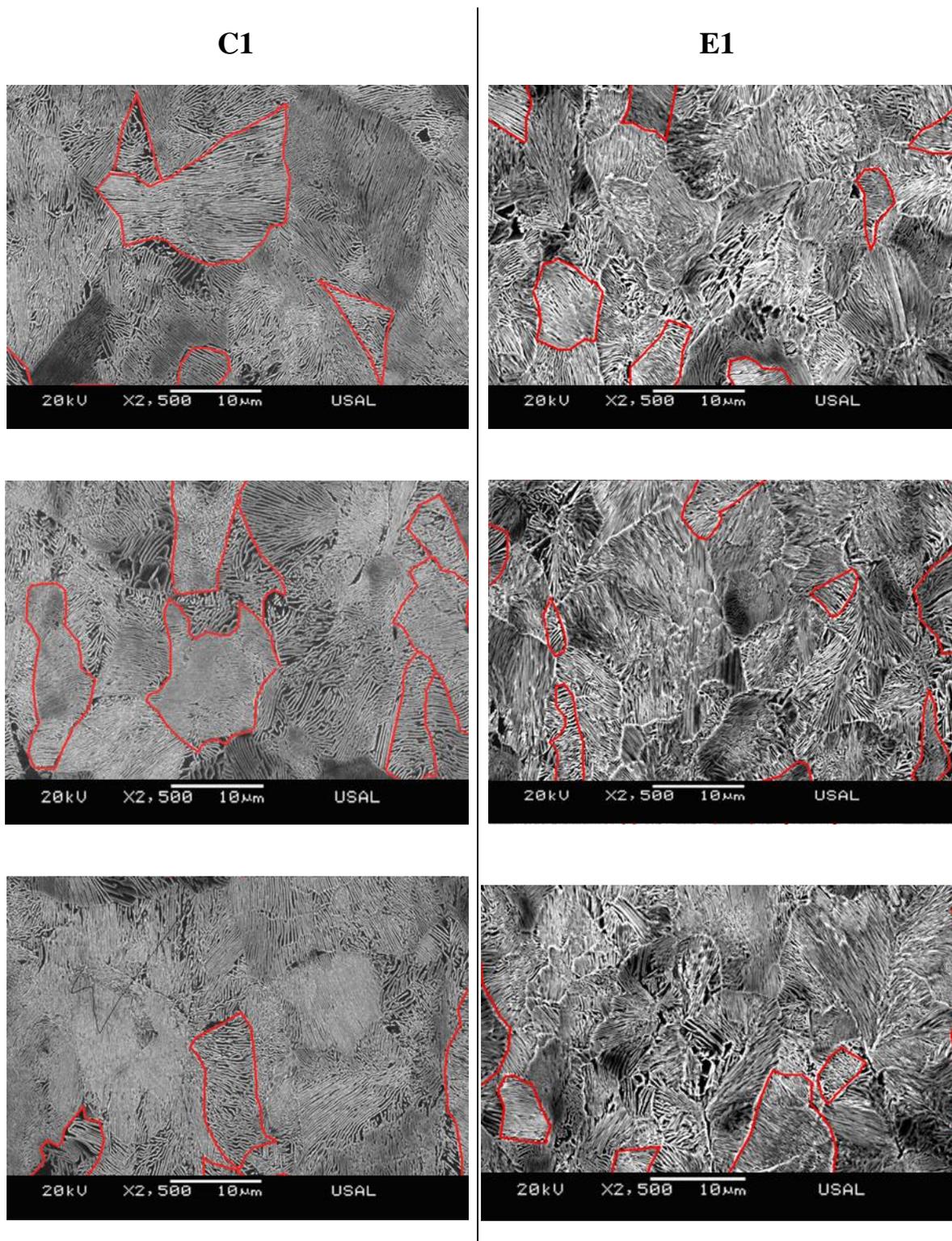


Fig. 2.21. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; primer paso de trefilado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

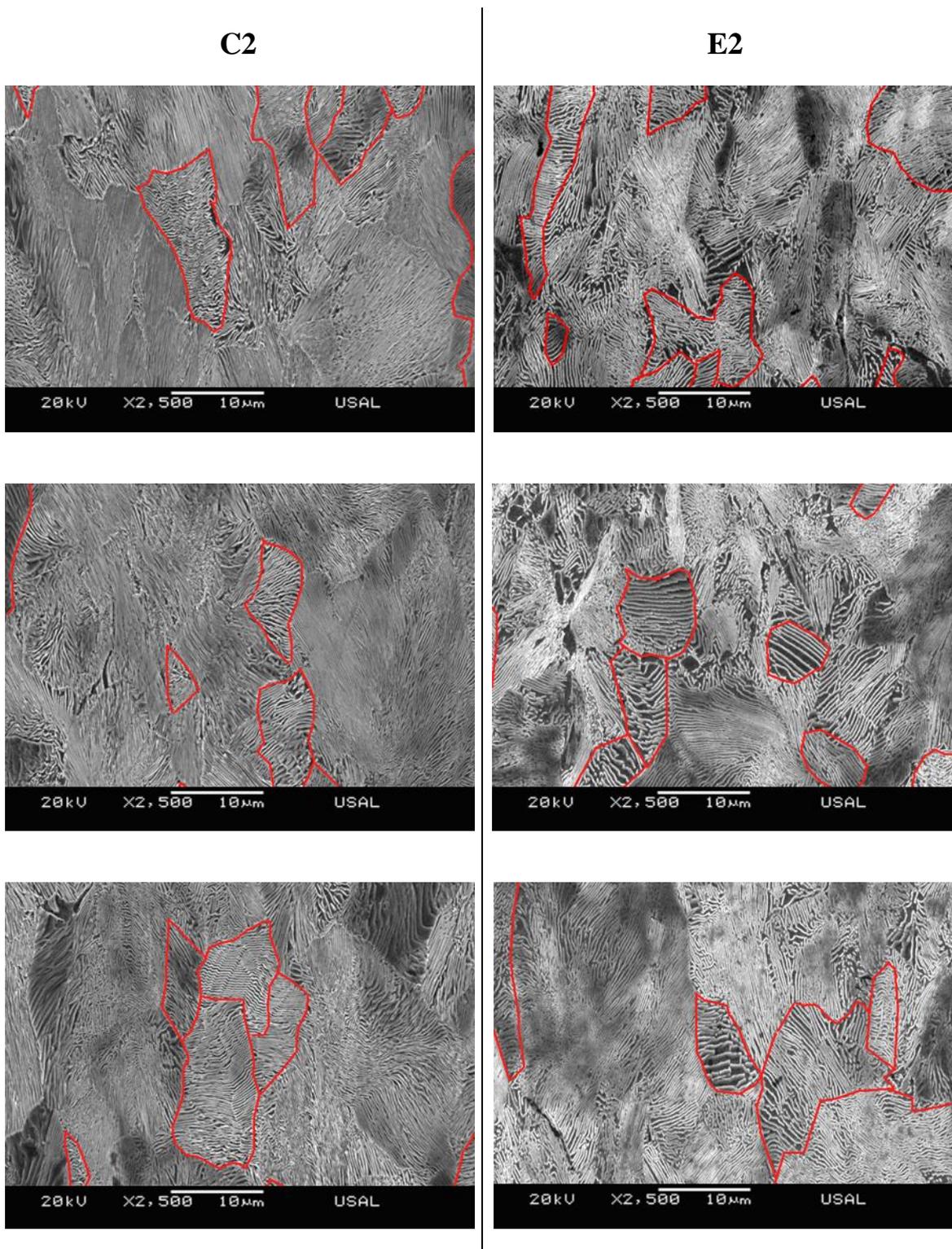


Fig. 2.22. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; segundo paso de trefilado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

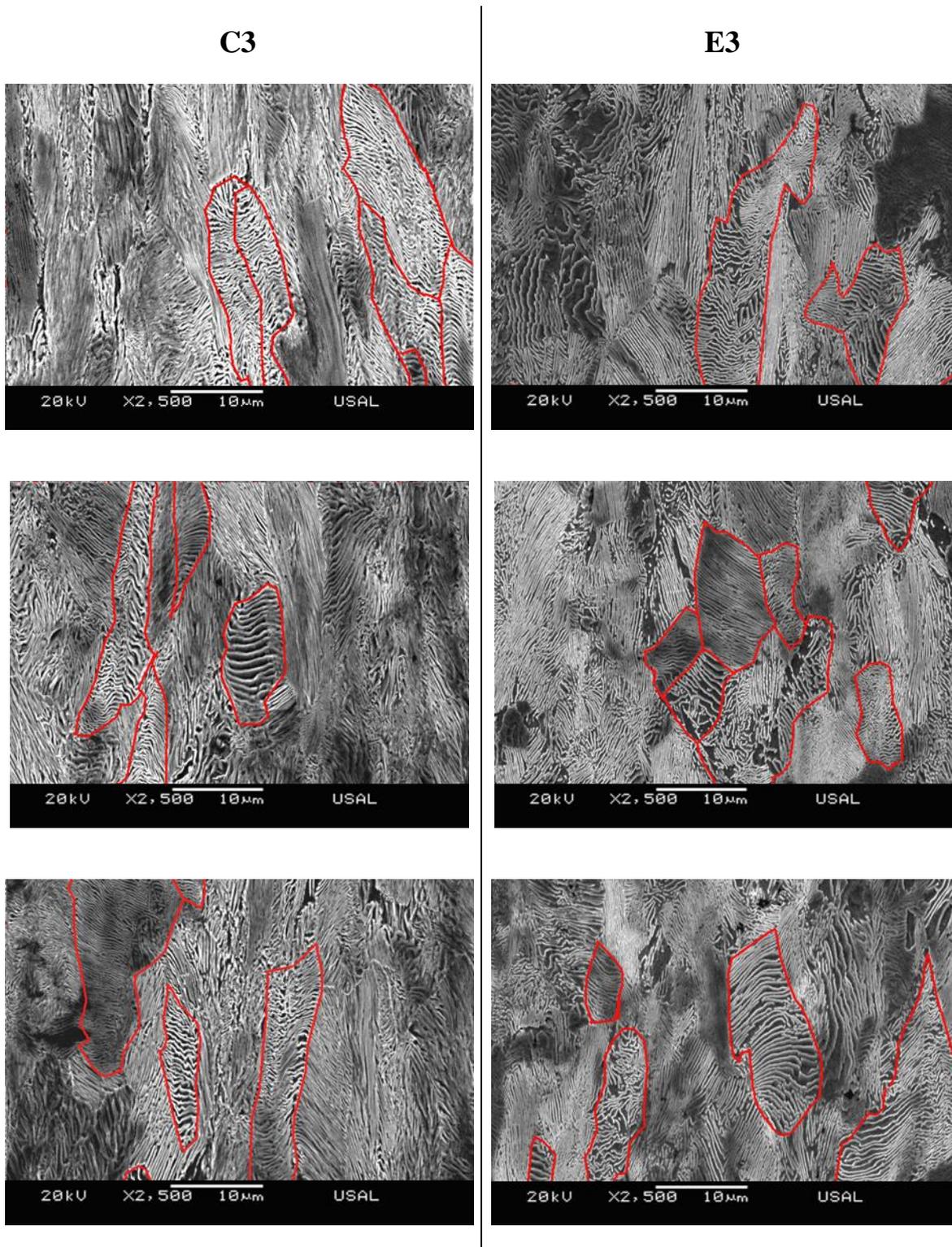


Fig. 2.23. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; tercer paso de trefilado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

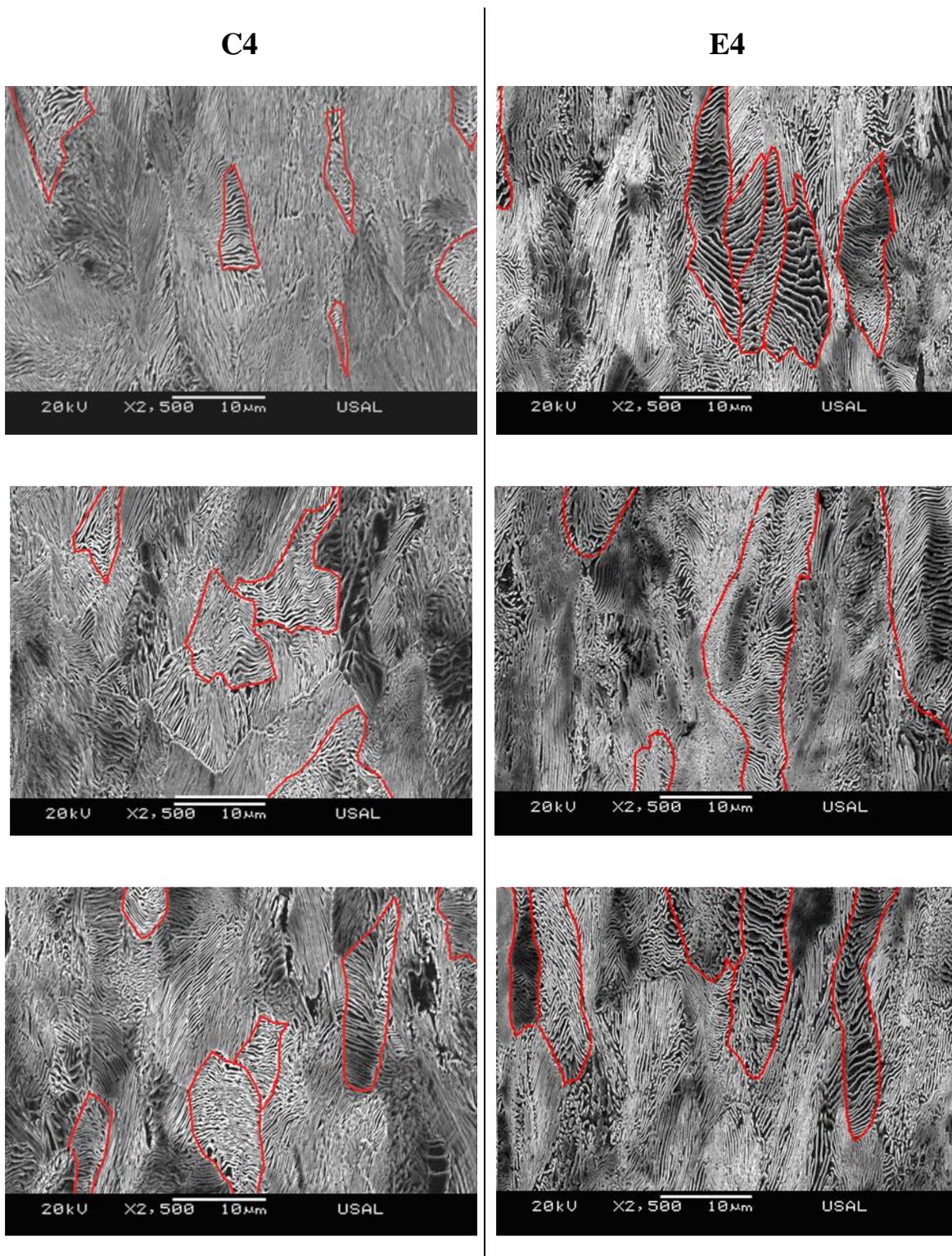


Fig. 2.24. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; cuarto paso de trefilado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

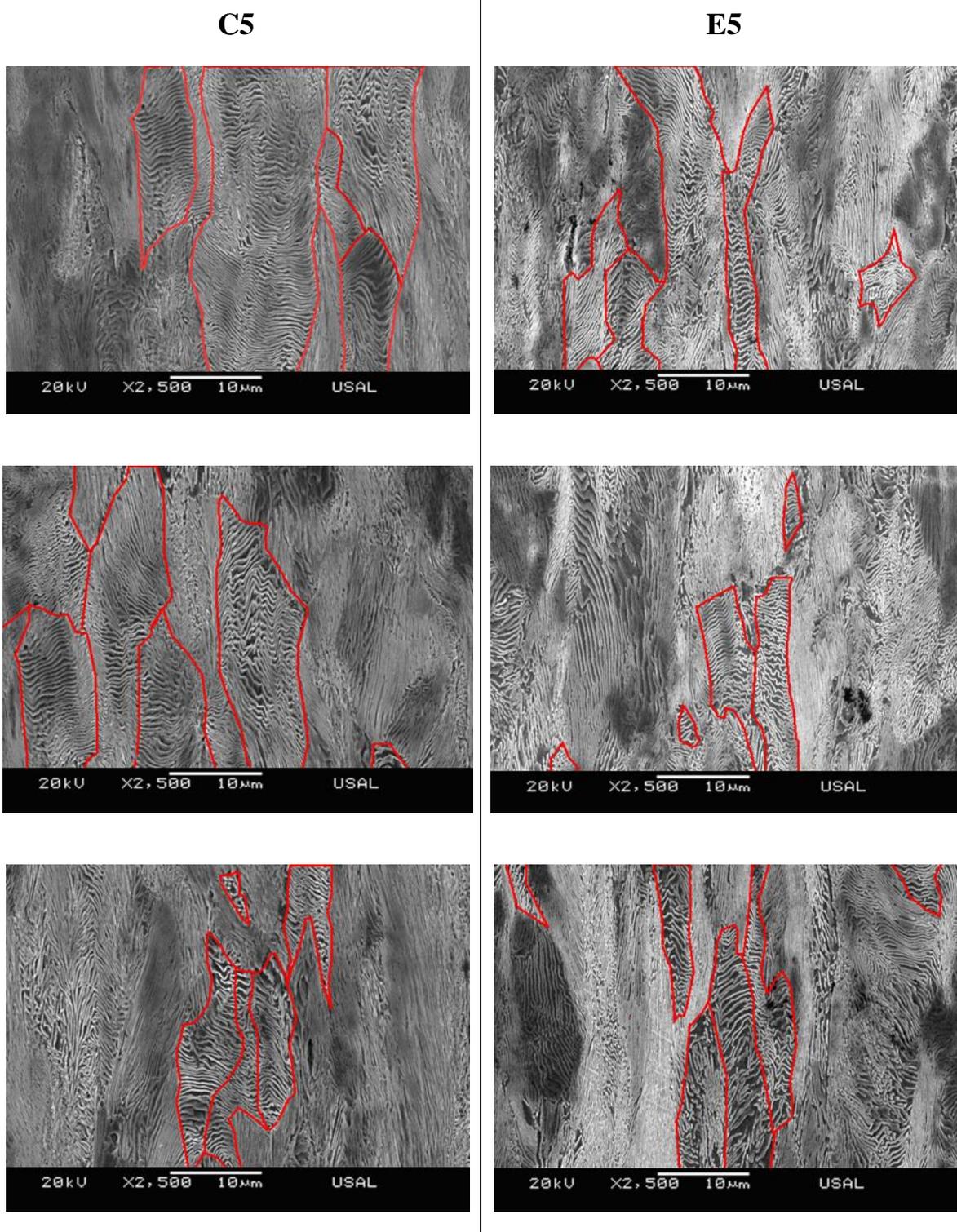


Fig. 2.25. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; quinto paso de trefilado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

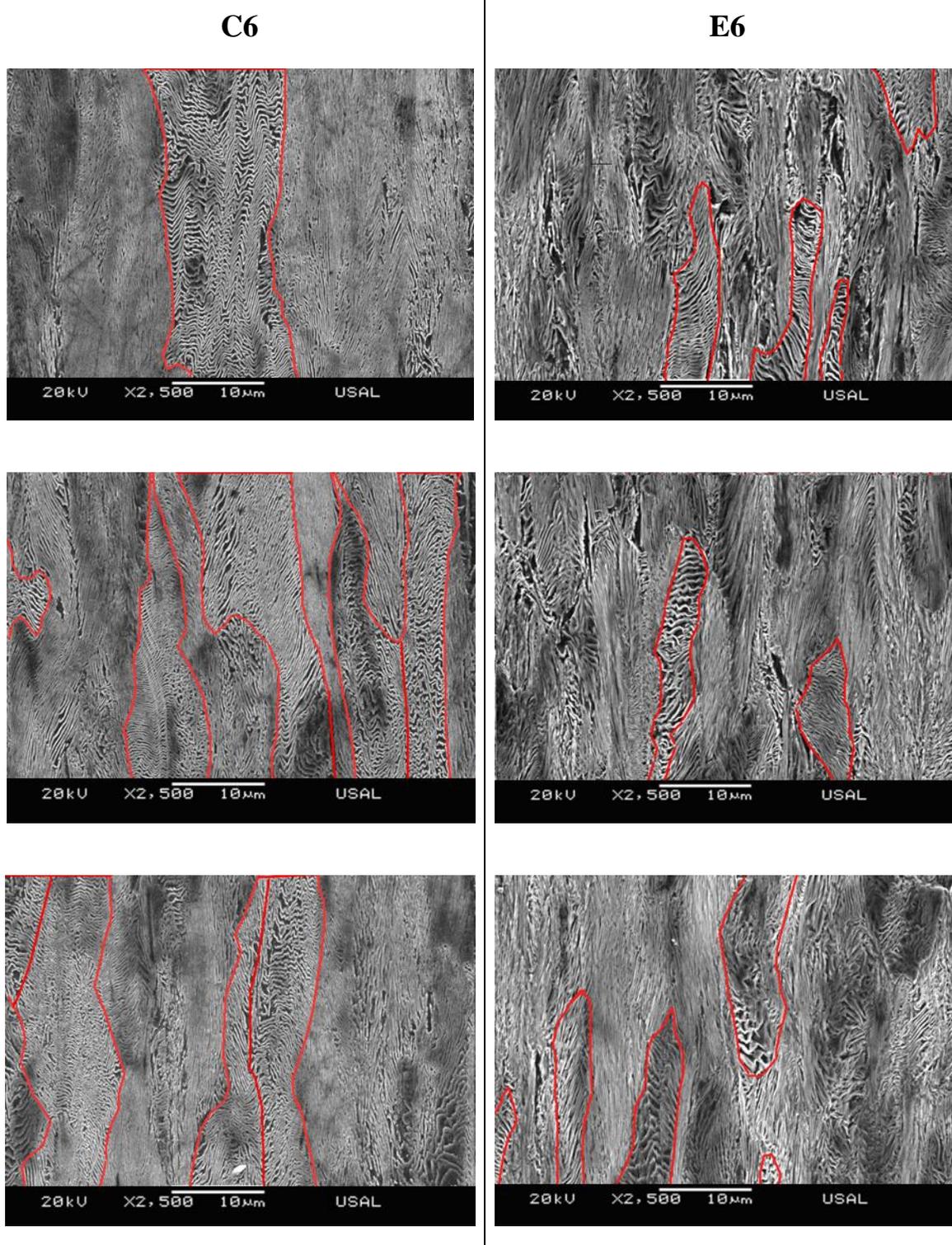


Fig. 2.26. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; sexto paso de trefilado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

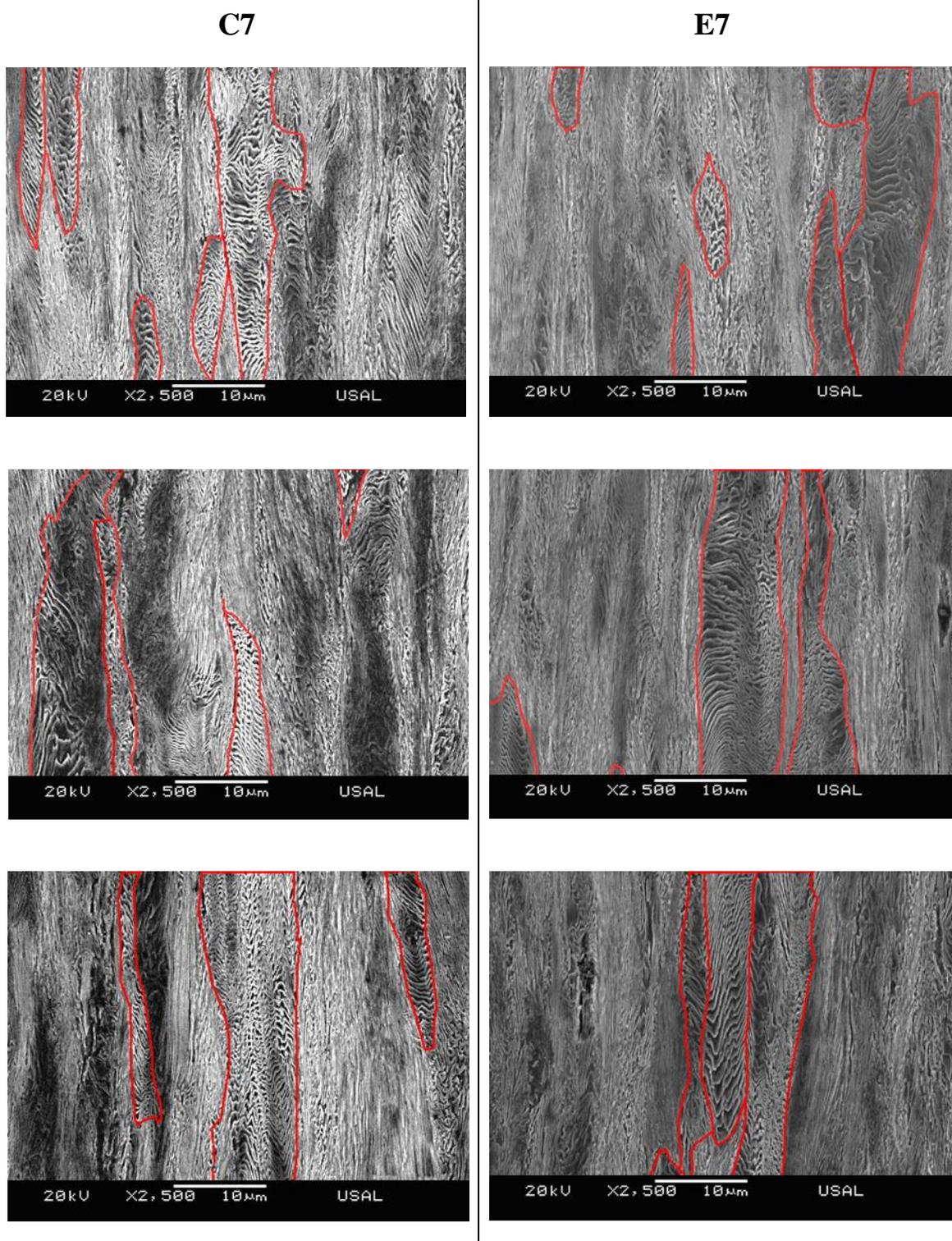


Fig. 2.27. Colonias con láminas orientadas transversalmente a la dirección de trefilado; alambre de pretensado: acero tipo C (izda.) y tipo E (dcha.).

La curvatura de las láminas de cementita en las pseudocolonias aumenta con el grado de trefilado. Las pseudocolonias, debido a la orientación inicial de sus láminas de cementita, cercana a la perpendicularidad con la dirección de trefilado, son las que mayor deformación plástica sufren, de ahí que las láminas se presenten de un modo mucho más curvado que en las demás colonias.

Las tensiones a las que son sometidas las pseudocolonias perlíticas durante el proceso de trefilado hacen que dichas pseudocolonias muestren en ocasiones sus láminas de cementita fragmentadas, que suelen disponerse en forma de cremallera superponiendo las láminas de cementita a las de ferrita, como se puede observar en la Fig. 2.28, dónde se muestra la micrografía, perteneciente a la sección longitudinal del acero E5, que posee fragmentadas las láminas de cementita y el esquema de intrusión de unas láminas en otras.

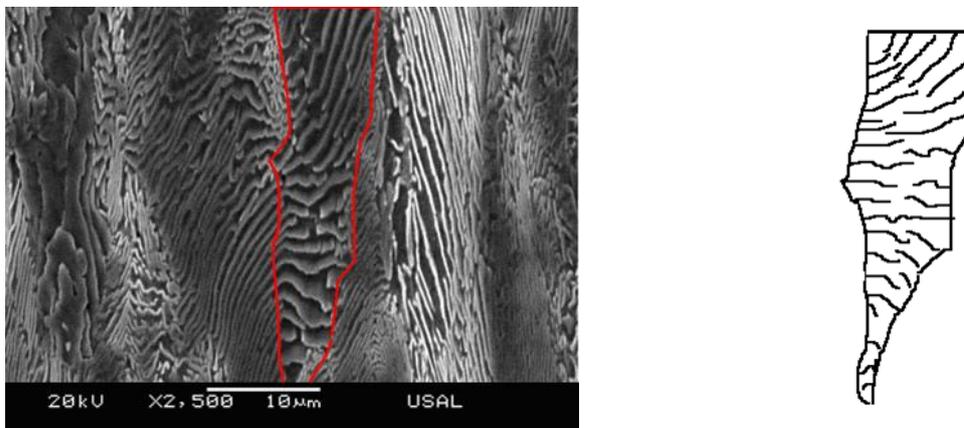


Fig. 2.28. Pseudocolonia perlítica con láminas de cementita fragmentadas.

En el análisis de la evolución de la morfología durante el proceso de trefilado se han encontrado algunas pseudocolonias que presentan morfologías como la correspondiente a la micrografía longitudinal del acero C5 (Fig. 2.29), en la cual una de las pseudocolonias se muestra como una geometría anómala en *forma de cuña* o de *raíz de diente*. Una de las teorías que pueden explicar la formación de esta geometría es la diferencia entre la resistencia y la rigidez que poseen las colonias adyacentes y su comportamiento al pasar a través de una hilera de trefilar. Como se puede observar en la Fig. 2.29 una de las colonias que rodean a la pseudocolonia (la que está orientada en la dirección del trefilado) opone más resistencia a la deformación longitudinal que las colonias laterales (comparativamente menos rígidas por causa de su orientación), actuando así como un obstáculo para la libre deformación longitudinal de dicha pseudocolonia, produciéndose de esta manera una geometría en la cual la colonia que opone una resistencia excepcional se encuentra rodeada por la nueva pseudocolonia de cuña.

La geometría de algunas pseudocolonias en forma de cuña no sólo es debida por la colonia de alta resistencia sino también por las colonias que rodean a la pseudocolonia lateralmente, las cuales ejercen tensiones sobre la pseudocolonia perlítica, haciendo que ésta tenga que adaptarse a la *colonia obstáculo*.

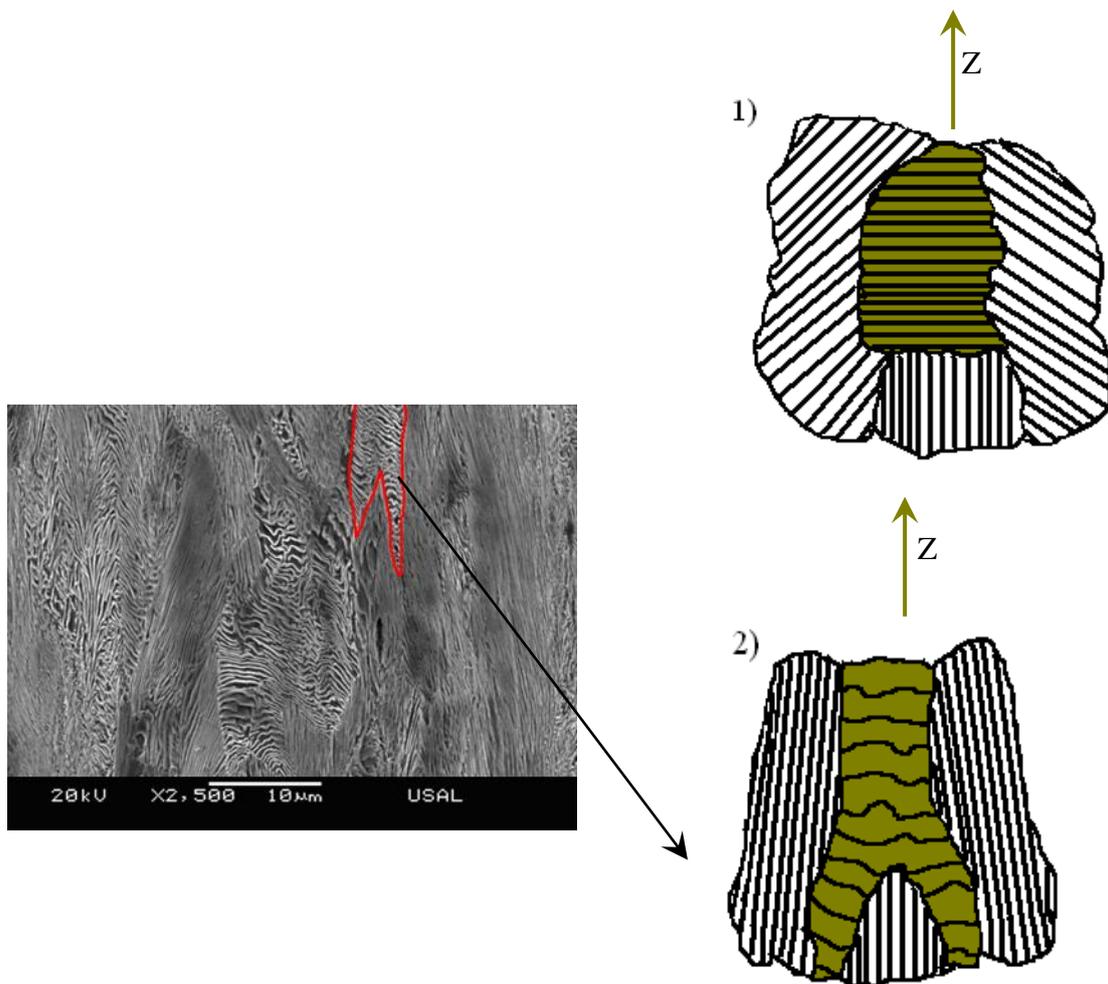


Fig. 2.29. Representación de la geometría de una pseudocolonia en forma de cuña.

Considerando la totalidad de las micrografías obtenidas se observa que la presencia de pseudocolonias es minoritaria en comparación con las colonias convencionales que presentan una orientación cada vez más cercana a la dirección de trefilado y un espaciado interlamilar cada vez menor. Como se puede observar en las secuencias de micrografías, desde el alambión inicial hasta el producto final, el espaciado interlamilar dentro de las pseudocolonias es cada vez mayor, al igual que se observa un aumento considerable de la esbeltez de los mismos. Para demostrar el incremento del espaciado interlamilar dentro de pseudocolonias se ha optado por cuantificarlo con el programa AnalySIS 3.1.

Las pseudocolonias se han definido como las colonias cuyas láminas no han sido capaces de orientarse a lo largo del proceso de trefilado. HULL y CLYNE (1996) han demostrado que, para el caso de materiales compuestos reforzados con fibras continuas y paralelas, el refuerzo tiende a orientarse hacia una dirección perpendicular a la carga aplicada cuando la orientación del refuerzo (fibras longitudinales) es mayor de 60° con respecto a la dirección de la carga externa aplicada sobre la lámina. En la presente Tesis se ha seguido este criterio a la hora de medir el espaciado interlaminar de las pseudocolonias perlíticas en los alambres correspondientes a las primeras etapas del proceso de trefilado: se consideran pseudocolonias perlíticas aquellas cuya orientación de láminas es mayor de 60° con respecto al eje longitudinal del alambre; a medida que el alambre pase por las distintas hileras de trefilar dicho ángulo irá incrementándose hasta aproximarse a la perpendicularidad.

Para la obtención del espaciado interlaminar de la perlita, S_0 , se ha seguido el método de intercepción lineal aleatoria (UNDERWOOD, 1995). Las medidas del espaciado interlaminar se han realizado utilizando micrografías pertenecientes a la sección longitudinal de la familia de aceros E a 2500 aumentos obtenidas con el MEB. Con esas mediciones se procedió a la obtención del espaciado interlaminar aparente y a la realización de las desviaciones estándar y de la media de los resultados de cada paso del proceso de trefilado. Los resultados obtenidos de las medias realizadas se muestran en la Tabla 2.6 donde se puede apreciar un aumento significativo del espaciado interlaminar con el grado de trefilado.

Tabla 2.6. Espaciado interlaminar aparente dentro de las pseudocolonias del acero E.

ACERO	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
S_0 (μm)	0.15	0.14	0.20	0.23	0.23	0.28	0.29	0.35

Una vez cuantificado el espaciado interlaminar de las pseudocolonias a lo largo del proceso de trefilado, se observa que el aumento del grado de trefilado de los distintos alambres va acompañado del aumento del espaciado interlaminar de éstas colonias especiales denominadas pseudocolonias perlíticas (Fig. 2.30).

Las pseudocolonias, por lo tanto, presentan un espaciado interlaminar anómalo en comparación con la tendencia del espaciado interlaminar general de las colonias a lo largo del trefilado. Por lo tanto, ambas tendencias son contrarias pudiéndose observar las curvas de aproximación, en sentido creciente, pseudocolonias, y decreciente, colonias (Fig. 2.31). Cabe destacar la intersección entre las dos curvas representadas, cuyo punto indica que para una deformación plástica acumulada próxima a 0.5 las pseudocolonias poseen un espaciado interlaminar semejante al del resto de las colonias que forman el alambre.

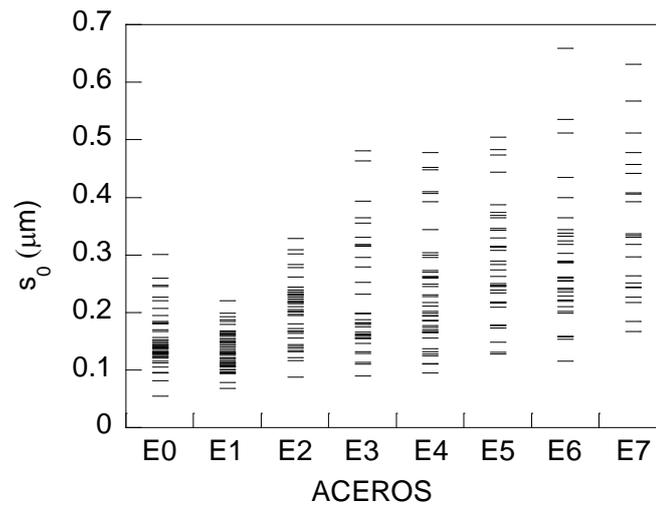


Fig. 2.30. Espaciado interlaminar aparente, y desviación estándar, de las pseudocolonias perlíticas en el acero tipo E.

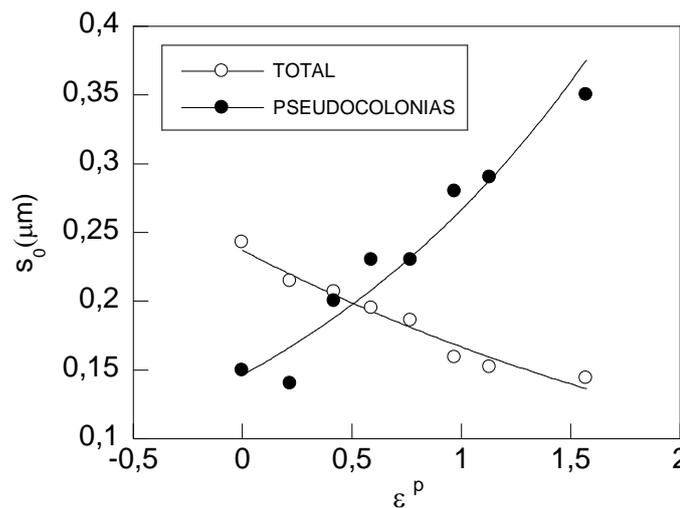


Fig. 2.31. Representación comparativa del espaciado ínterlaminar en las colonias y pseudocolonias perlíticas (acero tipo E).

La fractura de las posibles pseudocolonias se observa desde el tercer paso del proceso de trefilado. Los micro-daños en este tipo de colonias se deben a las curvaturas adquiridas por las láminas al ser sometidas a esfuerzos paralelos a ellas. La fractura de las pseudocolonias se produce perpendicular a las láminas que las forman y paralela a la dirección del trefilado.

Las láminas de cementita que conforman las pseudocolonias a lo largo del proceso de trefilado van a sufrir grandes curvaturas y finalmente se fragmentarán produciendo diferentes evoluciones de las mismas. Como se puede observar en la siguiente secuencia de micrográficas, Fig. 2.32, dichas láminas se muestran mucho más curvadas a medida que avanza

el grado de trefilado del alambre. Este efecto puede ser debido al fenómeno de disolución de la cementita, por un previo adelgazamiento de las láminas, o como consecuencia de soportar una mayor tensión circunferencial o por un compendio de ambas hipótesis anteriores.

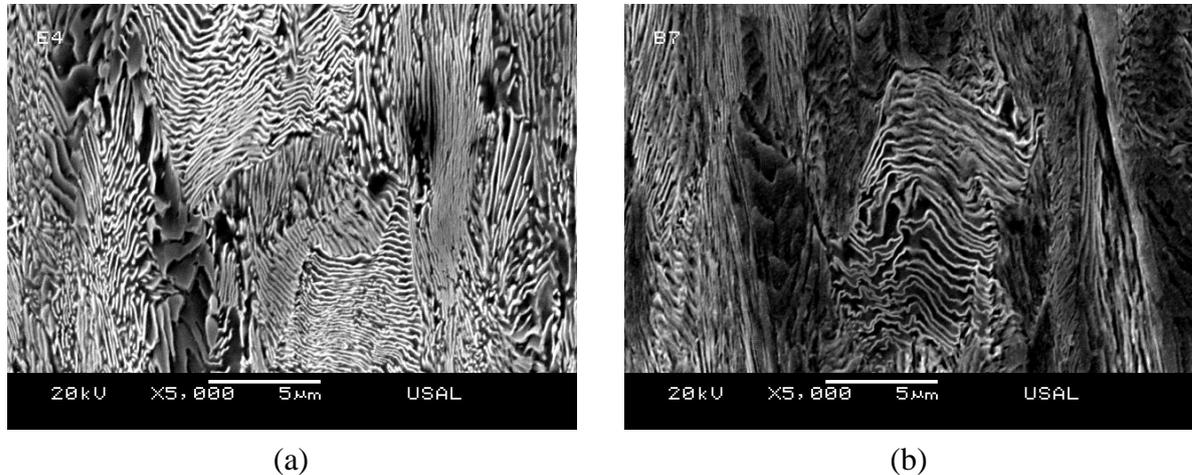


Fig. 2.32. Evolución de las láminas de cementita pertenecientes a las pseudocolonias.

Una vez observado el micro-daño que se produce por la fragmentación de las láminas que forman las pseudocolonias se han analizado como en los micro-daños anteriores la posible evolución de éstos a lo largo del trefilado.

La evolución de este micro-daño puede ser de la manera siguiente:

- ✓ Por constreñimiento de colonias vecinas, formando un entrelazado [Fig. 2.33 (a)].
- ✓ Se adapta la fractura a favor de la dirección del proceso de trefilado [Fig. 2.33 (b)].
- ✓ Las roturas de las láminas generan fragmentos que forman laberintos [Fig. 2.33 (c)].

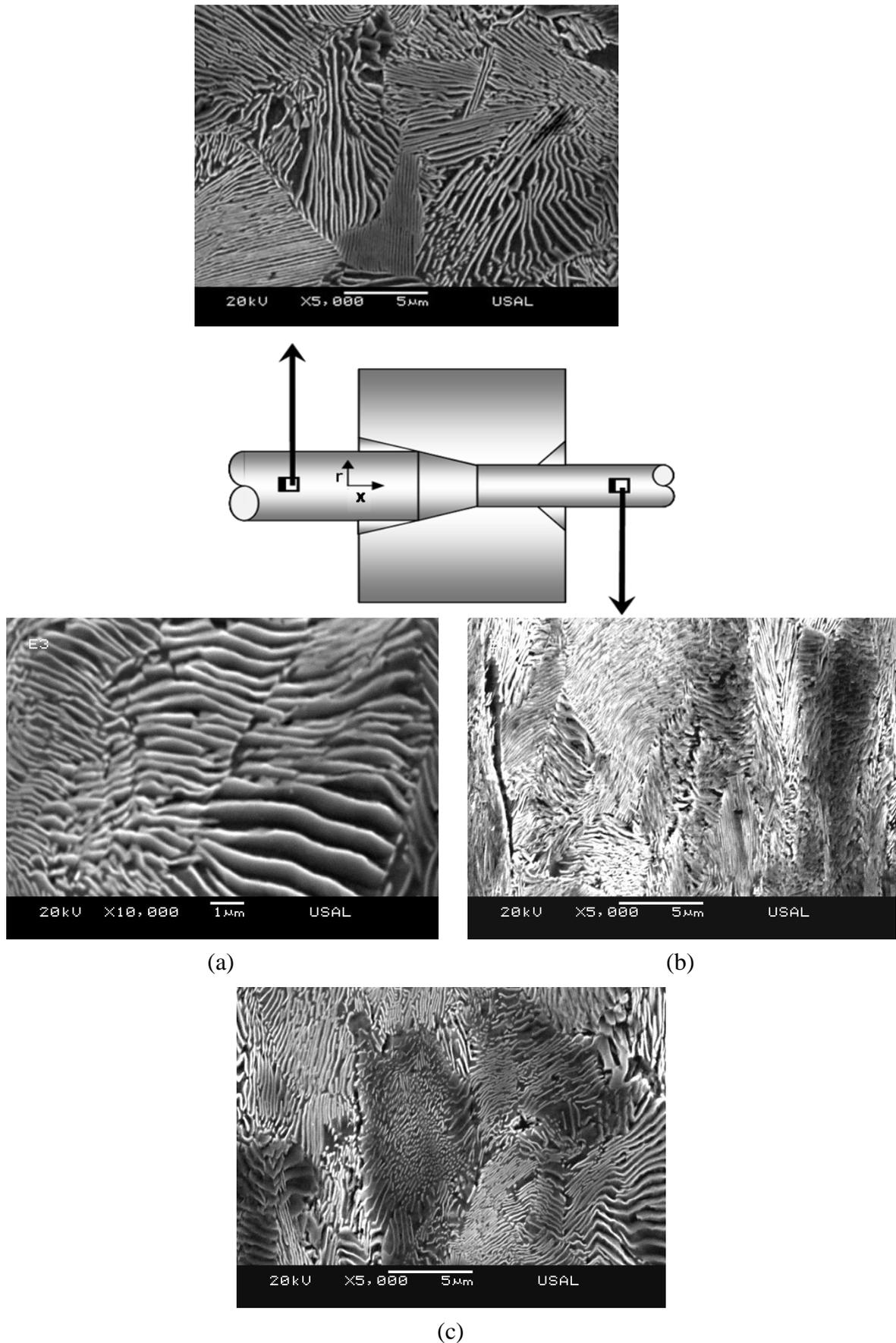


Fig. 2.33. Micro-daño generado en una pseudocolonia perlítica.

4.2.6. Desgarros intracoloniales

Los micro-daños intracoloniales, como su propio nombre indica, se producen dentro de las propias colonias perlíticas. Este micro-daño aparece en la mayoría de las micrografías como evolución de otros (a medida que el alambre de acero pasa por las diferentes hileras de trefilar) y queda definido como una discontinuidad producida por roturas de múltiples láminas de cementita en las cuales se produce un despegue de material, *i.e.*, en ésta discontinuidad creada se pueden observar fragmentos de las láminas afectadas. Este tipo de microdaño por desgarros intracoloniales se ha encontrado a partir del primer paso del proceso de trefilado; no obstante, en los primeros pasos del proceso se puede observar con una mayor claridad. Los desgarros aparecen precedidos por la *piel de leopardo*, las *garras de leopardo*, la *rotura por curvatura* y en casos excepcionales por la *micro-descolonización*, puesto que en éstas la mayoría de las veces no se muestra un despegue de material.

Los desgarros intracoloniales suelen ir asociados a desgarros intercoloniales debido a que el camino de progresión de este microdaño también se produce entre los límites de las colonias. El avance al igual que en el caso del microdaño de desgarro intercolonial refleja preferencias de avance en la progresión del mismo.

La observación de los microdaños de desgarro que se generan dentro de las colonias de perlita y a través de sus límites es casi siempre simultánea, puesto que el progreso de ambos va casi siempre ligado.

En la secuencia de micrografías que se muestra en la Fig. 2.34 se observan varios casos de microdaño generado por desgarre intracoloniales pertenecientes en este caso a los alambres de primeros pasos del proceso de trefilado, B1 y B2. Dichos alambres de los primeros pasos del proceso presentan este tipo de micro-daño en colonias cuyas láminas están ya orientadas en la dirección del proceso de trefilado y poseen un espaciado interlaminar muy fino, con lo cual la rigidez de dichas colonias es muy elevada y por lo tanto basta con avanzar solo un paso en el proceso de trefilado para que se genere dicho micro-daño.

Dentro de los desgarros intracoloniales se pueden observar láminas de cementita fragmentadas, con lo cual el micro-defecto genera una discontinuidad del material en la que los fragmentos de láminas de cementita quedan aislados de la matriz.

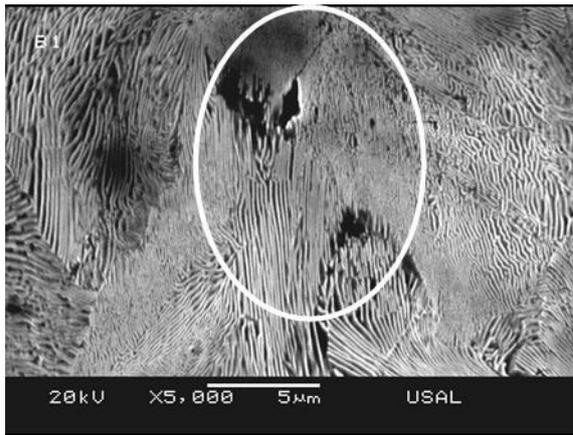
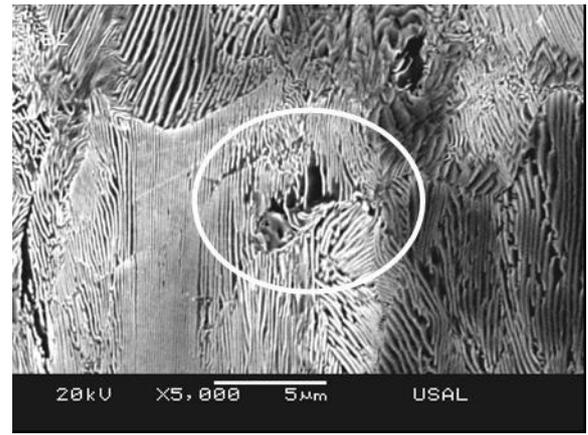
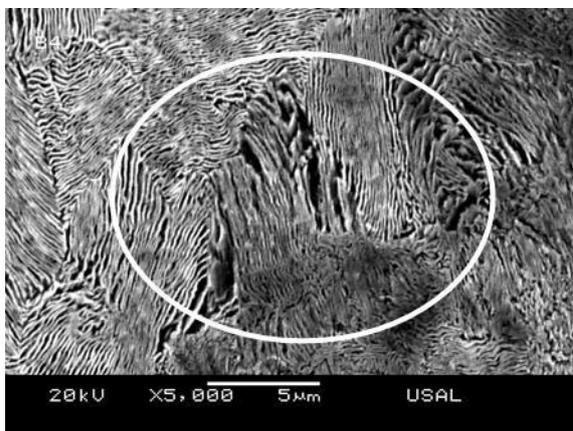
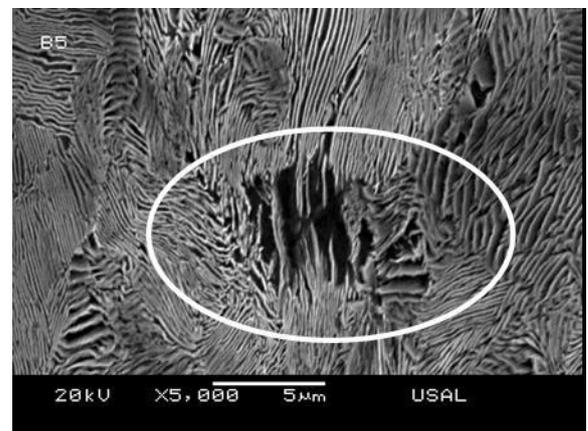
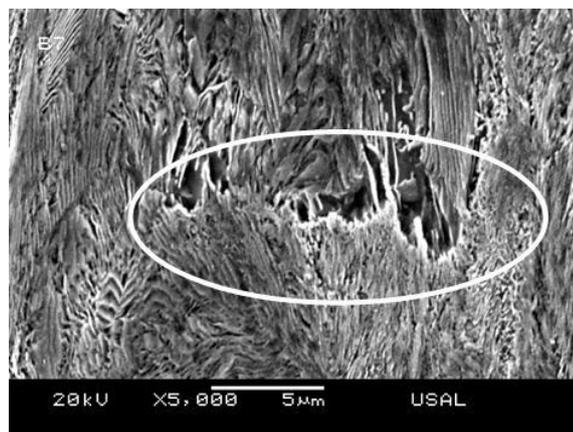
**B1****B2****B4****B5****B7**

Fig. 2.34. Micrografías pertenecientes a los diferentes pasos del proceso de trefilado en las que se muestra el micro-daño por desgarro.

4.3. Micro-defectos intercoloniales

Dentro del análisis visual de las micrografías también se observa un micro-defecto, producido como consecuencia del proceso de trefilado, que afecta a varias colonias. Dicho micro-defecto intercolonial surge como progresión de algunos de los micro-defectos intracoloniales estudiados anteriormente. Los desgarros intercoloniales se presentan en los últimos pasos del proceso de trefilado. La mayoría de estos micro-defectos aparecen a partir de un previo desgarrado intracoloniales que debido a las tensiones del proceso puede llegar a progresar a lo largo de micro-descolonizaciones, como se muestra en la Fig. 2.35 (a), o a través de pseudocolonias muy fragmentadas, como se puede observar en la Fig. 2.35 (b).

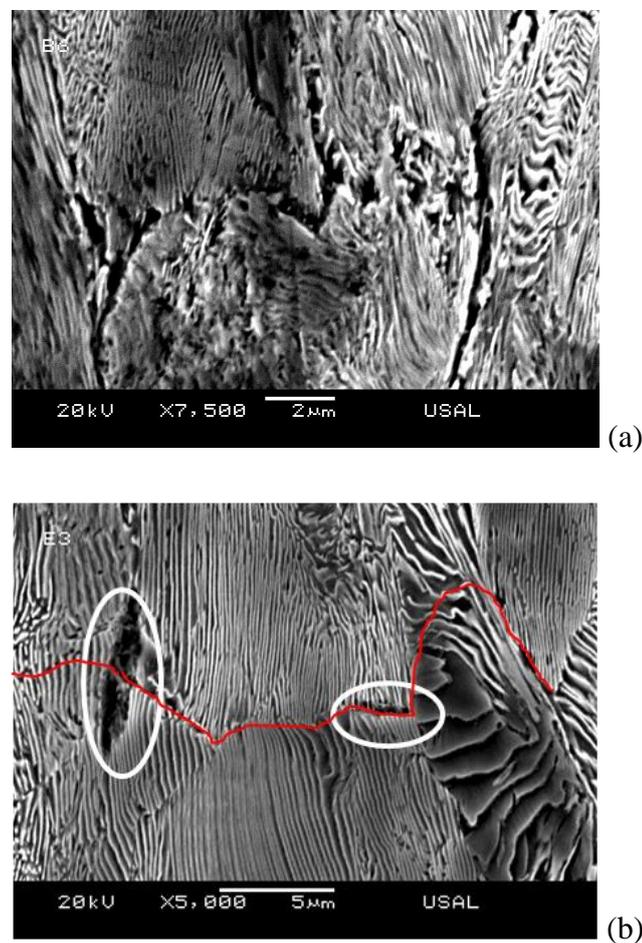


Fig. 2.35. Desgarros intercoloniales en las micrografías de los aceros; (a) B4 y (b) E3.

En la Fig. 2.36 se puede observar la progresión de este micro-daño a través de distintas colonias en micrografías pertenecientes al acero E3. Cabe destacar la dificultad de progresión del desgarrado intercolonial a través de colonias cuyas láminas se encuentran orientadas a favor de la dirección de trefilado. Por lo tanto, el avance del desgarrado se producirá de forma preferente a través de límites de colonias cuyas láminas posean direcciones distintas a la de trefilado, como por ejemplo a través de límites de pseudocolonias perlíticas.

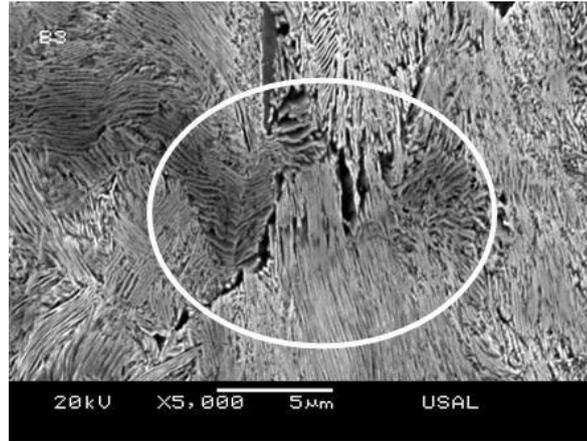


Fig. 2.36. Desgarro intercolonial, acero B3.

4.4. Micro-fisuras entorno a inclusiones

4.4.1. Clasificación de inclusiones y factor de forma

Para la identificación y posterior clasificación de las inclusiones presentes en el acero perlítico estudiado se han analizado los alambres pertenecientes a las familias B y E. Las inclusiones examinadas en los aceros objeto de estudio fueron analizadas mediante una unidad de análisis de energía de dispersión de rayos X (EDX) acoplada al MEB. Entre las inclusiones analizadas se han encontrado partículas de segunda fase o endógenas como MnS (aparición mate, con formas irregulares), SiO₂ (óxidos) y Al₂O₃ (aparición brillante y con formas más regulares).

El análisis realizado con el MEB detectó fundamentalmente estos tres tipos de partículas, aunque también se encontraron otras en menor proporción utilizadas para la formación de nuevas fases durante la solidificación del acero, a modo de agentes nucleantes. Principalmente los compuestos encontrados son: Ti₂O₃, silicatos de Mn (MnOSiO₂, MnSiO₃), silicatos de aluminio (SiO₂, AlO₃), TiN, V y Ca.

Los agentes nucleantes actúan solidificando a una temperatura generalmente inferior a los 1000°C, por lo que en el estado austenítico se encuentran en forma de pequeños sólidos.

Durante la transformación eutectoide (austenita-perlita) actúan como agentes nucleantes. Se produce entonces una nucleación heterogénea, que da lugar a un mecanismo de formación de colonias de perlita a partir de dichos agentes que actúan a modo de catalizadores que aceleran la reacción de transformación perlítica, pudiendo ser los responsables de la creación de la colonia de perlita colindante.

El Ti agregado a los aceros se emplea para la desoxidación de los mismos, suele formar inclusiones finas e inoculantes para favorecer la formación de ferrita intergranular durante la transformación de austenita-perlita. El nitrógeno favorece la transformación de nuevas fases, formando partículas de TiN. El calcio, añadido en forma de polvo de SiCa, reduce las partículas de MnS.

En los aceros estudiados las inclusiones encontradas se dividen en tres grupos a partir de su composición: el primer grupo son los sulfuros, el segundo está compuesto por los óxidos y el último por silicatos. Las inclusiones formadas por sulfuros soportan mucha deformación elasto-plástica, presentándose normalmente compuestos de sulfuros de manganeso.

Los óxidos que se presentan como inclusiones, al contrario que los sulfuros, no admiten deformación plástica, siendo éstos de naturaleza frágil y de gran dureza. Los silicatos se presentan en forma de compuestos muy complejos, y las características mecánicas suelen ser intermedias entre los óxidos y los sulfuros analizados anteriormente.

Los aceros estudiados (B y E), pertenecen a una cadena real de trefilado de siete hileras. Como consecuencia del propio proceso se ha producido la reducción del espaciado interlaminar y la orientación, además de la esbeltización, de las colonias de perlita a favor de la dirección de trefilado (TORIBIO y OVEJERO, 1997, 1998a, 1998b, 1998c). En el proceso de trefilado las inclusiones encontradas en los aceros también van a sufrir cambios debido a la gran deformación plástica adquirida por el alambre. Las inclusiones que se han analizado son sólo algunas de las presentes en los aceros objeto de estudio; sin embargo se pueden considerar como representativas de estos aceros, pues son las más comunes.

En las micrografías pertenecientes a el acero de la familia E, se observa una gran cantidad de inclusiones que no sólo superan en número a las del acero B, sino también en tamaño. Es lógico que existan diferencias entre la composición de las inclusiones en los dos aceros, puesto que ambos proceden de distintas coladas.

Dentro de los aceros estudiados se ha realizado el análisis de la composición de algunas de las inclusiones presentes, dando los resultados representados en los histogramas que acompañan a las micrografías en el intervalo de Figs. 2.37-2.44. En dichas figuras se puede observar el análisis químico de las inclusiones más representativas de todas las inclusiones analizadas. La composición de las mismas es muy variada y sobre todo compleja.

Varias de estas inclusiones están formadas por multitud de elementos químicos algunos de los cuales se encuentran en mayor porcentaje y determinan las características de las mismas.

La clasificación de las inclusiones presentes en este tipo de acero, por su composición química, se divide en óxidos, silicatos, carburos, sulfuros y nitruros; siendo los componentes del grupo de inclusiones de tipo duro: óxidos, nitruros y carburos, de tipo blando: sulfuros, y de tipo mezcla (inclusiones formadas por sulfuros que aparecen conjuntamente con óxidos).

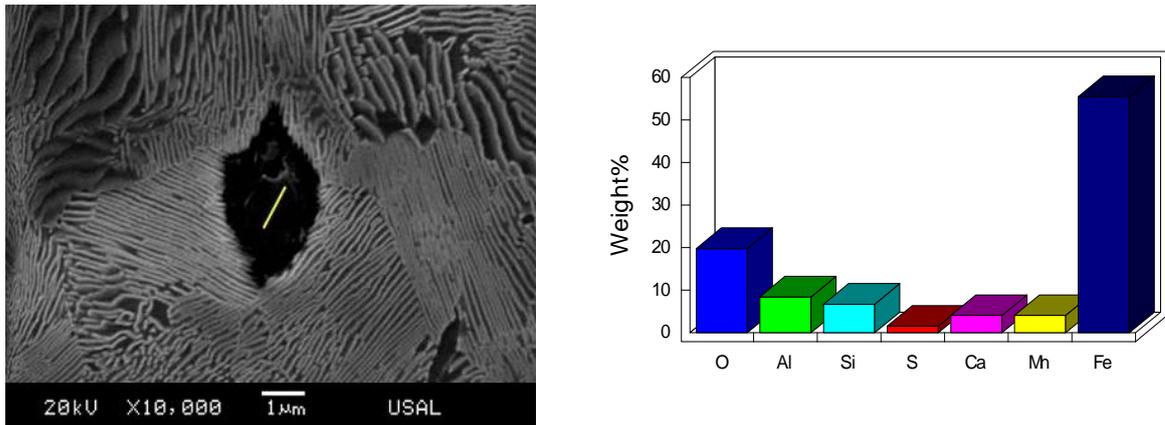


Fig. 2.37. Micrografía y composición química de una inclusión formada por un óxido complejo, presente en el acero E0.

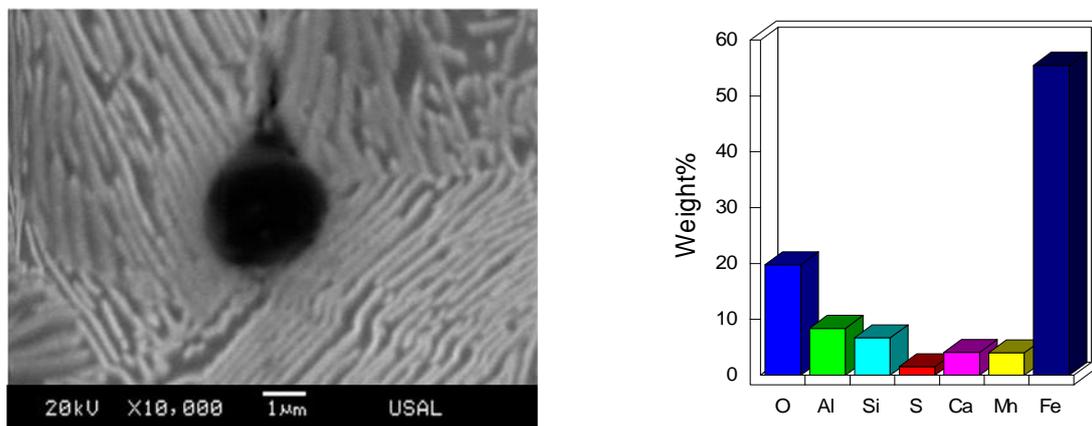


Fig. 2.38. Micrografía y composición química de una inclusión formada por un óxido complejo, presente en el acero B3.

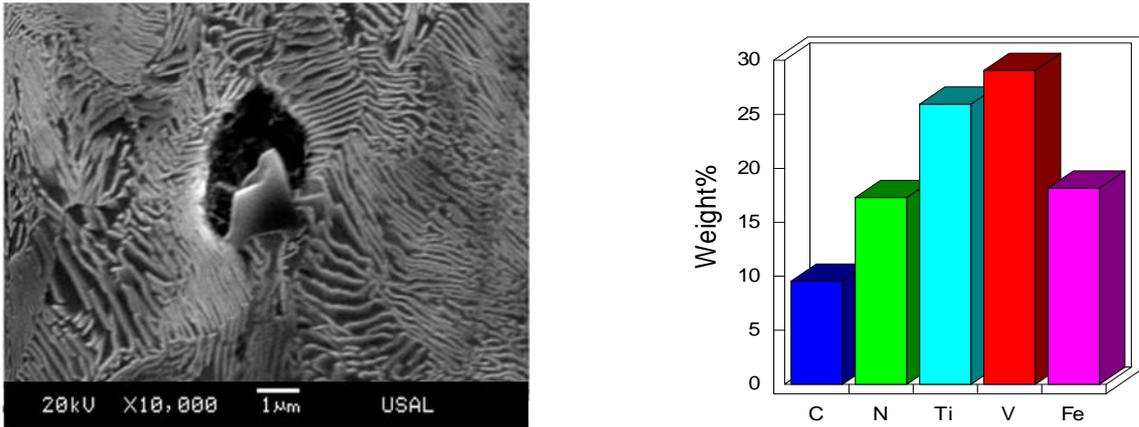


Fig. 2.39. Micrografía y composición química de una inclusión formada principalmente por carburos y nitruros de Ti, V y Fe, presente en el acero E3.

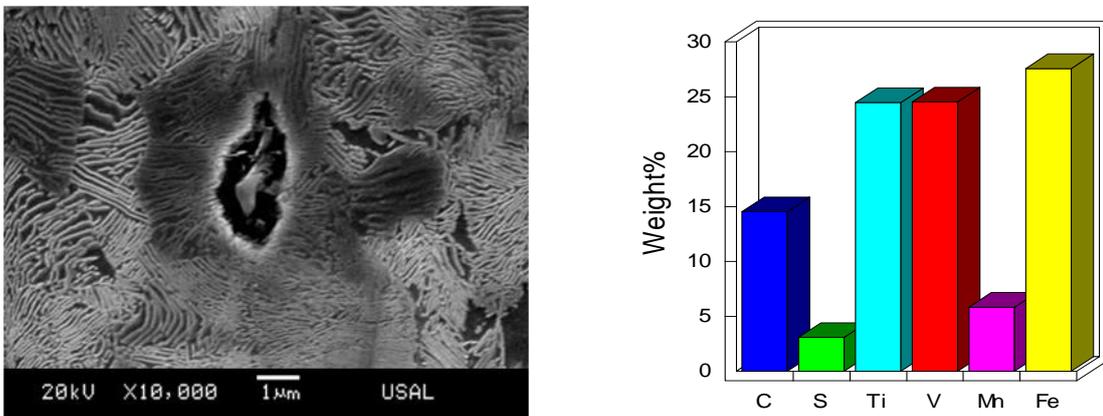


Fig. 2.40. Micrografía y composición química de una inclusión formada principalmente por carburos de Fe, V, Ti y MnS, acero E2.

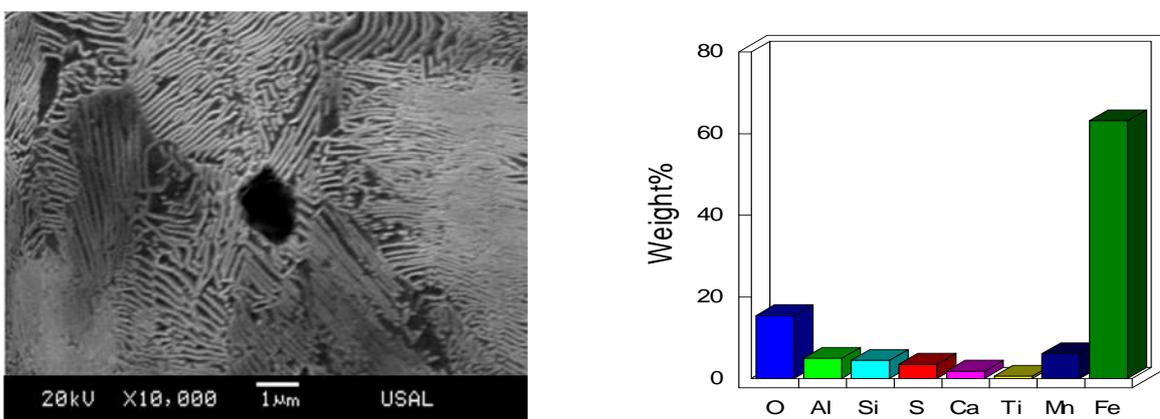


Fig. 2.41. Micrografía y composición química de una inclusión formada por un óxido complejo, presente en el acero B2.

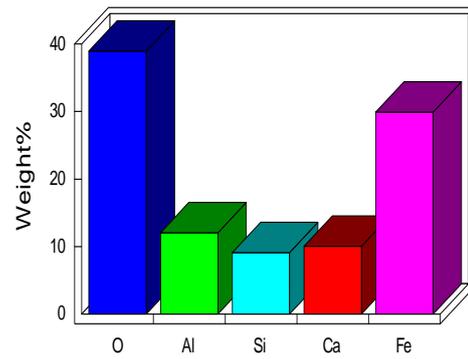
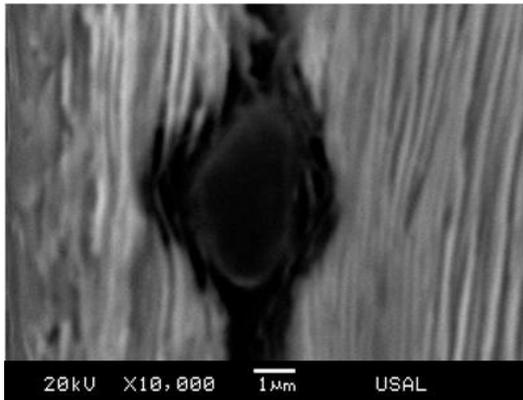


Fig. 2.42. Micrografía y composición química de una inclusión formada por un óxido complejo, presente en el acero E7.

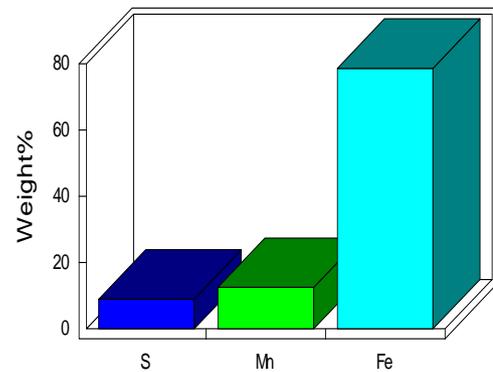
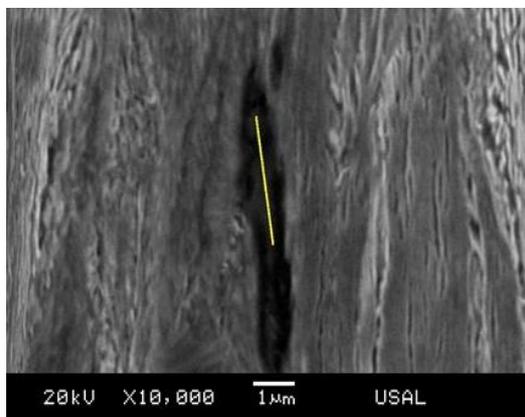


Fig. 2.43. Micrografía y composición química de una inclusión formada por Fe, S y Mn, presente en el acero B7.

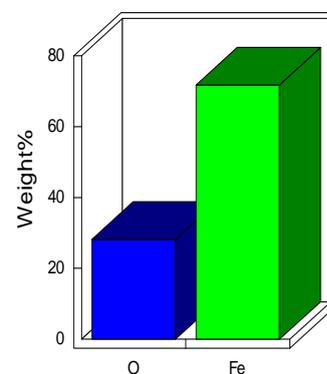
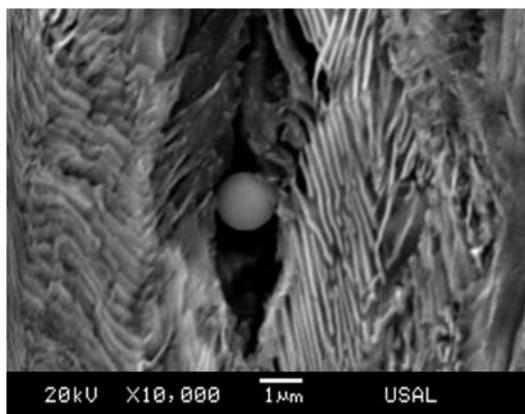


Fig. 2.44. Micrografía y composición química de una inclusión formada por óxido de Fe, presente en el acero E4.

La mayoría de las inclusiones analizadas están formadas principalmente por óxidos y sulfuros. La variación de los elementos en los compuestos regulará tanto las características como el comportamiento mecánico de la inclusión. El análisis del MEB no determina con exactitud la composición estequiométrica del compuesto que forman las inclusiones (análisis cuantitativo), sin embargo si permite identificar los elementos que la forman (análisis cualitativo) proporcionando además una información aproximada del porcentaje de cada elemento que compone la inclusión analizada.

Los óxidos, sulfuros y carburos presentes en estos aceros están acompañados por elementos comunes de los aceros como son Ca, Mn, Ti, Al y V. Cada elemento contribuye de una manera determinada a las características mecánicas del acero.

En cuanto al factor de forma, el análisis de las inclusiones se ha realizado mediante el programa de AnalySIS 3.1. Para tal fin se han utilizado micrografías pertenecientes a los distintos aceros estudiados, alambroón inicial (E0), segundo (E2), cuarto (E4), sexto (E6) y último paso del proceso, alambre pretensado comercial (E7).

De los diferentes pasos seleccionados del trefilado se han obtenido micrografías que presentan inclusiones. En el estudio de los dos aceros B y E, se ha determinado la gran cantidad de inclusiones que presentan las muestras analizadas pertenecientes a los alambres de la familia E, al contrario que sucede en los alambres examinados de la familia B en los cuales se puede observar un número muy reducido de inclusiones. Una vez observado este hecho, en varias pruebas, se ha decidido analizar el factor de forma de las inclusiones que se encuentran en los alambres pertenecientes a la familia E, pues aportan un mayor tamaño de muestra en el estudio estadístico de resultados. Para el estudio del factor de forma de las inclusiones a lo largo del proceso se ha aproximado la morfología de la inclusión a una elipse de tal forma que en las inclusiones se ha medido el eje mayor ($2a$) de las mismas, paralelo a la dirección de trefilado, representado en la Fig. 2.45. Una vez medido dicho eje de la elipse en las distintas micrografías se ha tomado la medida de la superficie de la inclusión. Con dicha superficie y la medida del eje mayor de la elipse, $2a$, se obtiene el eje menor utilizando la siguiente ecuación:

$$S = \pi \cdot a \cdot b \quad (2.1)$$

siendo a y b los semiejes de la elipse y S la superficie de la inclusión o, en el caso de no coincidir, de la inclusión y del hueco generado por la misma. La S se podría denominar superficie del defecto de la inclusión. Una vez obtenidos estos datos se procede a realizar la media y la desviación típica para cada uno de los pasos del proceso de trefilado estudiados.

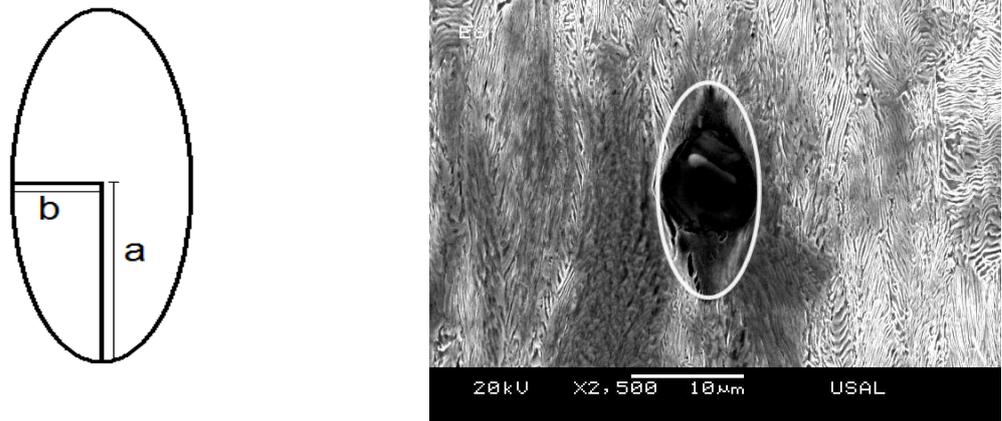


Fig. 2.45. Morfología de la elipse utilizada para determinar el factor de forma.

Las inclusiones elegidas se han dividido en tres grupos según su resistencia en comparación con la matriz perlítica circundante. El primer tipo corresponde a las inclusiones duras (normalmente grupo formado por óxidos y por carburos), con mayor resistencia que la matriz perlítica, el segundo a las inclusiones blandas (sulfuros) y el tercer tipo a las inclusiones mezcla (inclusiones con óxidos y sulfuros bien definidos), con comportamiento intermedio. Algunas de las inclusiones analizadas no se han podido clasificar debido a que su composición y morfología no era del todo clara. El método seguido para la clasificación se ha basado en estudios previos de inclusiones en estos aceros perlíticos (AYASO, GÓNZALEZ y TORIBIO, 2006).

En las inclusiones que muestran una descohesión de la matriz perlítica se ha medido la superficie de la micro-fisura generada junto con la de la propia inclusión (S). En aquellas inclusiones en las que no se ha descohesionado la matriz perlítica se ha medido únicamente la superficie de las mismas.

La media aritmética de las medidas del factor de forma de las distintas inclusiones se detalla a continuación en la Tabla 2.7, en la cual se han distinguido los distintos tipos de inclusión y las medidas correspondientes a los diferentes pasos del proceso de trefilado.

Tabla 2.7. Media aritmética de las medidas del factor de forma (S) de las inclusiones.

ACERO	DURAS	BLANDAS	MEZCLA
E0	1.37	3.28	2.32
E2	1.82	5.96	6.95
E4	1.96	7.03	7.01
E6	2.85	9.12	7.22
E7	3.06	11.76	17.87

Para poder dilucidar los cambios en la morfología de las inclusiones se han representado los datos en gráficos en los cuales queda representado no sólo la media aritmética sino también la desviación típica.

Para un buen análisis de los datos los distintos tipos de inclusiones (inclusiones duras, blandas y del tipo mezcla) se han representado por éstas por separado, pues no tiene sentido la representación total de las mismas debido al diferente comportamiento que presentan éstas frente al proceso de conformación del material en frío (trefilado). En las siguiente Fig. 2.46 se muestran los cambios del factor de forma sufridos por las inclusiones, pertenecientes al grupo de los óxidos, a lo largo del trefilado, en ella se observa un ligero aumento de la esbeltez de las inclusiones a lo largo del proceso de trefilado, si bien también se puede notar un aumento claro, acompañado de una gran dispersión en los datos, para el alambre previo al producto final (acero de pretensado).

De igual forma se puede observar en la Fig. 2.47 la variación del factor de forma de las inclusiones denominadas blandas las cuales son más esbeltas cuanto mayor es el grado de trefilado, aunque dicho aumento es considerablemente más grande, de forma cuantitativa, que el observado en las inclusiones duras.

Al analizar y representar los datos de las inclusiones denominadas mezcla, Fig. 2.48, no se ha obtenido una tendencia clara, quizás por la singularidad del caso, puesto que es la mezcla de dos inclusiones con comportamientos mecánicos distintos. La falta de una tendencia en la representación de dichas inclusiones era previsible puesto que incluso se puede producir, aunque observado en raras ocasiones, una descohesión entre ambas.

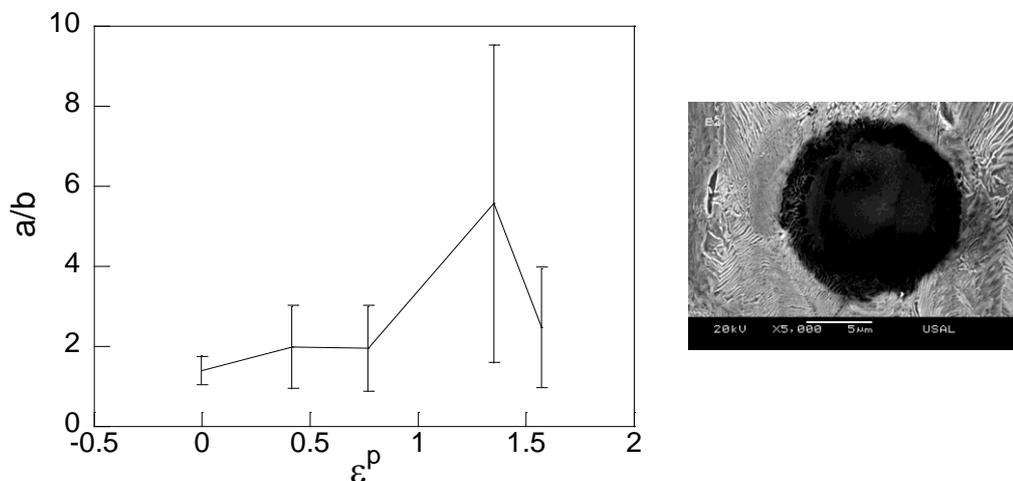


Fig. 2.46. Evolución del factor de forma para inclusiones duras con el trefilado.

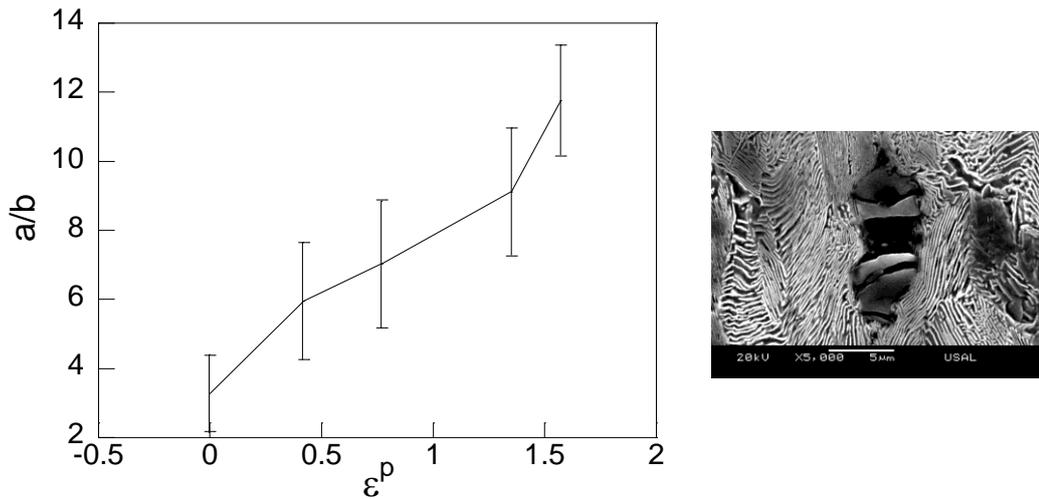


Fig. 2.47. Evolución del factor de forma con el trefilado para inclusiones blandas.

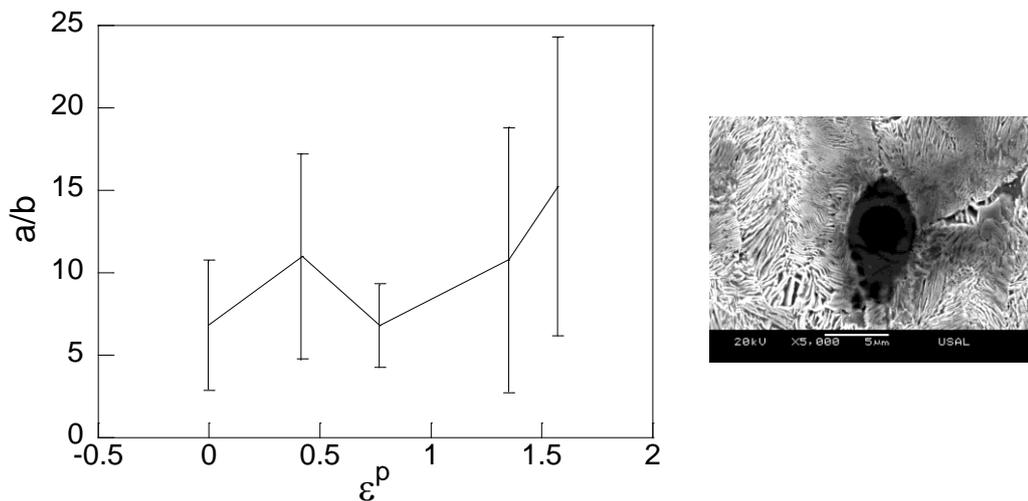


Fig. 2.48. Evolución del factor de forma con el trefilado para inclusiones mezcla.

En la Fig. 2.49 se representa la comparativa de la media de los valores del factor de forma de los microdefectos generados por las inclusiones a lo largo del proceso de trefilado para los tres tipos de inclusiones analizadas. En dicha figura se han representado las medias de los factores de forma de los tres tipos de microdefectos objeto de estudio; microdefectos generados por inclusiones de tipo duro (MD), aquellos provocados por inclusiones de tipo blando (MB) y finalmente los producidos por las inclusiones de tipo mezcla (MM). Las tendencias de los factores de forma representados evidencian las deformaciones sufridas por los distintos tipos de inclusiones encontradas a lo largo del proceso así como la influencia de la composición de las mismas en dichas deformaciones. Cada uno de los distintos tipos de inclusiones tendrá un comportamiento mecánico distinto, aunque la tendencia general marcada en ambos tipos sea a un aumento de esbeltez de la inclusión, o bien de la microfisura que genera a su alrededor, a favor de la dirección del proceso de trefilado. Si se tiene en

cuenta la desviación que se produce en las medidas pertenecientes al alambre correspondiente al sexto paso del proceso de trefilado, Fig. 2.49, se puede observar una tendencia clara del aumento del factor de forma. No obstante, el aumento de esbeltez de las inclusiones y las micro-fisuras que se generan durante el proceso de trefilado ya se había evidenciado de forma visual, hecho que reafirma la hipótesis.

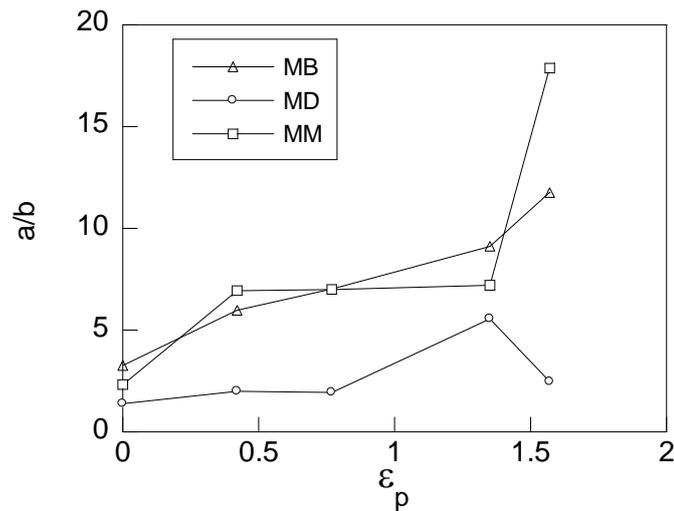


Fig. 2.49. Evolución de la media del factor de forma factor (S) de los microdefectos generados por los tres tipos de inclusiones analizadas.

4.4.2. Evolución de las inclusiones a lo largo del proceso de trefilado

En este apartado se describen los comportamientos generales de las inclusiones las cuales en su mayoría poseen propiedades mecánicas diferentes a las de la matriz metálica que las envuelve, en este caso las colonias de perlita. En el proceso de trefilado la matriz perlítica tiende a desprenderse de la inclusión, creándose entre ambas una interfase debida a la diferencia de deformaciones. Esta interfase producida por la descohesión entre la inclusión y la matriz perlítica (IDIM) se produce a lo largo del proceso de trefilado debido a la gran deformación plástica sufrida por el acero.

A partir del análisis micrográfico se puede diferenciar entre dos tipos de partículas, la primera generada por inclusiones de tipo duro en la cual la matriz perlítica soporta una mayor deformación y el segundo tipo la generada por inclusiones blandas y mezcla en la cual tanto la matriz perlítica como la inclusión sufren deformaciones semejantes. Cada inclusión y la IDIM generada por la misma forman discontinuidades dentro de la matriz perlítica, a modo de microfisuras, discontinuidades las cuales actúan de cómo concentradoras de tensiones.

Como norma general las micro-fisuras, generadas por las inclusiones, son cada vez más esbeltas a medida que avanza el proceso de trefilado, como se puede observar en la secuencia de micrografías de la Fig. 2.50. La mayoría de las inclusiones blandas se muestran cada vez más fracturadas a lo largo del proceso de trefilado, en algunas de éstas se puede ver la inclusión fracturada y orientada en la dirección de trefilado, Fig. 2.50 acero E4.

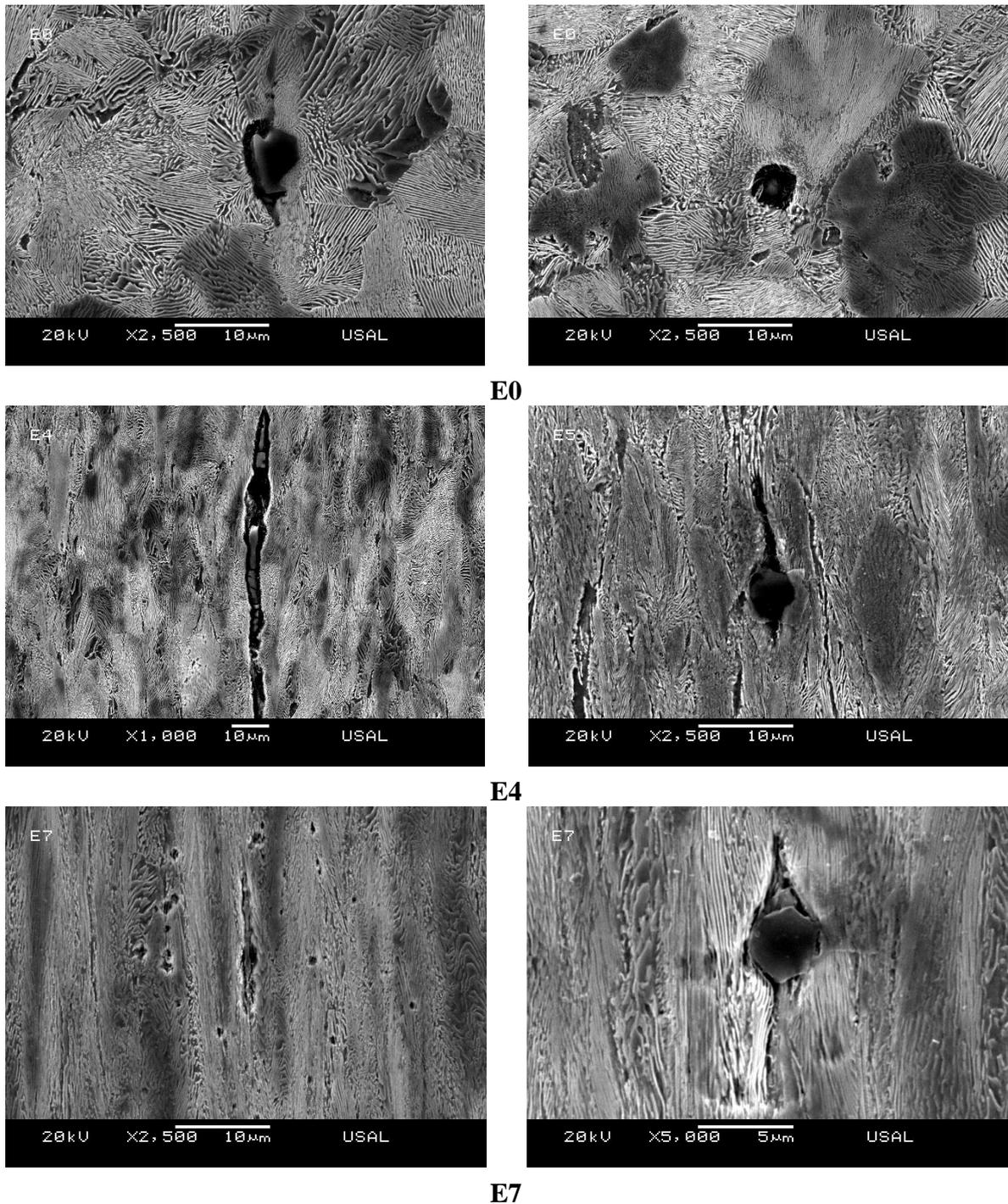


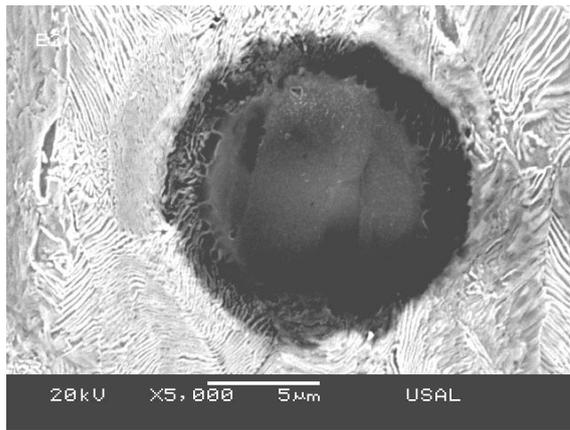
Fig. 2.50. Secuencia de micrografías del acero E en las cuales se presenta la evolución de las inclusiones a lo largo del proceso de trefilado.

En los aceros perlíticos objeto de estudio, B y E, se han observado gran cantidad de inclusiones, estas se dividen, como se comentó en el apartado 4.4.1, según sea su composición química, origen y tamaño. Las inclusiones duras a lo largo del proceso de trefilado no son capaces de asumir la misma deformación plástica que la matriz perlítica que las rodea. La diferencia de comportamiento mecánico entre la matriz perlítica y la inclusión provocará una descohesión de la matriz, generándose huecos o también denominados microcavidades alrededor de la misma (ATKINSON y SHIN, 2003). A medida que avanza el proceso de trefilado estos huecos tenderán a deformarse en la dirección del proceso. Sin embargo el constreñimiento sufrido por las colonias vecinas será la causa de un posible *cierre* del mismo.

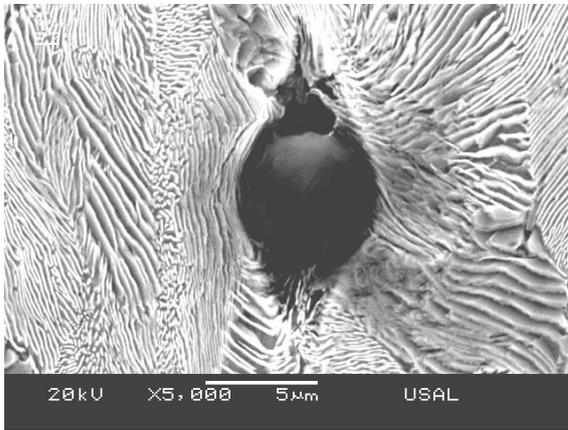
Las microcavidades generadas provocan una discontinuidad en el material que posteriormente influirá en la fractura del mismo, son zonas en las cuales se van a concentrar las tensiones. Los óxidos, carburos y nitruros forman parte de las inclusiones que generan dichos efectos. La IDIM producida por las inclusiones de tipo duro está rodeada de una matriz con menor apelmazamiento.

Por otra parte las inclusiones blandas, las cuales son capaces de deformarse plásticamente en mayor cuantía que la matriz perlítica, evolucionan a lo largo del proceso de trefilado deformándose a favor de la dirección de dicho proceso. Este tipo de inclusiones, una vez deformadas, tienden a fragmentarse generando oquedades que simultáneamente serán rellenadas por la matriz perlítica circundante. El sulfuro de manganeso es uno de los compuestos más representativos de estas inclusiones. La mayoría de las inclusiones generará micro-daños de mayor entidad cuanto mayor sea el tamaño de dicha inclusión. La IDIM generada por las inclusiones de tipo blando está rodeada por una matriz perlítica con un gran apelmazamiento, siendo la misma de un tamaño inferior al generado por otras inclusiones.

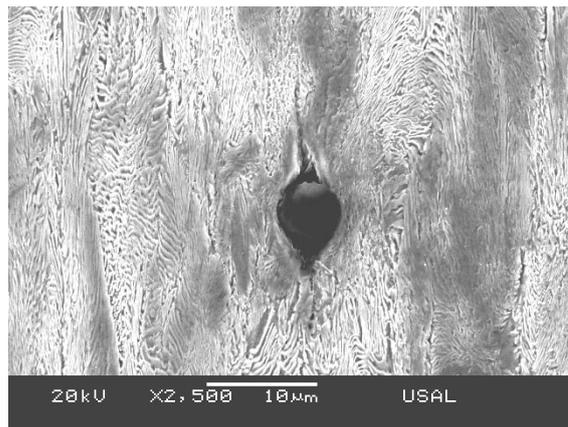
En los siguientes esquemas de los diferentes tipos de inclusiones propuestos, se muestra la posible evolución de los micro-daños generados por las mismas durante el proceso de trefilado. Se puede observar, independientemente de las propiedades mecánicas de las inclusiones, el cómo se generan micro-cavidades que serán o no rellenadas posteriormente por la matriz perlítica circundante. Así mismo se muestra la posible evolución de algunas de las inclusiones que poseen mayor dureza que la matriz perlítica (Fig. 2.51). Se puede observar cómo a medida que se avanza en el proceso de trefilado la matriz perlítica circundante se despega de la inclusión generando microcavidades, comentadas anteriormente, a ambos lados de la inclusión. Las microcavidades van a estar orientadas en la dirección del proceso de trefilado, evidenciando que son consecuencia del mismo.



(a)



(b)



(c)

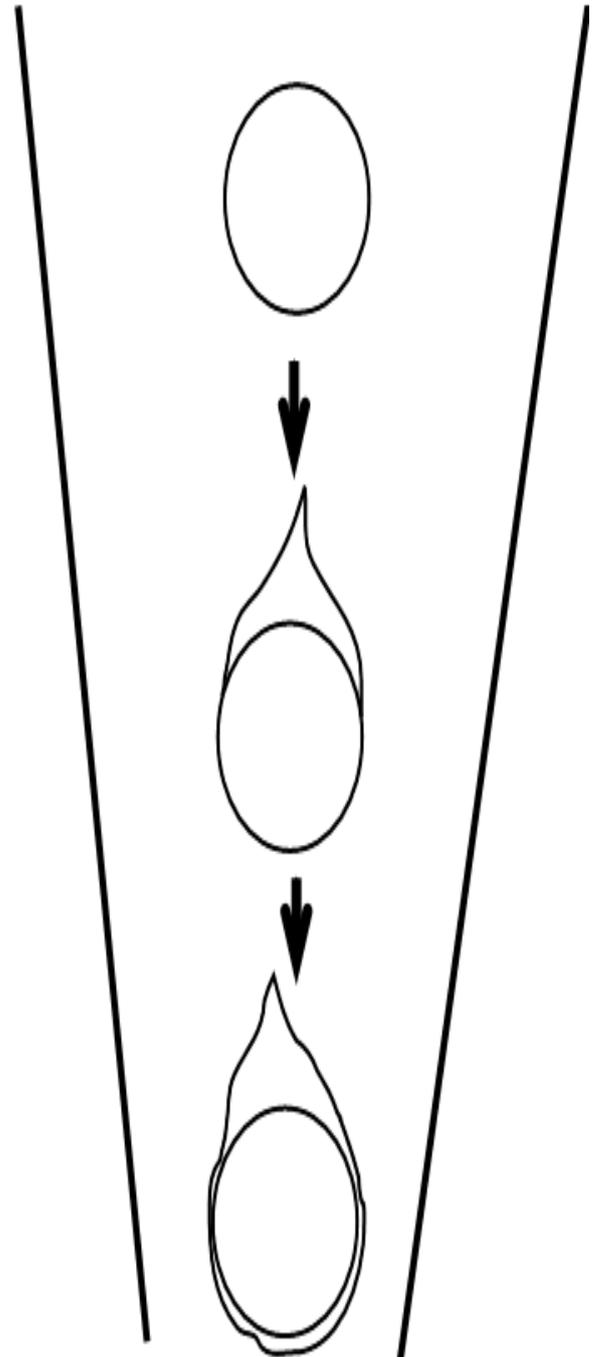


Fig. 2.51. Micrografías y esquema de la evolución de las inclusiones *duras* durante el proceso de trefilado; (a) E2, (b) E4 y (c) E7.

De forma similar las inclusiones blandas, que son capaces de deformarse asumiendo la deformación impuesta por la matriz perlítica circundante, evolucionarán a lo largo del proceso de trefilado llegando a fragmentarse y generando microcavidades de menor tamaño que las anteriores. Este tipo de microcavidades que se generan alrededor de la inclusión y entre los fragmentos de la misma estarán orientadas en la dirección del proceso de trefilado (Fig. 2.52). La inclusión puede mostrarse totalmente fragmentada, generando una microcavidad que no sólo englobara la inclusión y su posible separación con la matriz perlítica sino también los espacios generados por dichos fragmentos.

Las microcavidades se han observado en los alambres fuertemente trefilados (últimos etapas del proceso del trefilado). No obstante en los primeros pasos del proceso de trefilado, alambres de acero perlítico débilmente trefilados, aparecen algunas microcavidades pero de menor entidad puesto que la matriz apenas se ha despegado de la inclusión.

A lo largo del proceso de trefilado se han observado las inclusiones que son capaces de generar micro-defectos, entendiéndose por tales defectos la totalidad de la inclusión con las microfisuras generadas a su alrededor durante el proceso.

Las micro-fisuras generadas durante el trefilado están formadas por material apelmazado sobre la inclusión en dirección perpendicular al trefilado y por oquedades generadas por el despegue de material en la dirección del proceso. Debido a esta diferencia de deformación dentro de la microfisura, las zonas más debilitadas de la misma se producen en la misma dirección que el trefilado.

Como se ha comentado con anterioridad tanto la inclusión como el micro-defecto generado por la misma tiende, a lo largo del trefilado, a mostrar un aumento de su esbeltez a favor del eje longitudinal del alambre. Este hecho sumado a la menor resistencia de algunas zonas de la microfisura hace prever que una de las posibilidades del avance de la fractura a través de este microdefecto se produciría de forma paralela al eje del proceso de trefilado.

Las morfologías del conjunto IDIM y las inclusiones que las producen, presentan un aspecto más alargado a favor de la dirección del proceso de trefilado, como se ha cuantificado anteriormente. Cuando la inclusión precursora del defecto es de tipo duro la esbeltez del defecto generada es menor, mientras que si la inclusión previa es de tipo blando, debido a sus características mecánicas, el micro-defecto generado tiene una mayor esbeltez a favor de la dirección del proceso de trefilado.

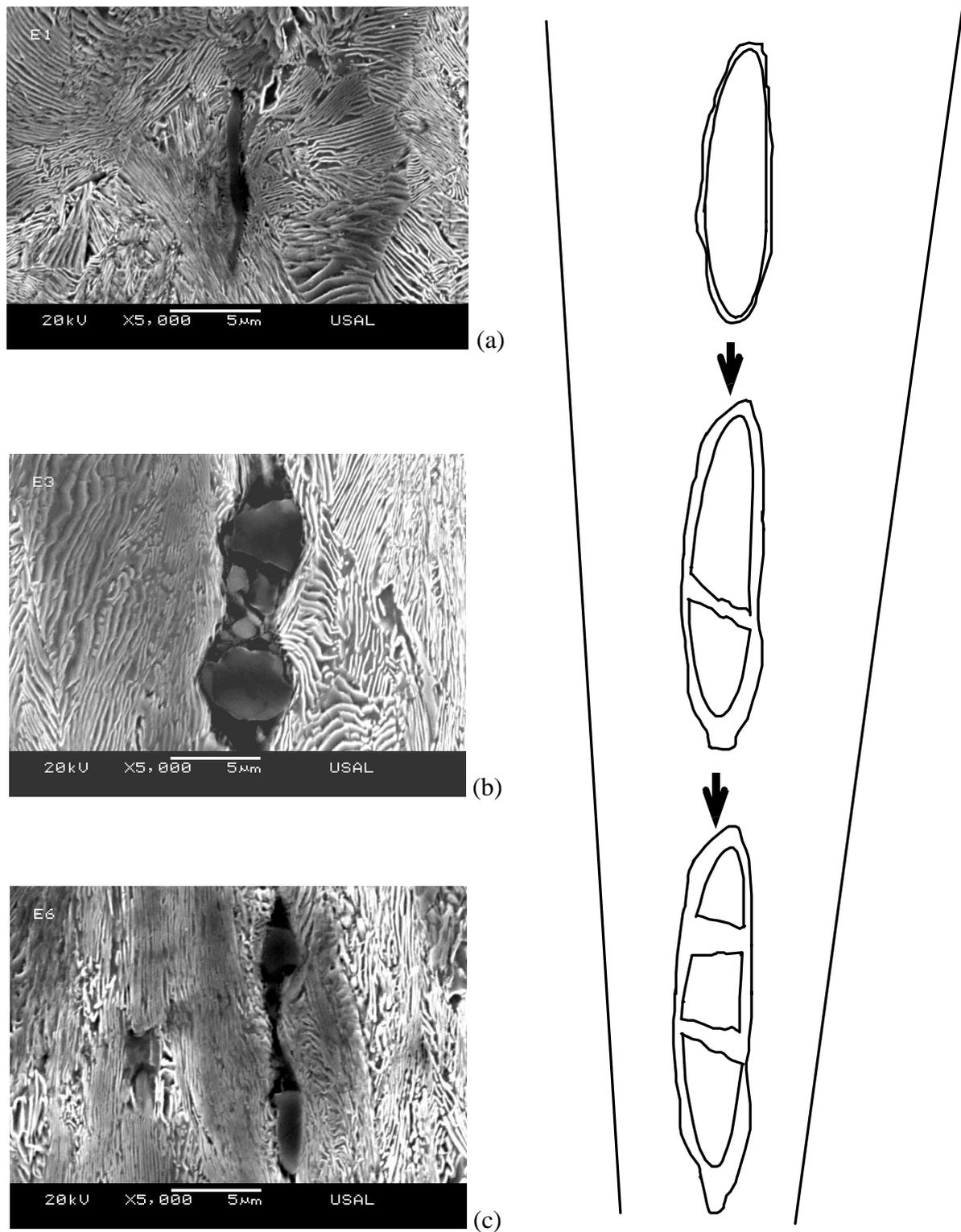


Fig. 2.52. Micrografías y esquema de la evolución de las inclusiones *blandas* durante el proceso de trefilado; (a) E1, (b) E3 y (c) E7.

Las inclusiones de tipo mezcla van a tener un comportamiento muy semejante a las de tipo blandas, puesto que el contacto con la matriz perlítica es el mismo. La creación de un micro-defecto a partir de este tipo de inclusión posee una esbeltez semejante al del defecto generado por una inclusión de tipo blando. Teniendo en cuenta que la anchura de este micro-defecto será mayor que la generada por una de tipo blando, puesto que la inclusión de tipo duro dentro de las inclusiones tipo mezcla, a lo largo del proceso de trefilado, apenas se deforman. Las inclusiones de tipo duro se han observado en las inclusiones de tipo mezcla en el centro de éstas, estando rodeadas por inclusiones de tipo blando.

Las inclusiones denominadas mezcla, como se comentó anteriormente, están formadas por varias inclusiones. Se diferencian claramente por la tonalidad y forma, presentándose las inclusiones más duras más oscuras y con morfologías más redondeadas. Se han observado multitud de inclusiones de tipo mezcla en los aceros estudiados. La gran cantidad de estas inclusiones ha hecho posible poder llegar a establecer unas pautas de comportamiento durante el proceso de trefilado. En el siguiente esquema acompañado con las micrográficas correspondientes [Fig. 2.53 (a)], se muestra como la inclusión más dura aparece en las zonas centrales de la inclusión mezcla mientras la periferia de la misma está formada una de inclusión más blanda.

La parte de la inclusión mezcla de tipo blando en los primeros pasos del proceso de trefilado tenderá a deformarse en la dirección del proceso de trefilado. A medida que avanza dicho proceso la parte blanda de la inclusión se fragmentará formando microcavidades entre los distintos fragmentos de la misma. Cabe destacar el comportamiento de la inclusión blanda alrededor de la parte dura, la cual no se descohesiona, quedando ambas unidas al final del proceso de trefilado. Una vez fragmentada la parte de la inclusión blanda se produce, debido al constreñimiento de las colonias, el relleno de las microcavidades. Este relleno deja aislados los fragmentos de la inclusión mostrándose en las micrográficas como inclusiones independientes. La separación entre los fragmentos aunque rellena de matriz perlítica seguirá teniendo menor resistencia que el resto del material, definiéndose como lugares débiles dentro del acero. Como resultado final del proceso, las inclusiones mezcla generan discontinuidades dentro de la matriz perlítica puesto que el relleno no es estrictamente completo.

La mayoría de las inclusiones encontradas en los aceros objeto de estudio producen un micro-daño cuya magnitud dependerá fundamentalmente del tamaño de la inclusión a partir de la cual se origina y de la composición de la misma. Así las inclusiones duras son las que mayores microcavidades generan. Por el contrario, las inclusiones blandas generan microcavidades que se rellenan de forma casi simultánea a su formación.

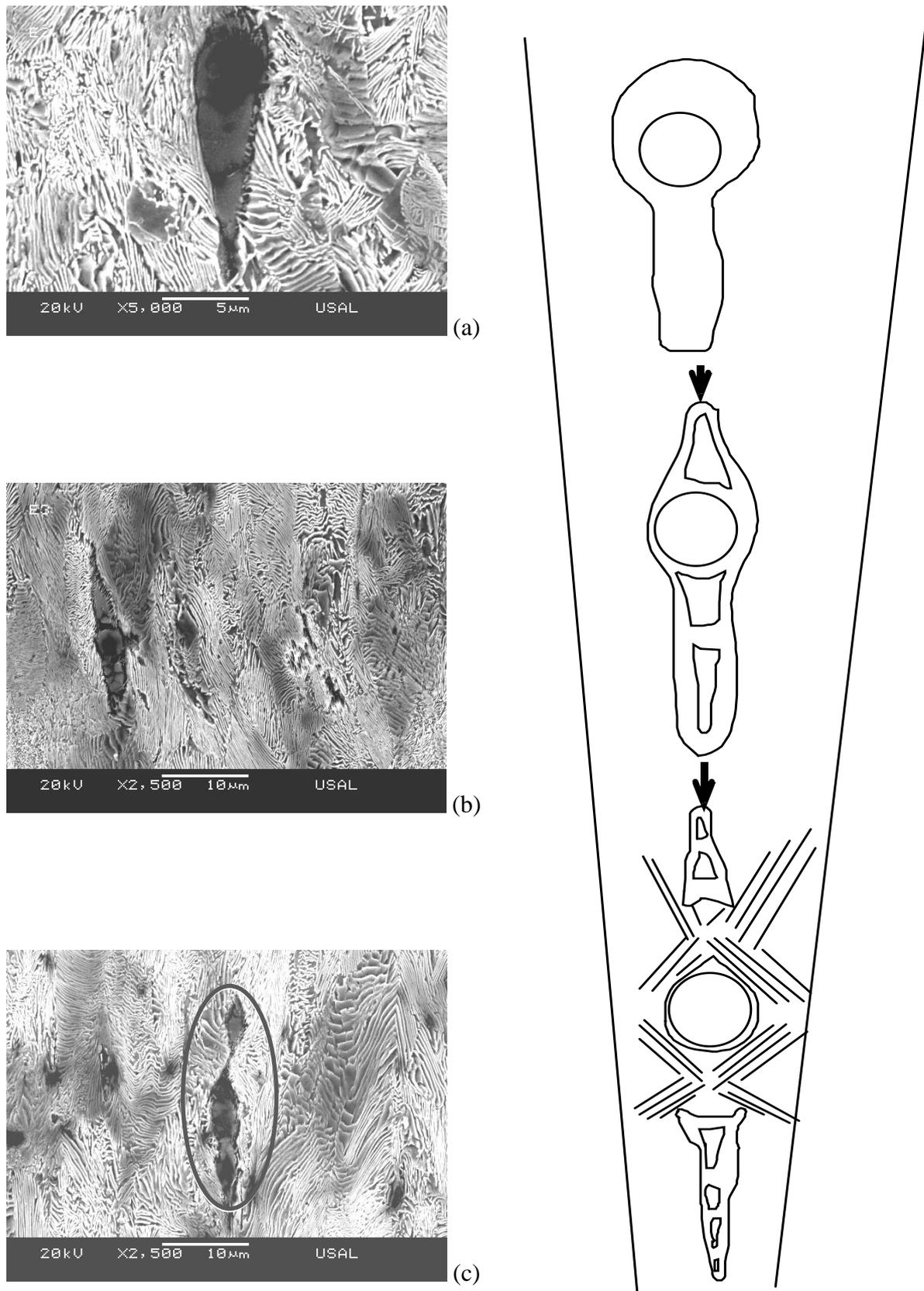


Fig. 2.53. Micrografías y esquema de la evolución de las inclusiones denominadas *mezcla* durante el proceso de trefilado; (a) E2, (b) E3 y (c) E4.

5. ESTUDIO DEL CUELLO DE ESTRICCIÓN

5.1. Fundamento teórico

En las probetas lisas sometidas a un ensayo de tracción simple se produce un estado de tensiones uniaxial y uniforme, lo cual acontece hasta que se alcanza el punto de carga máxima aplicada (F_{\max}). Durante el período inicial del ensayo la tensión aplicada no produce efecto perjudicial alguno en las colonias cuyas láminas no están orientadas en la dirección del trefilado (eje longitudinal del alambre o probeta) y que poseen un espaciado ínterlaminar anómalo (*pseudocolonias*), ni sobre las inclusiones y las deformaciones asociadas a éstas. Una vez que el ensayo ha alcanzado la carga máxima se produce una reducción de sección en una zona de la probeta (dicha zona se denomina cuello de estricción). La zona en la cual se produce dicho cuello suele ser la zona más débil de la misma o la más perjudicada durante el ensayo. Una vez que se comienza a formar el cuello de estricción el estado de tensiones deja de ser uniaxial y uniforme.

Han sido muchos los estudios que se han centrado en el análisis del cuello de estricción, entre ellos cabe destacar estudios recientes sobre la distribución de tensiones como LORENZO (2009), en el cual se estudia dicha distribución generada durante la formación del cuello de estricción en aceros que han sido sometidos a un proceso de trefilado previo. Otros estudios además estudian la influencia de esta distribución sobre partículas presentes en dichos cuellos de estricción (HU *et al.*, 2009).

Cuando se forma el cuello de estricción (Fig. 2.54) aparece un estado de tensiones triaxial en dicha zona. Dicho estado tensional triaxial en el fondo del cuello de estricción viene dado, en coordenadas cilíndricas, por la tensión axial σ_x en la dirección longitudinal del alambre, y por las tensiones radial y circunferencial σ_r y σ_θ respectivamente. Una solución aproximada para conocer este estado tensional ha sido propuesta por DAVINDENKOV y SPIRIDONOVA (1946) para el cálculo de σ_x , σ_r y σ_θ (con $\sigma_r = \sigma_\theta$):

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_Y} = \frac{a^2 - r^2}{2aR} \quad ; \quad \frac{\sigma_x}{\sigma_Y} = 1 + \frac{a^2 - r^2}{2aR} \quad (2.2)$$

donde σ_Y es el límite elástico del material, R el radio de curvatura del cuello de estricción en la zona de mínima sección, a la distancia radial desde el fondo del cuello al punto considerado y r la distancia existente desde el eje longitudinal del alambre hasta el mencionado punto.

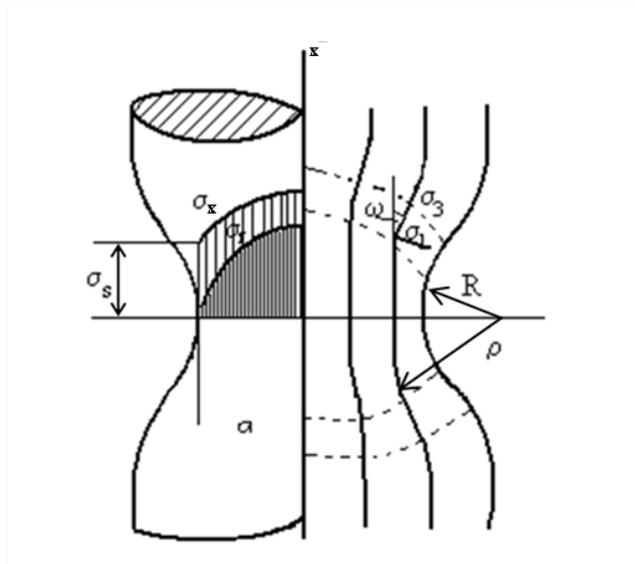


Fig. 2.54. Esquema de la distribución tensional en el cuello de estricción.

5.2. Ensayos de tracción simple

Para la realización del estudio del cuello de estricción se han utilizado los alambres pertenecientes al alambroón inicial, al cuarto y quinto paso del proceso y al alambre de pretensado de la familia de acero E, ensayándose de cada uno de éstos tres probetas lisas, uniformes y libres de entallas. Se han realizado ensayos de tracción simple interrumpidos antes de la fractura total por separación de superficies, para así poder visualizar el mayor producido en la microestructura previo a la rotura. Una vez finalizado los ensayos se han cortado longitudinalmente las probetas, embutido y pulido los distintos cuellos de estricción obtenidos, para su posterior análisis en el MEB.

El estudio pretende analizar además los micro-daños que generan o influyen en la iniciación de la fractura, más concretamente en la *zona de proceso de fractura* (ZPF) presente en el cuello de estricción. Para ello se realizarán varios ensayos de tracción simple sobre probetas lisas pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado.

Para la realización de este estudio se ha utilizado la familia de acero E, puesto que es el acero que presenta una mayor cantidad de inclusiones. Cabe recordar en este punto que el acero tipo E ha sido sometido a siete pasos en el proceso de trefilado nombrados con números correspondientes a cada paso, siendo 0 el alambroón inicial y 7 el alambre de pretensado comercial. El diámetro (ϕ) de cada uno de estos alambres es el correspondiente a cada uno de los pasos del proceso de trefilado, el cual irá decreciendo debido a la deformación plástica acumulada (\mathcal{E}_{eq}^P) durante dicho proceso, indicado en el apartado 2. Los pasos del proceso de trefilado seleccionados para el estudio son el alambroón inicial (el cual no ha sufrido ningún

paso del proceso de trefilado), un paso intermedio (por poseer la mitad de la deformación plástica acumulada en el proceso) y el último paso del proceso de trefilado o alambre de pretensado comercial. El análisis de los alambres extremos e intermedios de la cadena del proceso de trefilado permitirá establecer hipótesis acerca del comportamiento de las inclusiones en la fractura del material. El estudio se basa en el análisis del micro-daño que influye en la iniciación y propagación de la fractura en la ZPF, que se encuentra en el cuello de estricción de los alambres de los distintos pasos de trefilado sometidos a tracción simple. Con el examen de las micrografías pertenecientes a los distintos alambres se podrá observar la influencia de las inclusiones, pseudocolonias y otros micro-daños encontrados en la zona cercana a la superficie de fractura del material.

Para la realización de los ensayos de tracción simple en los alambres, la preparación de las muestras, la obtención de las micrografías y el análisis de las mismas, se ha utilizado el equipo experimental ubicado en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos perteneciente al GIFIE de la USAL (Escuela Politécnica Superior de Zamora), apartado 3.

Los alambres proceden de una cadena real del proceso de trefilado compuesto por siete hileras. El primer paso para la elaboración de las probetas ha sido cortarlas a partir de alambres de tres metros de longitud, obteniéndose así muestras con una longitud aproximada 30 cm y el diámetro correspondiente a cada paso del proceso de trefilado. Seguidamente se ha medido el diámetro y la longitud exacta de cada probeta con un calibre. Una vez tomadas estas medidas se ha procedido a someter a la probeta a un ensayo de tracción simple.

El ensayo de tracción simple es uno de los ensayos más sencillos y menos costosos para obtener la curva tensión deformación del material, la cual indica su comportamiento frente a una carga creciente hasta producirse la rotura final de la probeta ensayada. Durante el ensayo de tracción simple se registra la carga necesaria para producir un determinado alargamiento a medida que la probeta es traccionada a velocidad constante. El registro inmediato de un ensayo como éste es la curva de carga frente el alargamiento (curvas $F-u$). A partir de dicha curva se puede obtener la tensión ingenieril (s), la deformación ingenieril (e), la tensión verdadera (σ), la deformación verdadera (ε), el modulo de Young (E), el límite elástico (σ_Y) y la tensión máxima (σ_{max}).

El ensayo de tracción simple se caracteriza por aplicarse sobre la probeta una tensión uniaxial uniforme, para lo cual la probeta utilizada tiene que ser lisa, libre de entallas y de sección uniforme. En el presente estudio el ensayo de tracción simple al que han sido sometidas las probetas es un ensayo con control de desplazamiento en el cual se ha introducido la velocidad

del ensayo. En este caso la velocidad elegida para una correcta toma de datos y control del ensayo ha sido de 2 mm/minuto.

Para poder analizar la influencia de las inclusiones en el proceso de fractura interesa que las probetas sometidas al ensayo de tracción simple no lleguen a la rotura final por separación total de superficies. El ensayo se detiene al observar el cuello de estricción que precede a la rotura del material. No obstante para conseguir el máximo cuello de estricción sin llegar a la fractura del material se han realizado varios ensayos.

Con el programa informático Test Works 1.8 que incorpora la máquina de ensayo se ha podido parar el ensayo a un determinado porcentaje de descenso de carga. Los ensayos se han realizado con una susceptibilidad de rotura (SR) fijada con anterioridad; dicha susceptibilidad es el descenso en porcentaje desde la carga máxima anterior hasta el punto en el cual se encuentra el ensayo, la cual vendrá fijada. La susceptibilidad de rotura suele ser del 5% en el alambre fuertemente trefilado y del 10% en el alambroón inicial, aunque los valores de la misma varían entre unos porcentajes próximos, llegándose a solapar de un paso de trefilado a su inmediato consecutivo.

Prefijando la susceptibilidad de rotura en los ensayos realizados a las diferentes probetas, el ensayo de tracción simple se detiene en una carga F^* inferior a la carga máxima alcanzada durante el ensayo (F_{\max}) y superior su vez a la carga de rotura final por separación total de superficies (F_R) del material, obteniéndose en la misma el máximo cuello de estricción posible antes de la fractura del material.

Observando la curva fuerza-desplazamiento indicada en Fig. 2.55, se puede ver como en la parte final de dicha curva se produce un descenso brusco, en el cual se encuentra la fuerza de parada del ensayo, posterior a la del ensayo. Dicho descenso formado en la curva $F-u$ se caracteriza por no ser un comportamiento intrínseco del material, sino que depende de la máquina utilizada para dicho ensayo, del material y su calidad superficial así como de la velocidad de ensayo empleada. En la Fig. 2.55 se muestra la curva de descenso así como la fuerza máxima (F_{\max}) y la fuerza de rotura (F_R) entre las cuales se situaría la fuerza de parada (F^*) de los ensayos realizados. Las susceptibilidades de rotura prefijadas en los ensayos, para la obtención de cuellos de estricción en la probeta, son próximas a la fractura de la misma son los siguientes:

- Alambroón inicial: 11% de susceptibilidad de rotura (SR).
- Alambre perteneciente al cuarto paso del proceso de trefilado: 9 %.
- Alambre de pretensado comercial: 9%.

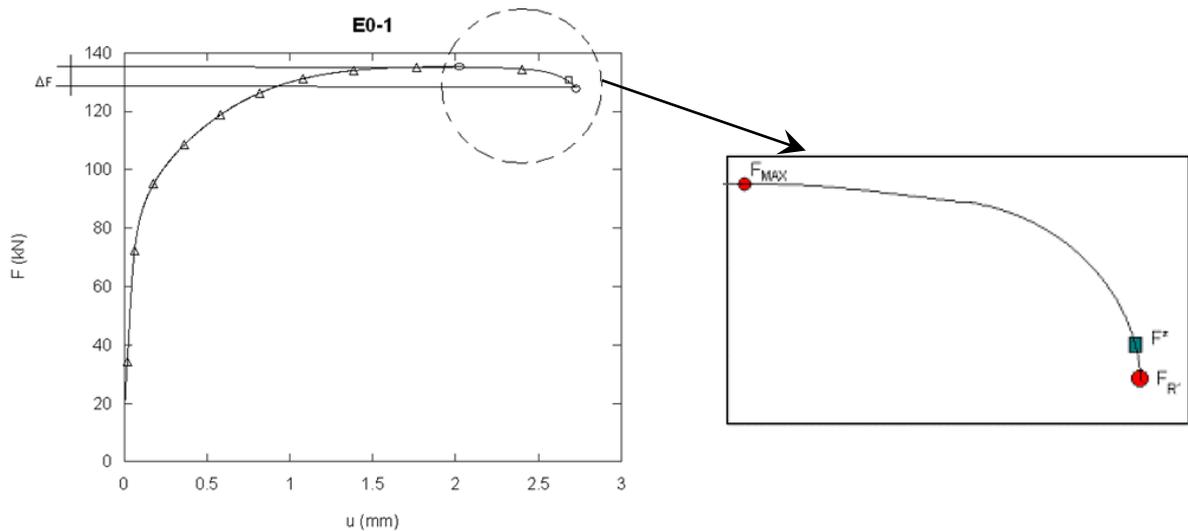


Fig. 2.55. Curva $F-u$ obtenida en el ensayo de tracción simple.

De forma general, una vez obtenidos los diferentes cuellos de estricción de los distintos alambres del proceso de trefilado se ha procedido al corte de la probeta, dejando únicamente el cuello de estricción como se observa en la Fig. 2.56. Posteriormente se ha realizado un corte longitudinal sobre dicho cuello de estricción extraído, obteniéndose dos mitades pertenecientes al mismo.

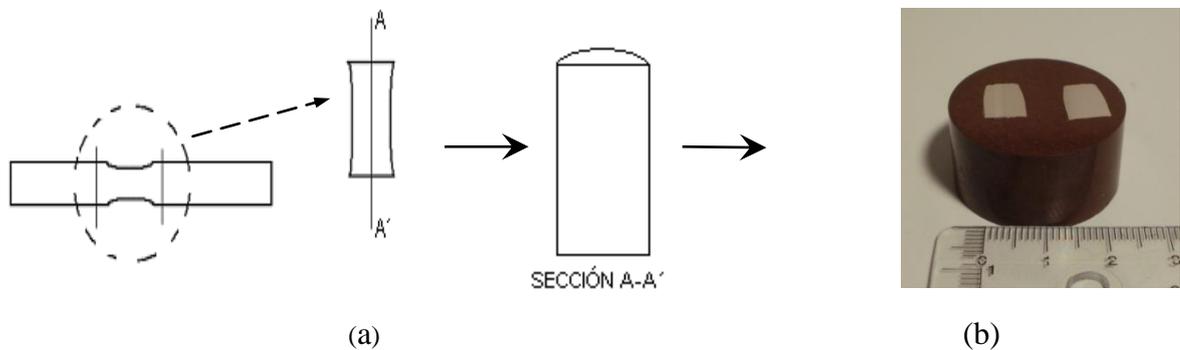


Fig. 2.56. (a) Esquema de corte y (b) embutido de probeta posterior a la realización del ensayo de tracción simple.

Para la obtención de muestras representativas pertenecientes a los alambres estudiados se realizaron cortes transversales al eje longitudinal de los mismos, de tal forma que dichas muestras consisten en cilindros, que contienen el cuello de estricción, de aproximadamente 1 cm de altura y con un diámetro que se corresponde con el de cada alambre en particular, en este caso E0 con 11,03 mm, E4 con 7,19 mm y por último E7 con 5,01 mm. Para la realización de los cortes se ha utilizado una cortadora con disco de corte de diamante, especial para aceros de alta resistencia. Una vez cortadas transversalmente se procede a la realización de un corte longitudinal por el plano diametral, obteniéndose dos superficies de corte en las

cuales se observa el cuello de estricción formado durante el ensayo. Las secciones longitudinales obtenidas tienen que ser preparadas para la observación metalográfica en el MEB. Ambas mitades pertenecientes a la misma probeta ensayada son embutidas a continuación en una única muestra.

Una vez obtenidas las secciones longitudinales pertenecientes a los distintos cuellos de estricción, éstas han sido embutidas en una resina de tipo fenólico y se ha procedido a realizar el pulido, esmerilado y ataque para su visualización en el MEB, siguiendo el proceso detallado en el apartado 4.1.

El ensayo en algunas de las probetas fue fallido, es decir se llegó a la fractura total del material por la alta susceptibilidad de rotura impuesta. Se decidió realizar la observación en el MEB de las superficies de fractura de estas probetas. Para la preparación de estas muestras se han seguido los mismos pasos enunciados que para las muestras anteriores.

La observación de las superficies de fractura de las probetas que han llegado a la rotura proporciona información sobre la evolución de dicha rotura. El estudio de estas probetas se centrará en las posibles deflexiones sufridas por el camino de fractura.

5.3. Estudio microestructural

Para el estudio micro-estructural del cuello de estricción se han realizado micrografías a 2500 y 5000 aumentos en los cuellos de estricción generados en el alambión y el cuarto paso del proceso de trefilado de la familia de acero E. El análisis de las mismas se ha centrado en la división en dos zonas dentro del cuello de estricción, la zona central y la periferia. De cada una de éstas se ha realizado la medición del espaciado interlaminar, siendo S_{0C} el espaciado interlaminar medio obtenido en la parte central del cuello y S_{0P} el espaciado interlaminar medio obtenido en la periferia del cuello. Los resultados muestran la diferencia de espaciado interlaminar en ambas zonas (Tabla 2.8). Ambas medidas de los distintos cuellos de estricción de los diferentes aceros muestran una reducción del espaciado interlaminar tanto en el centro como en la periferia de los mismos. Siendo dicha reducción más acentuada en la periferia de los cuellos de estricción.

Tabla 2.8. Espaciado interlaminar del cuello de estricción

	E0	E4	E7
S_{0C} (μm)	0.1511	0.1673	0.1445
S_{0P} (μm)	0.1279	0.1518	0.1270

Una vez obtenidos los espaciados interlaminares medios del centro y la periferia de los cuellos de estricción se han representado en comparación con la curva de aproximación de los espaciados interlaminares medios pertenecientes a los alambres de los distintos pasos del proceso de trefilado (S_{0M}), de la familia de acero E (Fig. 2.57).

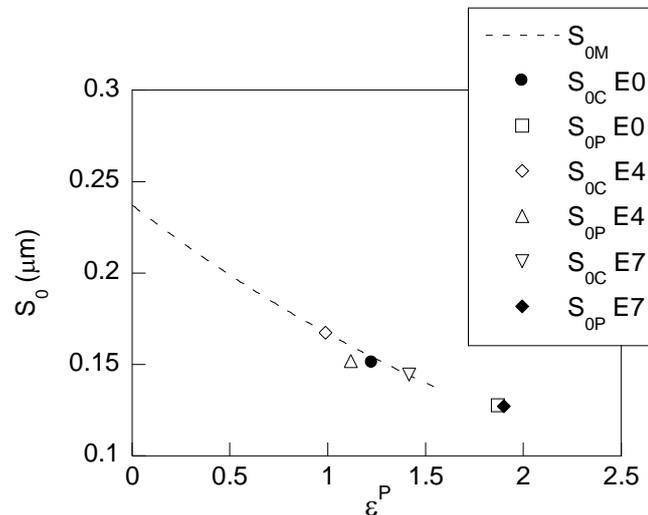


Fig. 2.57. Espaciado interlaminar vs. Deformación plástica acumulada.

La diferencia entre la reducción del espaciado interlaminar entre el centro y la periferia de los cuellos de estricción, de los aceros examinados, es mayor cuanto menor es el grado de trefilado. El espaciado interlaminar obtenido en la periferia del cuello de estricción en el alambroón inicial es muy inferior al presentado por el alambre de pretensado sin ensayar. Sin embargo a medida que avanza el proceso de trefilado la reducción de espaciado interlaminar en la periferia del cuello es menor, obteniéndose valores de espaciado menores a los presentados por el alambre de pretensado sin ensayar.

Los resultados obtenidos muestran una reducción del espaciado interlaminar tanto en la periferia como en el centro del cuello de estricción en comparación con el espaciado interlaminar característico del alambre de partida. El espaciado interlaminar está íntimamente relacionado con la deformación plástica del alambre como ya demostró TORIBIO (2002). En la Fig. 2.57 se puede observar la deformación plástica acumulada correspondiente a cada espaciado interlaminar. La deformación plástica en los centros de los cuellos de estricción, del alambroón inicial y el alambre perteneciente al cuarto paso del proceso de trefilado, corresponde de forma aproximada a la de un alambre perteneciente al sexto y quinto paso del proceso de trefilado respectivamente. De igual forma el espaciado interlaminar de la periferia de los cuellos de estricción, del alambroón inicial y el cuarto paso del proceso, se aproximan a la deformación plástica mostrada por los alambres pertenecientes al alambre de pretensado y sexto paso del trefilado respectivamente. En cuanto al espaciado interlaminar obtenido en el

centro y la periferia de los cuellos de estricción del alambre de pretensado final, éste sufre una mayor reducción en la periferia del alambre, al igual que sucede en los cuellos de estricción del alambroón inicial y el alambre perteneciente al cuarto paso. Cabe señalar que ambas medidas de los espaciados interlaminares en el cuello de estricción del alambre de pretensado son significativamente inferiores a los obtenidos en el alambre de partida, sin ensayar.

5.3.1. Micro-dureza Vickers

El ensayo por indentación aguda de Vickers se realiza para la obtención de la micro-dureza (HV) del material a ensayar. Los ensayos se realizaron a lo largo de de la sección longitudinal de los cuellos de estricción, aplicando una carga de 19.614 N durante 15 segundos y manteniendo una distancia de separación entre ensayos de 0,5 mm. En los aceros eutectoides sometidos a un proceso de trefilado se produce un aumento de dureza debido a la existencia de elevadas tensiones residuales que se provocan durante dicho trefilado. En el alambroón y en el acero de pretensado estas tensiones residuales son menores, en el primero porque procede de una laminación en caliente y en el producto final por haber sido sometido a un proceso posterior de relajación (GONZÁLEZ *et al.* 2006).

Se han realizado ensayos de micro-dureza a lo largo de tres diámetros de los cuellos de estricción pertenecientes al alambroón inicial, cuarto paso y del alambre de pretensado. La separación entre la realización de las filas de medida ha sido de 5 mm en las distintas zonas del cuello de estricción desde la zona de fractura, como se muestra en la Fig. 2.58. La nomenclatura utilizada es HV1 para la fila de micro-durezas más cercana a la zona de fractura de la probeta y HV3 para la fila más alejada de dicha zona. Con los resultados obtenidos se puede observar la variación de la micro-dureza a lo largo de la dirección longitudinal del alambre y de los distintos diámetros en función de la distancia a la superficie fracturada.

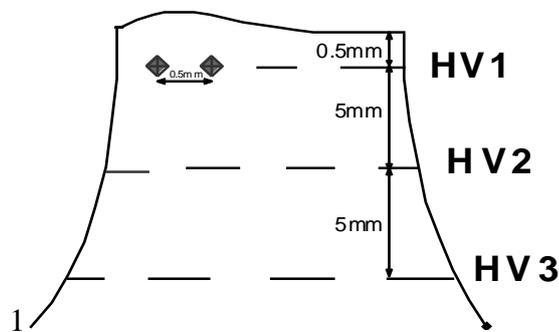


Fig. 2.58. Mediciones de micro-dureza Vickers en los cuellos de estricción.

En las siguientes Figs. 2.59-2.61 se han representado los resultados de las micro-durezas en los distintos cuellos de estricción de las probetas analizadas, pertenecientes al alambión inicial, alambre del cuarto paso del proceso de trefilado y alambre de pretensado, junto con las micro-durezas obtenidas de los alambres correspondientes a cada paso sin ensayar, éstos han sido nombrados como HVE0 para la micro-dureza correspondiente al alambión inicial y HVE7 para la micro-dureza del alambre de pretensado final.

Para la representación de las micro-durezas a lo largo del diámetro del alambre se ha adimensionalizado el radio, de forma que $r/R=0$ se corresponde con el centro del alambre y $r/R=\pm 1$ con el borde del mismo.

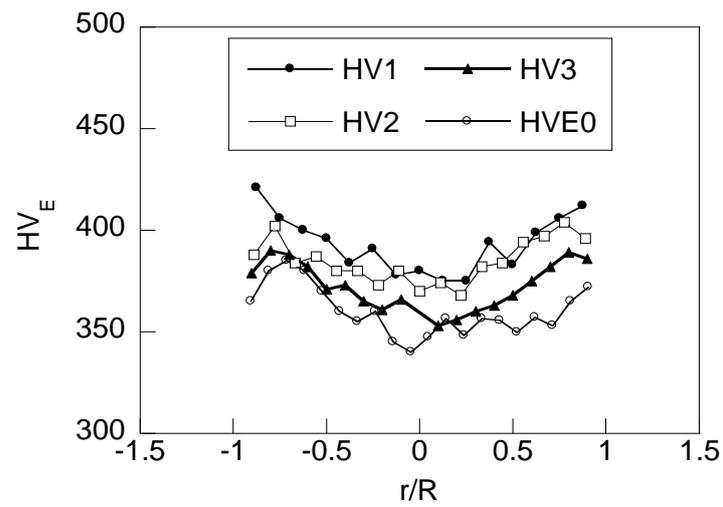
En la Fig. 2.59 se puede observar la variación de la micro-dureza en los perfiles pertenecientes a los cuellos de estricción de las distintas probetas del alambión inicial. Como resultado se observa un aumento de micro-dureza en la periferia de los cuellos y un aumento menos acentuado en los centros. Otra de las observaciones es el aumento de dureza en las mediciones realizadas más cerca de la superficie de fractura.

Cabe destacar la simetría que se presenta en los perfiles de micro-dureza obtenidos de los cuellos de estricción pertenecientes a las probetas E0-1 y E0-3, obteniéndose perfiles en forma de “*valle*”. En los cuellos de estricción formados en las probetas de alambión inicial las mayores micro-durezas se sitúan en la periferia del mismo mientras en las proximidades del alambre se puede observar de forma puntual un aumento de la micro-dureza.

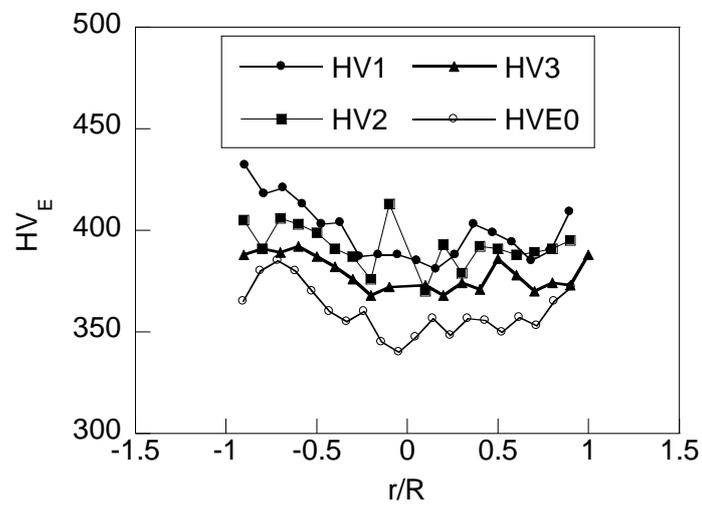
Al igual que en el alambión inicial en los cuellos de estricción pertenecientes a los alambres del cuarto paso del proceso de trefilado se puede observar ese aumento de micro-dureza con respecto al resto (Fig. 2.60).

En comparación con las micro-durezas presentadas por los alambres pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado, la media de las micro-durezas obtenidas en la periferia del cuello del alambión inicial son próximas a las de un alambre perteneciente al segundo o tercer paso del proceso de trefilado, mientras las obtenidas en el centro de cuello se aproximan a las correspondientes a un alambre del primer paso del proceso.

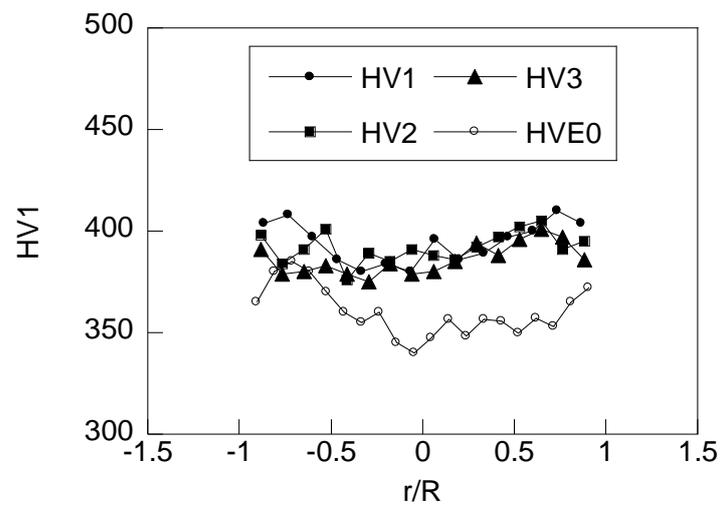
En el caso de las micro-durezas obtenidas en la periferia del cuello de estricción de un alambre en el cuarto paso del proceso de trefilado éstas son próximas a las de un alambre correspondiente al sexto paso del trefilado, mientras en el centro del mismo es más próxima a un alambre perteneciente al último paso del proceso.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.59. Micro-dureza Vickers de los cuellos de estricción de las probetas: (a) E0-1, (b) E0-2 y (c) E0-3.

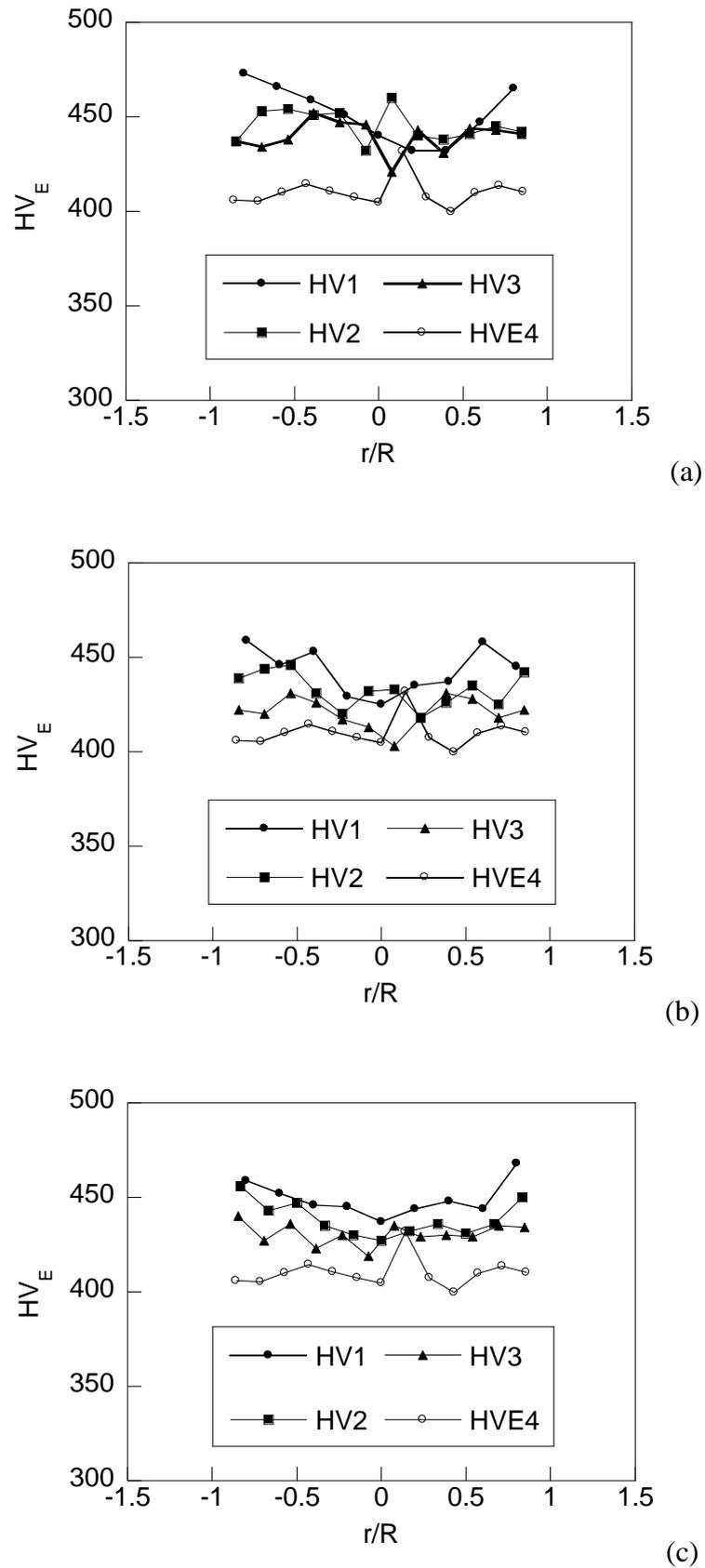


Fig. 2.60. Micro-dureza Vickers de los cuellos de estricción de las probetas: (a) E4-1, (b) E4-2 y (c) E4-3.

En las micro-durezas obtenidas en los distintos cuellos de estricción de las probetas pertenecientes al alambre de pretensado (Fig. 2.61), se puede observar como los valores entre las distintas zonas de toma de datos, HV1, HV2 y HV3, son menos dispares que en las micro-durezas de los cuellos de estricción de los alambres pertenecientes al alambrón inicial y al alambre perteneciente al cuarto paso del proceso. Cabe señalar que aunque las diferencias sean menores las micro-durezas obtenidas son mayores cuanto más próxima es la zona a la superficie de fractura de la probeta en cuestión.

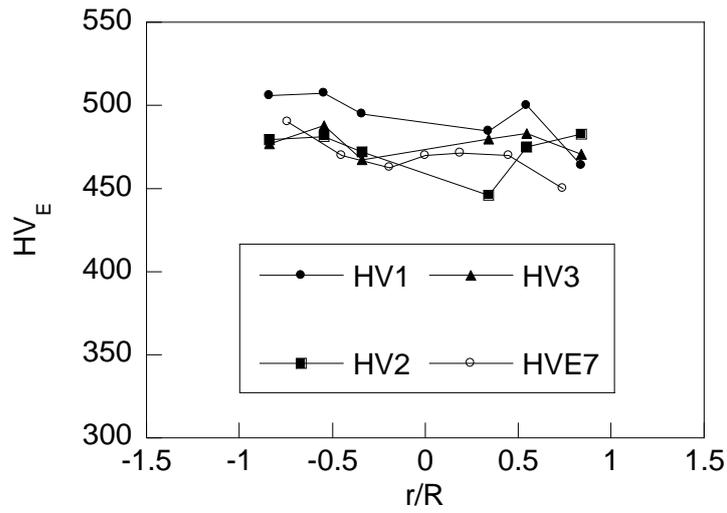
Los valores de las micro-durezas obtenidas en los cuellos de estricción del alambre de pretensado, Fig. 2.61, como cabía esperar puesto que la micro-dureza aumenta con el grado de trefilado del alambre, son mayores al resto de las micro-durezas obtenidas en los cuellos de estricción del resto de los alambres analizados. Además dichas micro-durezas en todos los cuellos de estricción estudiados, pertenecientes al alambre de pretensado, poseen valores superiores a las micro-durezas obtenidas en un alambre de pretensado sin ensayar, HVE7.

De forma general los perfiles de micro-durezas de los distintos cuellos de estricción, tanto los pertenecientes al alambrón inicial como los correspondientes al cuarto y último paso del proceso, muestran un aumento de micro-dureza más pronunciado en la periferia y un aumento menos acentuado en el centro de dichos cuellos.

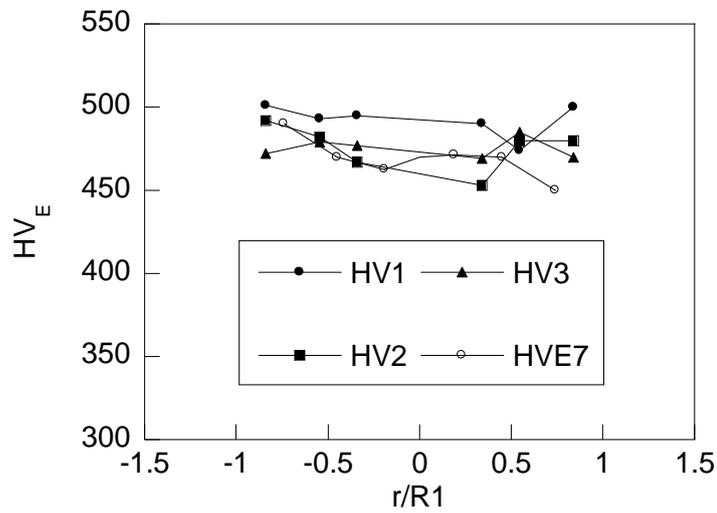
La diferencia de microdurezas entre las obtenidas entre el alambre de pretensado sin ensayar y las obtenidas en el cuello de estricción de los ensayos muestran menores variaciones que las analizadas en las comparaciones del alambrón inicial y alambre del cuarto paso del proceso de trefilado, hecho que es debido a la gran deformación plástica asumida durante el proceso de trefilado por el alambre de pretensado la cual restringe a éste a asumir una mayor deformación que el resto de los alambres estudiados.

La variación de la micro-dureza a lo largo del perfil de los cuellos de estricción sugiere una mayor deformación de la periferia del alambre durante la formación del cuello de estricción, mientras el centro de la probeta sufre un aumento de los valores de la micro-dureza pero siempre menores que en la periferia.

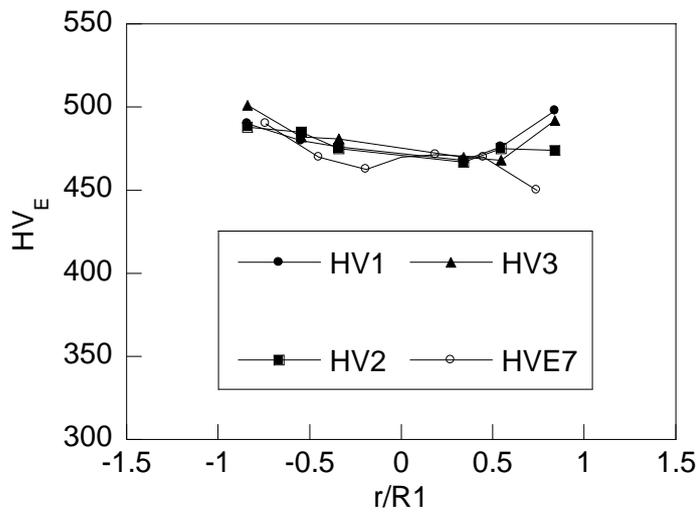
La formación del cuello de estricción hace que el material sufra un endurecimiento por deformación heterogéneo, en el cuál la periferia del alambre adquiere una micro-dureza comparable a la que puede sufrir al ser sometido a dos pasos del proceso de trefilado y el centro del cuello de estricción adquiere una micro-dureza próxima a la obtenida por el alambre al ser sometido a un único paso del proceso de trefilado.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.61. Microdureza Vickers de los cuellos de estricción de las probetas: (a) E7-1, (b) E7-2 y (c) E7-3.

6. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

Para la realización de este estudio se han mecanizado probetas prismáticas con distintas entallas, partiendo de los alambres de una cadena real de trefilado compuesta de siete hilas y pertenecientes a la familia de aceros E. De los alambres procedentes de la cadena de trefilado sólo se han estudiado el alambón inicial (o alambre que no ha sufrido ningún paso de trefilado), alambres pertenecientes al tercer y cuarto paso del proceso y el alambre de pretensado comercial. Las probetas que han sido mecanizadas van a presentar dos tipos de entallas, Fig. 2.62, denominadas PAA y PCC, siendo las PAA probetas Prismáticas con doble entalla tipo A (pequeña profundidad y pequeño radio de curvatura) y las PCC probetas Prismáticas con doble entalla tipo C (pequeña profundidad y gran radio de curvatura).

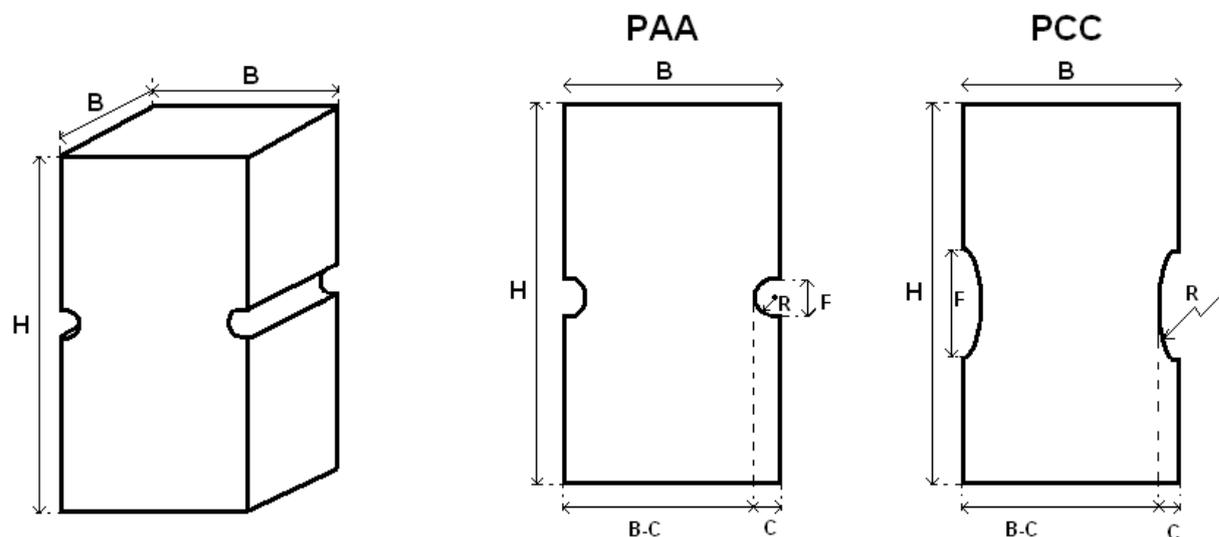


Fig. 2.62. Probetas prismáticas con entallas de tipo PAA y PCC.

Las medidas de las probetas prismáticas ideales PAA y PCC, esto es, sin los errores propios del mecanizado, conservan una relación de proporcionalidad con los alambres originales, de sección circular, representada en la Tabla 2.9. En la siguiente Tabla 2.10 se muestran las medidas de las probetas prismáticas entalladas ideales, PAA y PCC, siendo B el espesor de la entalla, C la profundidad, R el radio de curvatura y F la distancia entre extremos de la entalla o abertura de la misma.

Tabla 2.9. Relación de las probetas, PAA y PCC, con los alambres de origen.

	B/ϕ	C/ϕ	R/ϕ
PAA	0.617	0.060	0.022
PCC	0.617	0.057	0.220

Tabla. 2.10. Medidas de las probetas *ideales* PAA y PCC.

ϕ (mm)	PAA				PCC			
	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>F</i>
11.030	6.802	0.671	0.230	0.460	6.802	0.634	2.482	3.318
8.210	5.063	0.499	0.171	0.342	5.063	0.472	1.847	2.470
7.490	4.619	0.456	0.156	0.312	4.619	0.431	1.685	2.253
5.040	3.108	0.307	0.105	0.210	3.108	0.290	1.134	1.516

En cuanto a la nomenclatura empleada para la identificación de las diferentes probetas se ha seguido el criterio que se expone a continuación. Cada probeta entallada será identificada con el nombre de la entalla, PAA ó PCC, seguida del número que indica el paso de la cadena de trefilado a la cual pertenece, siendo cero el alambión inicial y siete el alambre de pretensado comercial. De cada caso de estudio se han realizado tres ensayos nombrándose a las diferentes probetas con un guión seguido de un número que indica el grado de similitud con la probeta ideal, siendo el uno el que menores variaciones presenta. Las medidas de las distintas probetas se han realizado con la ayuda del proyector de perfiles NIKON. Dichas medidas, con las pequeñas variaciones debidas al proceso de mecanizado, se muestran en el anexo I.

6.1. Equipo experimental y método de ensayo

Los ensayos de las diferentes probetas prismáticas entalladas de la presente Tesis han sido realizados con el equipo experimental que se encuentra ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela Politécnica Superior de Zamora, perteneciente a la Universidad de Salamanca, apartado 2.

Las probetas entalladas han sido sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, hasta rotura, en las máquinas de ensayo servomecánica MTS RT/100 y MTS RF/200. Para ello se han colocado las probetas, de aproximadamente 30cm de longitud, entre las mordazas de la máquina, las cuales están perfectamente alineadas entre sí, este hecho implica que la probeta también se mantenga alineada durante la realización del ensayo y por consiguiente dichas probetas no se vean afectadas por posibles esfuerzos de flexión. En cada probeta, y más concretamente en las proximidades de la entalla, se colocaron dos extensómetros dinámicos axiales con bases de medida de 50 mm y 25mm.

Los extensómetros han sido colocados de tal forma que sus dos cuchillas quedasen equidistantes del centro de la entalla y, a su vez, lo suficientemente alejadas de la entalla para poder registrar el desplazamiento relativo entre puntos de la probeta situados en una zona sometida a un estado uniaxial uniforme.

En los ensayos realizados se ha impuesto una velocidad de desplazamiento entre mordazas de 0.01mm/s en las probetas con entallas de tipo PAA y de 0.025mm/s en las probetas con entalla PCC, basándose en estudios previos (AYASO, 2001). Desde el comienzo del ensayo hasta que finaliza el mismo, se registran de forma continua las lecturas correspondientes a la carga aplicada y al desplazamiento registrado por el extensómetro en el sistema de adquisición de datos mencionado.

Los datos obtenidos han sido posteriormente tratados para obtener la carga F (kN) y el desplazamiento de los extremos del extensómetro en contacto con la probeta u (mm) en cada momento del ensayo. Posteriormente se muestran los resultados en las gráficas $F-u$.

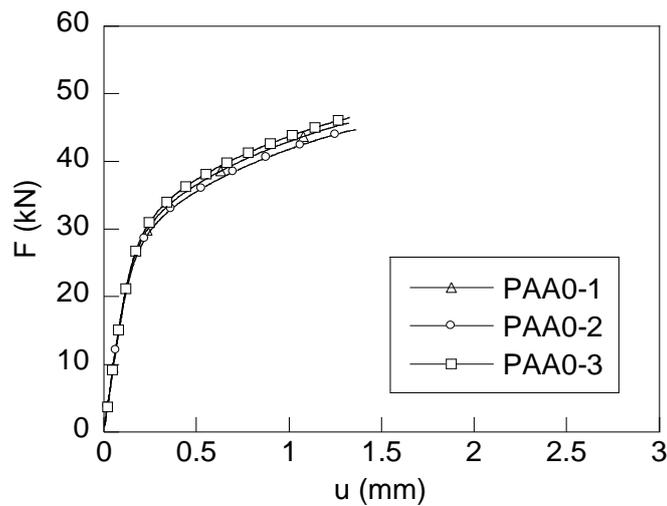
6.2. Curvas carga-desplazamiento

Se han realizado tres ensayos para cada caso de estudio, es decir de cada tipo de probeta y cada paso del proceso de trefilado estudiado, haciendo un total de 24 ensayos. Los registros carga-desplazamiento (curvas $F-u$) obtenidos de los distintos ensayos realizados están reflejados en las siguientes Figs. 2.63-2.67, de tal forma que en cada una de ellas se han representado para cada paso del proceso de trefilado las ternas de los distintos tipos de entalladas ensayadas.

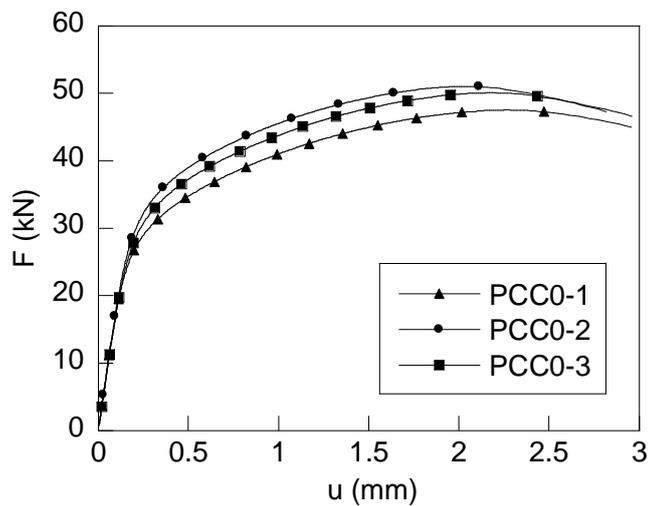
Las tres probetas ensayadas, de cada caso de estudio, muestran comportamientos análogos hasta la fractura por separación total de superficies. Sin embargo en alguno de los ensayos las probetas describen de forma excepcional un alargamiento despreciablemente mayor en comparación con el de las probetas pertenecientes a su misma terna. Las mayores dispersiones, en cuanto a la morfología de las curvas se refiere, se pueden observar en las probetas ensayadas pertenecientes al alambión inicial y ésta es más acentuada en las probetas ensayadas de tipo PCC. Por otra parte el comportamiento de las probetas con entallas tipo PAA presentan una mayor homogeneidad en la morfología de dichas curvas en todos los pasos del proceso de trefilado estudiados.

Una de las diferencias que se ha observado entre las curvas $F-u$ obtenidas en las probetas prismáticas entallas de tipo PAA y PCC es la tendencia que ambas presentan. En las probetas de tipo PAA se puede observar como las curvas $F-u$ presentan una tendencia plenamente ascendente en las cuales la F_{\max} coincide con el momento en el cual se produce la fractura total por separación de superficies. Por el contrario, las probetas con entallas de tipo PCC presentan curvas $F-u$ en las cuales se observa un descenso de carga a partir de la F_{\max} . La excepcionalidad a dicha diferencia entre las curvas $F-u$ de ambos tipos de entalla se encuentra en las curvas $F-u$ obtenidas en el alambre de pretensado comercial o último paso del proceso

de trefilado (Fig. 2.66), el cual presenta unas curvas $F-u$ con una tendencia plenamente ascendente, es decir, sin el tramo de descenso de carga característico de las entallas de tipo PCC. Dicha excepcionalidad puede ser debida al tratamiento termomecánico de relajación de tensiones al cual ha sido sometido una vez terminado el proceso de trefilado, unido a la gran deformación plástica acumulada que presenta dicho alambre de pretensado como se ha comentado con anterioridad en el apartado de introducción.



(a)



(b)

Fig. 2.63. Curvas carga-desplazamiento de las probetas prismáticas entalladas (a) PAA y (b) PCC mecanizadas a partir del alambrcn inicial (E0).

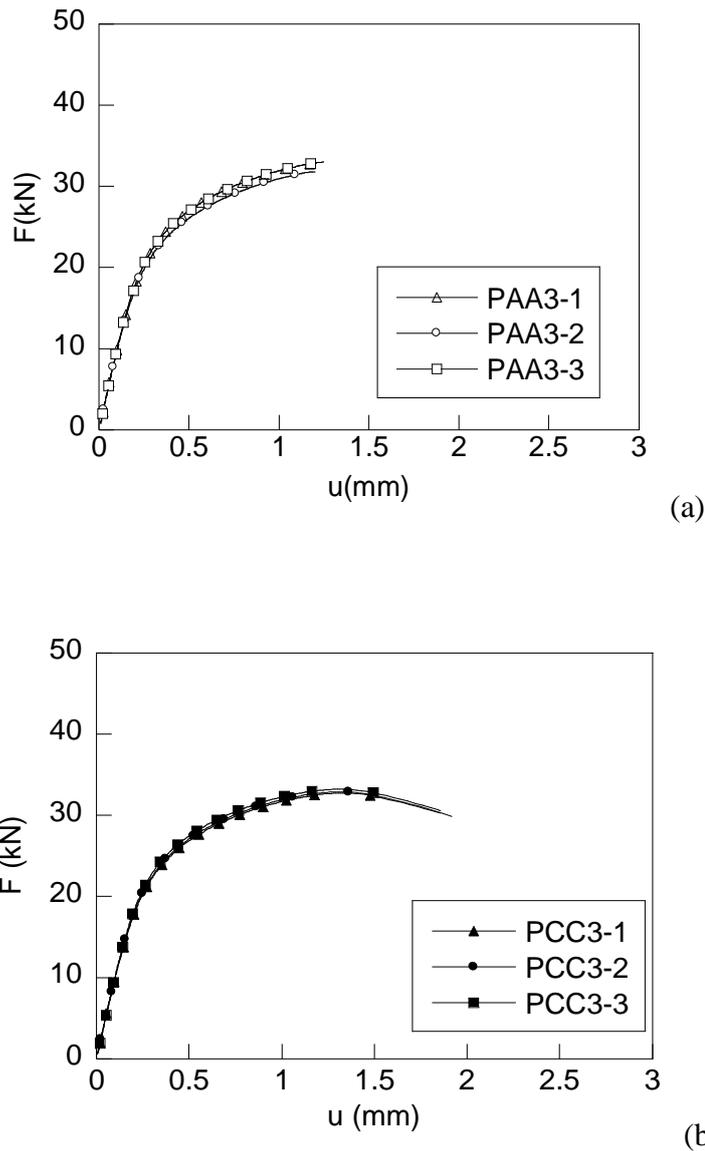


Fig. 2.64. Curvas carga-desplazamiento de las probetas prismáticas entalladas (a) PAA y (b) PCC mecanizadas a partir del alambre perteneciente al tercer paso de trefilado (E3).

En todas las curvas $F-u$ de todas las probetas con entallas de tipo PCC analizadas se muestra un comportamiento análogo, en el cual el desplazamiento registrado es mucho mayor que el obtenido en las probetas con entallas de tipo PAA, procedentes del mismo alambre de la cadena de trefilado. No obstante, dicha diferencia de desplazamiento registrada en ambos tipos de probetas entalladas para un mismo alambre disminuye a medida que aumenta el paso del alambre de procedencia de las mismas produciéndose en el alambre de pretensado comercial la menor diferencia de desplazamiento entre sus dos tipos de probetas entalladas.

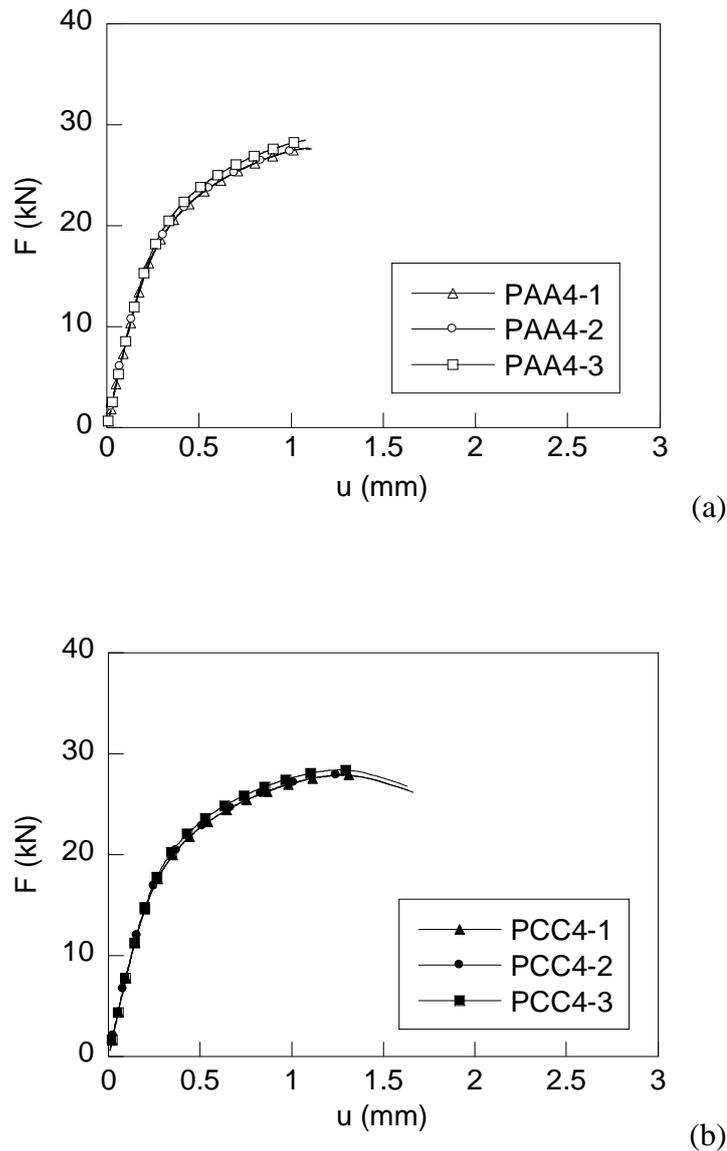


Fig. 2.65. Curvas carga-desplazamiento de las probetas prismáticas entalladas (a) PAA y (b) PCC mecanizadas a partir del alambre perteneciente al cuarto paso de trefilado (E4).

En cuanto a los descensos de carga registrados en el último tramo de las curvas $F-u$ pertenecientes a las probetas con entallas de tipo PCC, se ha observado como a medida que aumenta el paso de trefilado del alambre de procedencia estos descensos implican un menor desplazamiento.

El menor descenso de carga se justifica debido a la menor deformación plástica que puede asumir dicho alambre a medida que aumenta la deformación plástica acumulada que el mismo ya posee al haber sido sometido al proceso de trefilado, es decir cuanto mayor grado de trefilado del alambre de procedencia de la probeta menor será la capacidad del mismo para asumir deformaciones plásticas independientemente del tipo de entalla que posea.

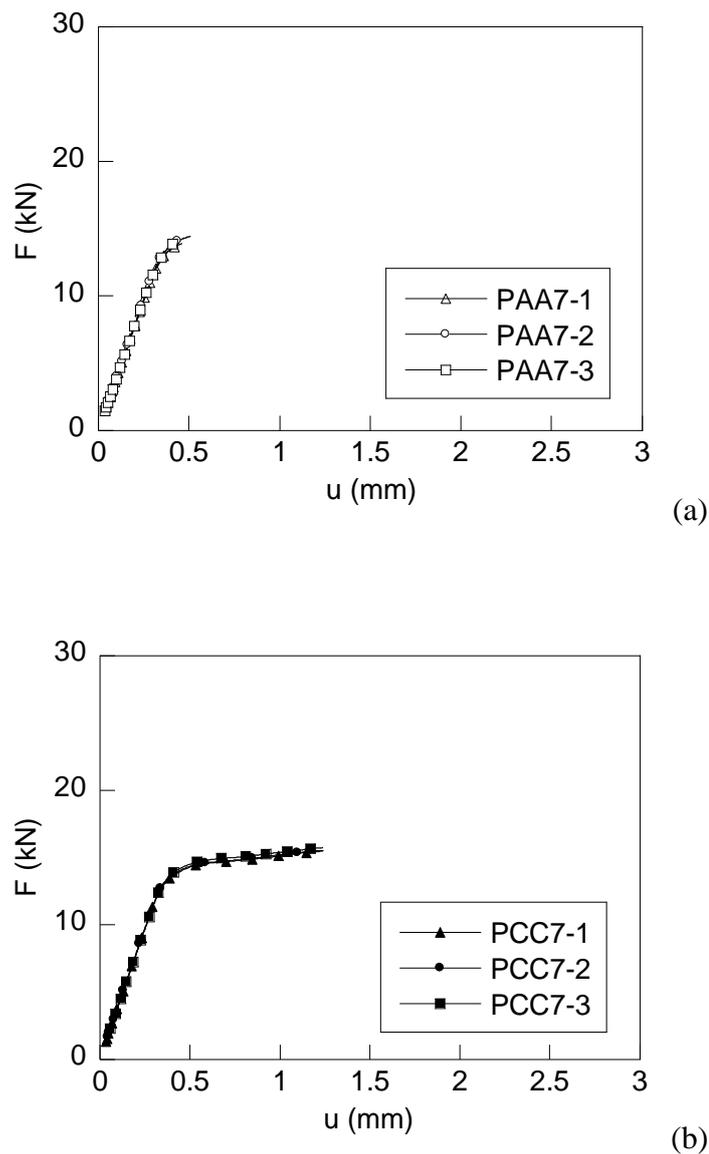


Fig. 2.66. Curvas carga-desplazamiento de las probetas prismáticas entalladas (a) PAA y (b) PCC mecanizadas a partir del alambre de pretensado comercial (E7).

Una vez obtenidas las curvas carga-desplazamiento de los distintos tipos de entalla se ha procedido a la interpretación de las mismas, usando para la comparativa entre los distintos tipos de entalla y pasos del proceso de trefilado la curva media obtenida de las correspondientes ternas.

En la siguiente Fig. 2.67 se muestran las curvas $F-u$ pertenecientes a las probetas mecanizadas a partir de los distintos alambres del proceso de trefilado con igual tipo de entalla. En dichas gráficas se puede observar como a medida que aumenta el proceso de trefilado se produce un menor desplazamiento para ambos tipos de entalla. Otra de las observaciones es el mayor desplazamiento hasta rotura que se produce en las probetas con entallas de tipo PCC si se compara con las PAA.

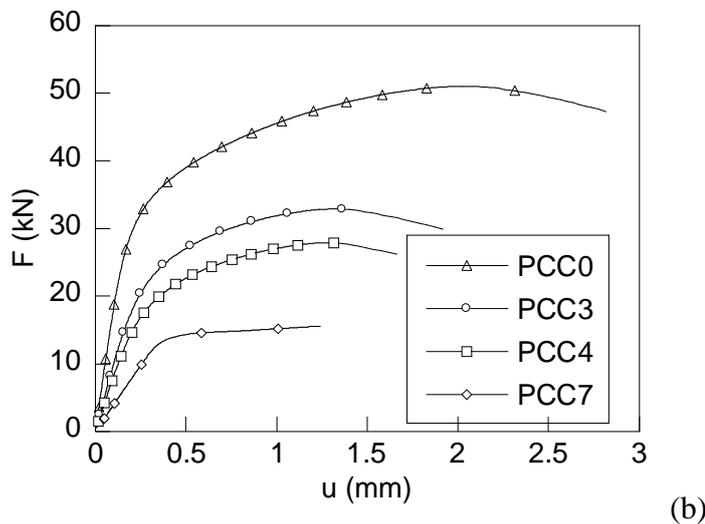
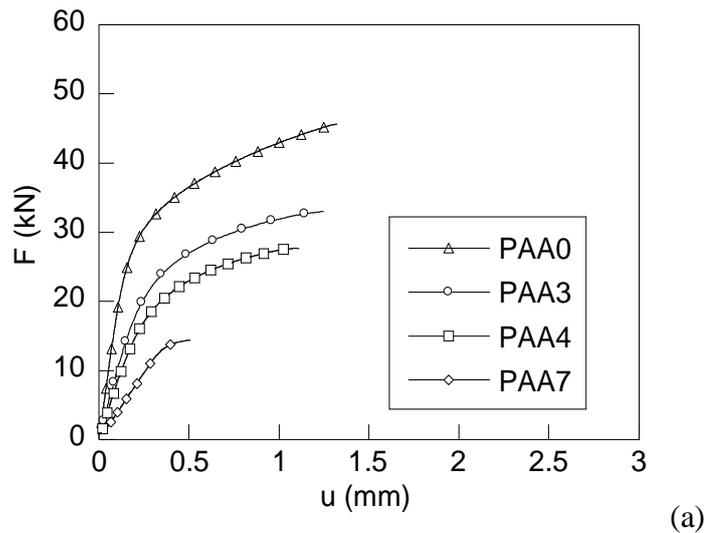


Fig. 2.67. Curvas $F-u$ de las probetas prismáticas entalladas (a) PAA y (b) PCC para los distintos alambres estudiados.

Dentro del análisis de las curvas $F-u$ se ha obtenido la carga correspondiente al límite elástico (F_Y), la carga máxima (F_{\max}), la tensión neta correspondiente al límite elástico (σ_{NY}), la tensión neta correspondiente a la carga máxima ($\sigma_{N\max}$) y los valores correspondientes a la rigidez (k), para cada caso de estudio. Las medidas obtenidas para ambos tipos de entallas, PAA y PCC, se muestran en las Tablas 2.11 y 2.12 respectivamente.

Para el cálculo de la carga correspondiente al límite elástico F_Y de cada caso de estudio, se han tomado, dentro del tramo lineal de la gráfica $F-u$ correspondiente al comportamiento elástico, distintos intervalos de registro los cuales han sido ajustados a una recta. De cada probeta se ha tomado el intervalo cuyo ajuste lineal presentaba un coeficiente de regresión (r) mayor o igual a 0.9995.

Tabla 2.11. Parámetros fundamentales de las probetas con entalla tipo PAA.

Probeta	F_Y (kN)	σ_{NY} (GPa)	F_{max} (kN)	σ_{Nmax} (GPa)	k (kN)
PAA0	19.89	0.52	45.62	1.20	182.93
PAA3	13.97	0.64	33.00	1.50	96.37
PAA4	11.20	0.63	27.68	1.57	79.69
PAA7	13.25	1.66	14.42	1.81	37.79

Tabla 2.12. Parámetros fundamentales de las probetas con entalla tipo PCC.

Probeta	F_Y (kN)	σ_{NY} (GPa)	F_{max} (kN)	σ_{Nmax} (GPa)	k (kN)
PCC0	21.19	0.55	51.04	1.32	179.03
PCC3	13.55	0.62	32.90	1.50	96.95
PCC4	11.16	0.62	27.91	1.54	79.20
PCC7	13.23	1.62	15.56	1.91	38.17

La tensión neta de las distintas probetas prismáticas estudiadas se define como la fuerza aplicada (F) dividida entre la sección neta (S) de la misma, es decir, la sección mínima medida entre fondos de entalla.

$$\sigma_N = \frac{F}{S} \quad (2.3)$$

de esta forma se puede definir la tensión neta en el límite elástico como el cociente entre la fuerza correspondiente al límite elástico (F_Y) y la superficie mínima inicial (S_0), medida entre fondos de entalla, o también denominada sección neta.

$$\sigma_{NY} = \frac{F_Y}{S_0} \quad (2.4)$$

En la siguiente Fig. 2.68 se han representado los valores de la fuerza correspondiente al límite elástico para ambos tipos de probetas entalladas y para cada alambre correspondiente a los distintos pasos del proceso de trefilado objeto de estudio de la presente Tesis.

La carga correspondiente al límite elástico a lo largo del proceso, para ambos tipos de probetas entalladas, decrece. Sin embargo, la tendencia es contraria en el alambre de pretensado comercial o último paso del proceso, debido a que éste ha sido sometido a un proceso termo-mecánico de relajación de tensiones posterior al proceso de trefilado.

Por otra parte, la tensión neta correspondiente al límite elástico presenta una tendencia creciente desde el alambroón inicial hasta el alambre de pretensado comercial, Fig. 2.69, para ambos tipos de entalla analizadas. El gran aumento de dicho valor en el último paso del proceso de trefilado es debido a la gran deformación plástica acumulada que posee dicho alambre de pretensado.

Los valores, para ambos tipos de probetas entalladas PAA y PCC, de la carga correspondiente al límite elástico y de la tensión neta correspondiente al mismo son análogos. Obteniéndose además una misma tendencia en los mismos pasos del proceso de trefilado para ambos tipos de entalla mencionadas.

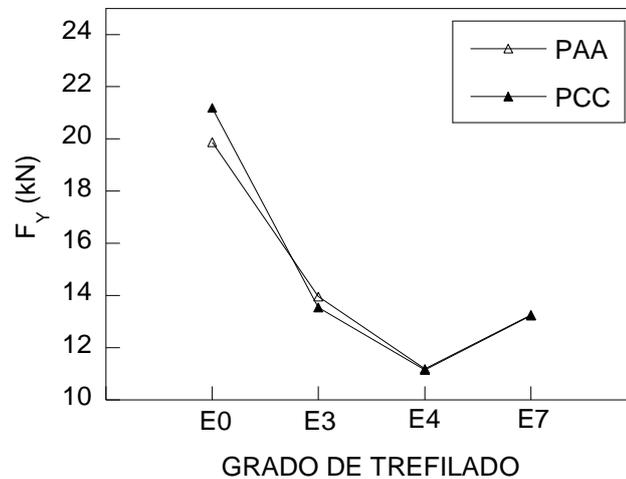


Fig. 2.68. Evolución de la carga correspondiente al límite elástico con el trefilado.

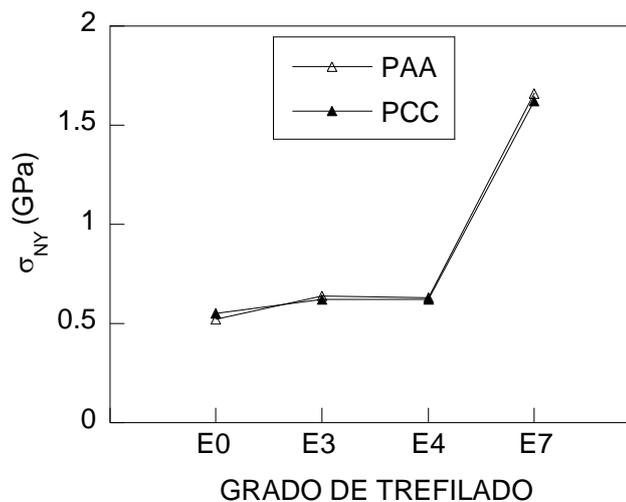


Fig. 2.69. Evolución de la tensión neta correspondiente al límite elástico con el trefilado.

Otro de los parámetros analizados es la carga máxima registrada (F_{\max}) en cada uno de los ensayos realizados. En la siguiente Fig. 2.70 se puede observar como para ambos tipos de entalla, PAA y PCC, a medida que aumenta el proceso de trefilado la carga máxima disminuye, siendo los valores muy similares para los dos tipos de entalla analizados en un mismo paso de trefilado.

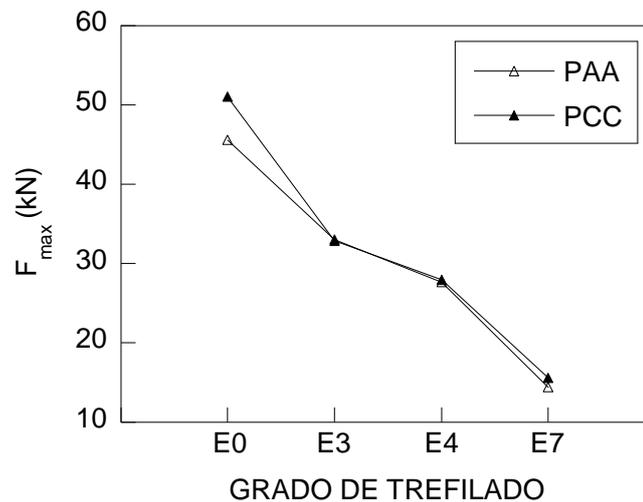


Fig. 2.70. Evolución de la carga máxima con el trefilado.

A partir de la carga máxima, obtenida de cada ensayo, se halla la tensión neta máxima (σ_{Nmax}) siendo ésta el cociente entre dicha carga máxima aplicada en el ensayo y la sección neta inicial de la probeta ensayada. En la siguiente Fig. 2.71 se muestra la variación de la tensión con el grado de trefilado, observándose como a medida que avanza el grado de trefilado aumenta la tensión neta máxima.

$$\sigma_{Nmax} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (2.5)$$

La tendencia creciente mencionada es igual para ambos tipos de entalla, PAA y PCC, analizados. En éste caso se puede observar como las probetas con entalla de tipo PCC tienen una tensión neta superior a las probetas con entallas PAA.

Por último, en el análisis de las curvas $F-u$ también se obtuvo el valor de la rigidez (k) para las distintas probetas estudiadas. Dichas medidas quedan representadas en la siguiente Fig. 2.72, en la cual se observa una tendencia análoga entre los dos tipos de entallas.

El valor de la rigidez decrece a medida que aumenta el grado de trefilado de las probetas ensayadas, esto es debido al aumento de la deformación plástica acumulada y a la redistribución microestructural causa del proceso de trefilado (orientación de las láminas que

conforman las colonias de perlita a favor de la dirección de trefilado, disminución del espaciado interlaminar y aumento de esbeltez de dichas colonias de perlita).

Cabe mencionar que tanto la fuerza correspondiente al límite elástico (F_Y), la tensión neta correspondiente al límite elástico (σ_{NY}), la carga máxima (F_{max}) y la tensión neta máxima (σ_{Nmax}), presentan valores y tendencias similares para ambos tipos de entallas estudiadas, y la diferencia entre los valores de las mismas es mayor cuanto menor es el paso del proceso de trefilado. Por otra parte, también se puede observar una tendencia diferente en la fuerza correspondiente al límite elástico, cuyos valores muestran una tendencia decreciente a excepción del alambre de pretensado comercial. Dicha excepción se presenta para ambos tipos de probetas entalladas, PAA y PCC.

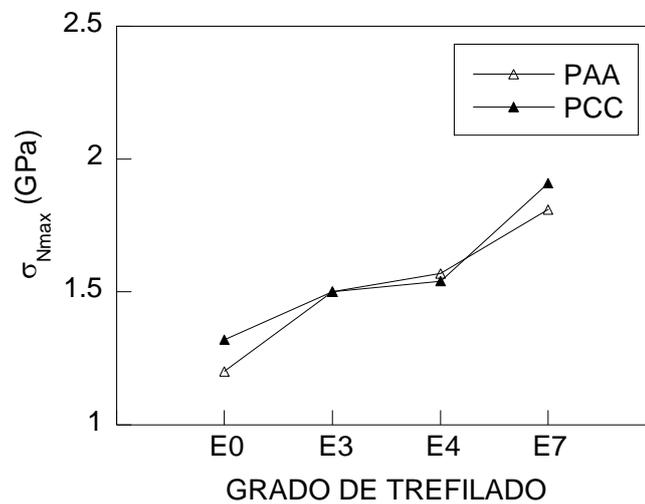


Fig. 2.71. Evolución de la tensión neta máxima con el grado de trefilado.

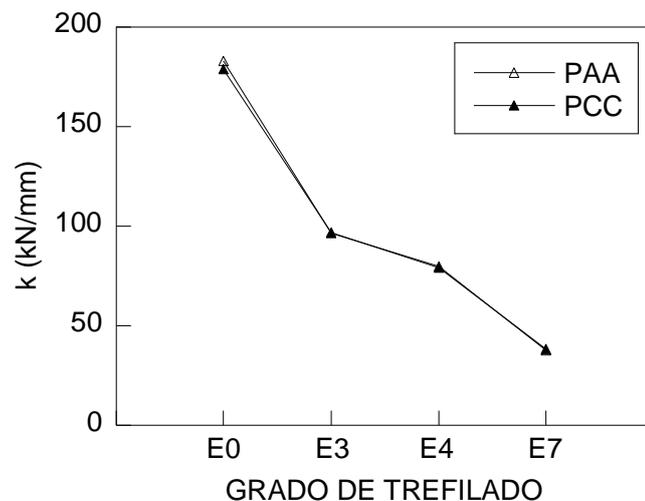


Fig. 2.72. Valores de la rigidez con el trefilado.

7. PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

Para la realización de los ensayos bajo sollicitación de tracción se han utilizado cuatro tipos de probetas, todas ellas mecanizadas a partir de varillas cilíndricas procedentes de una misma colada de acero, familia E, y que han sido sometidas a una cadena de trefilado real compuesta por siete hileras. Los pasos del proceso de trefilado seleccionados para la mecanización de dichas probetas son el alambroón inicial, cuarto paso y el alambre de pretensado, último paso del proceso de trefilado. La selección de estos pasos se ha basado en la deformación plástica acumulada (ε_{eq}^P) que presentan. El cuarto paso tiene una deformación plástica acumulada intermedia entre la nula deformación plástica acumulada del alambroón inicial y la máxima deformación plástica acumulada del alambre de pretensado final. Las probetas poseen una longitud de aproximadamente 30 cm, mientras el diámetro de los alambres corresponde al grado de trefilado al cual pertenecen (Apartado 2).

De cada paso del proceso analizado se han realizado cuatro tipos de entallas distintas. Los diferentes tipos de probetas entalladas se esquematizan a continuación en la Fig. 2.73. Cada tipo de entalla presenta una geometría diferente, éstas se denominarán A, B, C y D, siendo sus características las siguientes:

- ✓ Entalla tipo A: pequeña profundidad y radio de curvatura pequeño.
- ✓ Entalla tipo B: gran profundidad y radio de curvatura pequeño.
- ✓ Entalla tipo C: pequeña profundidad y gran radio de curvatura.
- ✓ Entalla tipo D: gran profundidad y gran radio de curvatura.

Las medidas de las probetas axisimétricas ideales A, B, C y D, esto es sin los errores propios del mecanizado, para cada paso del proceso de trefilado estudiado se muestran en la Tabla 2.13, siendo R el radio de curvatura, C la profundidad de la entalla y ϕ el diámetro nominal del acero de origen correspondiente.

Tabla. 2.13. Medidas de las probetas ideales tipos A, B, C y D.

ϕ (mm)	A		B		C		D	
	R	C	R	C	R	C	R	C
11.030	0.331	1.103	0.551	3.309	4.412	1.103	4.412	3.309
7.490	0.225	0.749	0.374	2.247	2.996	0.749	2.996	2.247
5.040	0.151	0.504	0.252	1.512	2.016	0.504	2.016	1.512

Dichas medidas, R y C , conservan una relación de proporcionalidad con los alambres originales (AYASO, 2001). La geometría seleccionada mantiene la relación entre las siguientes magnitudes adimensionales; profundidad de entalla-diámetro nominal de la probeta (C/ϕ) y radio de curvatura de entalla-diámetro nominal (R/ϕ). La relación de la magnitud adimensional C/ϕ es de valor de 0.3 para los aceros con entallas tipo B y D mientras que para las entallas tipo A y C toma un valor de 0.1. En cuanto a la relación adimensional R/ϕ el valor es 0.4 para las entallas tipo C y D, mientras que para los aceros con entallas tipo A y B es de 0.03 y 0.05 respectivamente.

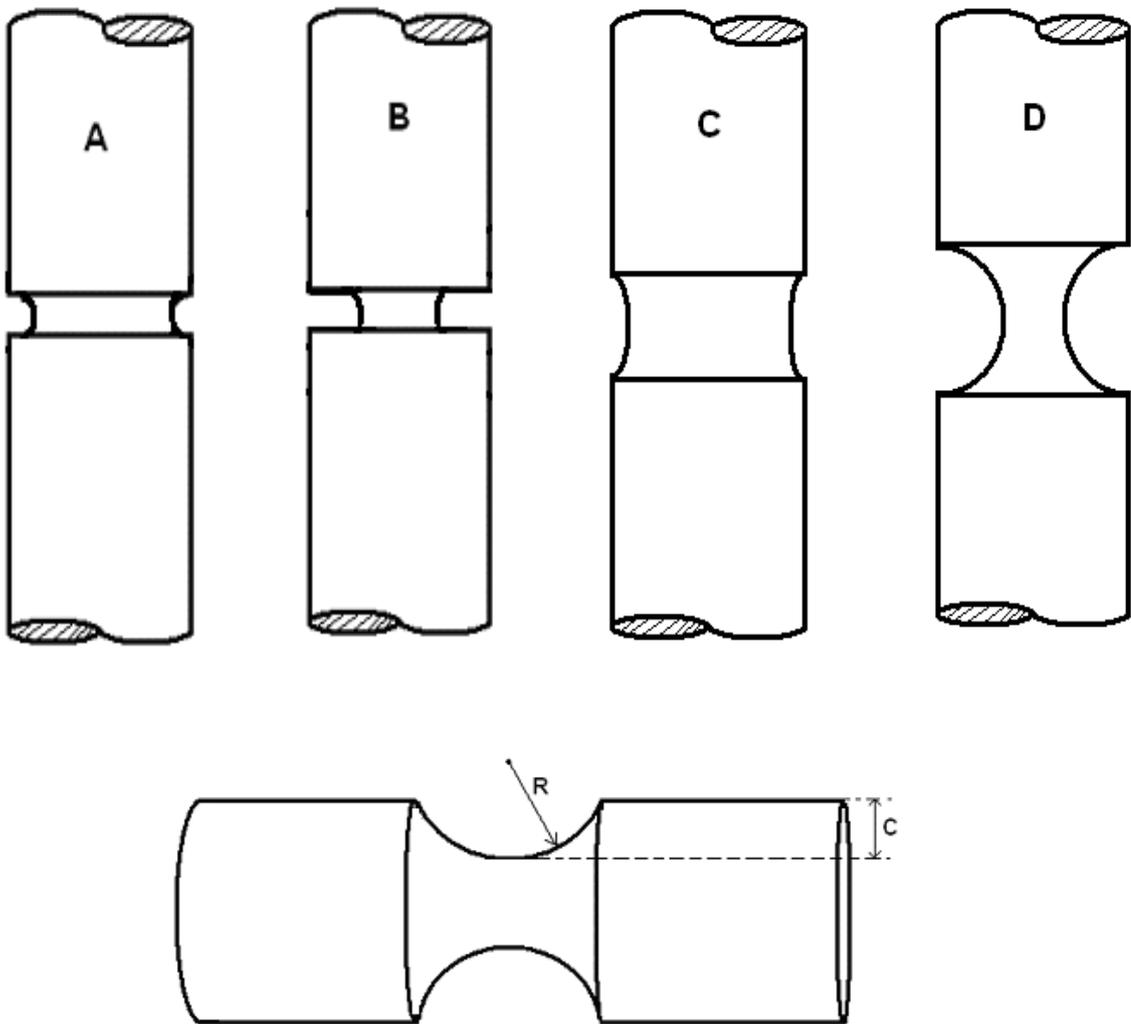


Fig. 2.73. Probetas axisimétricas con entallas de tipo A, B, C y D.

En cuanto a la nomenclatura empleada para la identificación de las diferentes probetas se ha seguido el criterio que se expone a continuación. Cada probeta entallada será identificada con el nombre de la entalla, A, B, C y D, seguida del número que indica el paso de la cadena de trefilado a la cual pertenece, siendo cero el alambroón inicial, cuatro el alambre perteneciente al cuarto paso del proceso de trefilado y siete el alambre de pretensado comercial.

Las probetas mecanizadas se han medido para comprobar el grado de similitud con la probeta ideal. De cada caso de estudio se han realizado tres ensayos nombrándose a las diferentes probetas con un guión seguido de un número que indica la mayor proximidad a las medidas ideales, siendo el uno el que menores variaciones presenta. Dichas medidas de las probetas, con las pequeñas variaciones debidas al proceso de mecanizado, se muestran en el anexo I.

7.1. Equipo experimental y método de ensayo

Los ensayos de las diferentes probetas axisimétricas entalladas de la presente Tesis han sido realizados con el equipo experimental que se encuentra ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela Politécnica Superior de Zamora, perteneciente a la Universidad de Salamanca. En el apartado 2 se hace referencia al equipo experimental empleado en la realización de ensayos bajo sollicitación de tracción, de probetas prismáticas entalladas, y para el posterior análisis fractográfico y micro-fractográfico, el cual es el mismo que el utilizado para la realización de ensayos y análisis de este tipo de probetas axisimétricas entalladas.

Las probetas axisimétricas entalladas han sido sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, hasta rotura total, en la máquina de ensayo servomecánica MTS RF/200. Para ello se han colocado las probetas, de aproximadamente 30cm de longitud, entre las mordazas de la máquina, las cuales están perfectamente alineadas entre sí, este hecho implica que la probeta también se mantenga alineada durante la realización del ensayo y por consiguiente dichas probetas no se vean afectadas por posibles esfuerzos de flexión. En cada probeta, y más concretamente en las proximidades de la entalla, se colocó un extensómetro dinámico axial con una base de medida de 50 mm y otro con base de medida de 25mm. Los extensómetros han sido colocados de tal forma que sus dos cuchillas quedasen equidistantes del centro de la entalla y, a su vez, lo suficientemente alejadas de la entalla para poder registrar el desplazamiento relativo entre puntos de la probeta situados en una zona sometida a un estado uniaxial uniforme. En los ensayos realizados se ha impuesto una velocidad de desplazamiento entre mordazas de 0.01mm/s en las probetas con entallas tipo A, de 0.002mm/s en las de tipo B, de 0.025mm/s en las de tipo C y de 0.005mm/s en las probetas con entalla tipo D, basándonos en estudios previos (AYASO, 2001). Desde el comienzo del ensayo hasta que finaliza el mismo, se registran de forma continua las lecturas correspondientes a la carga aplicada y el desplazamiento registrado por los extensómetros.

De los ensayos de sollicitación bajo tracción de las probetas axisimétricas se ha obtenido la carga F (kN) y el desplazamiento de los extremos del extensómetro en contacto con la probeta

u (mm) en cada momento del ensayo. Posteriormente se muestran los resultados en las gráficas $F-u$.

7.2. Curvas carga-desplazamiento

Se han realizado tres ensayos para cada caso de estudio, es decir de cada tipo de probeta y cada paso del proceso de trefilado estudiado, un total de 36 ensayos. Los registros carga-desplazamiento (curvas $F-u$) obtenidos de los distintos ensayos realizados están reflejados en las siguientes Figs. 2.74-2.79, de tal forma que en cada una de ellas se han representado para cada paso del proceso de trefilado las ternas de los distintos tipos de entalladas ensayadas.

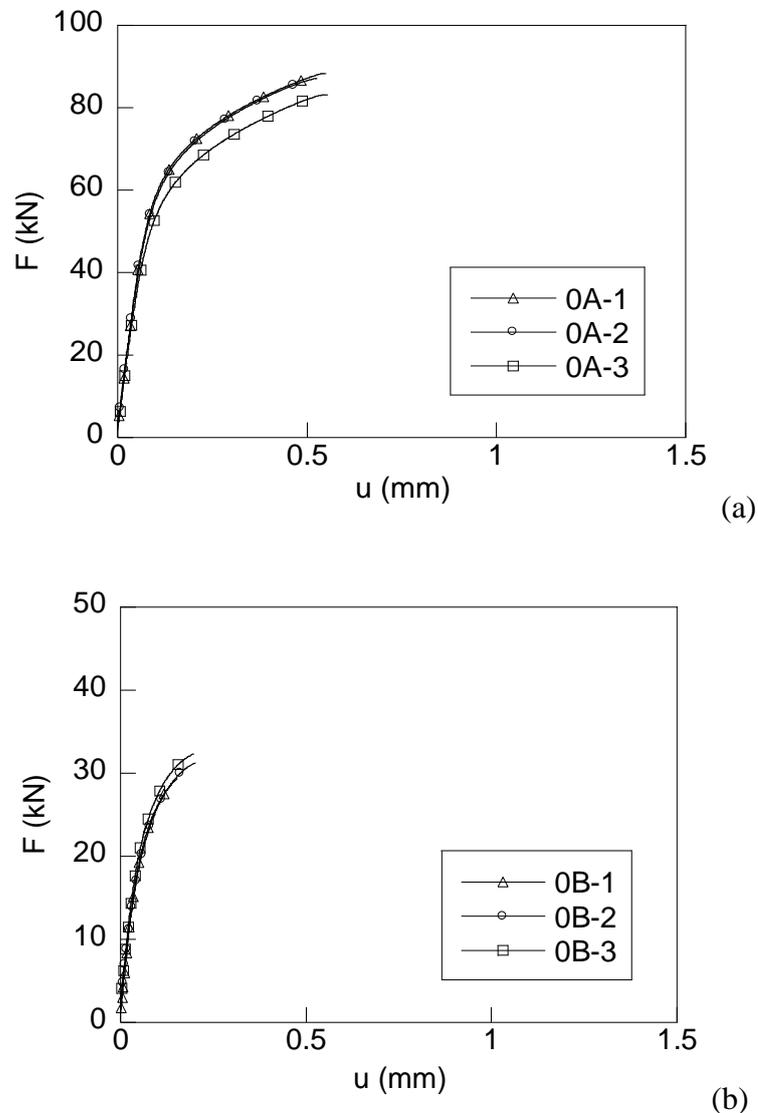


Fig. 2.74. Curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas (a) 0A y (b) 0B.

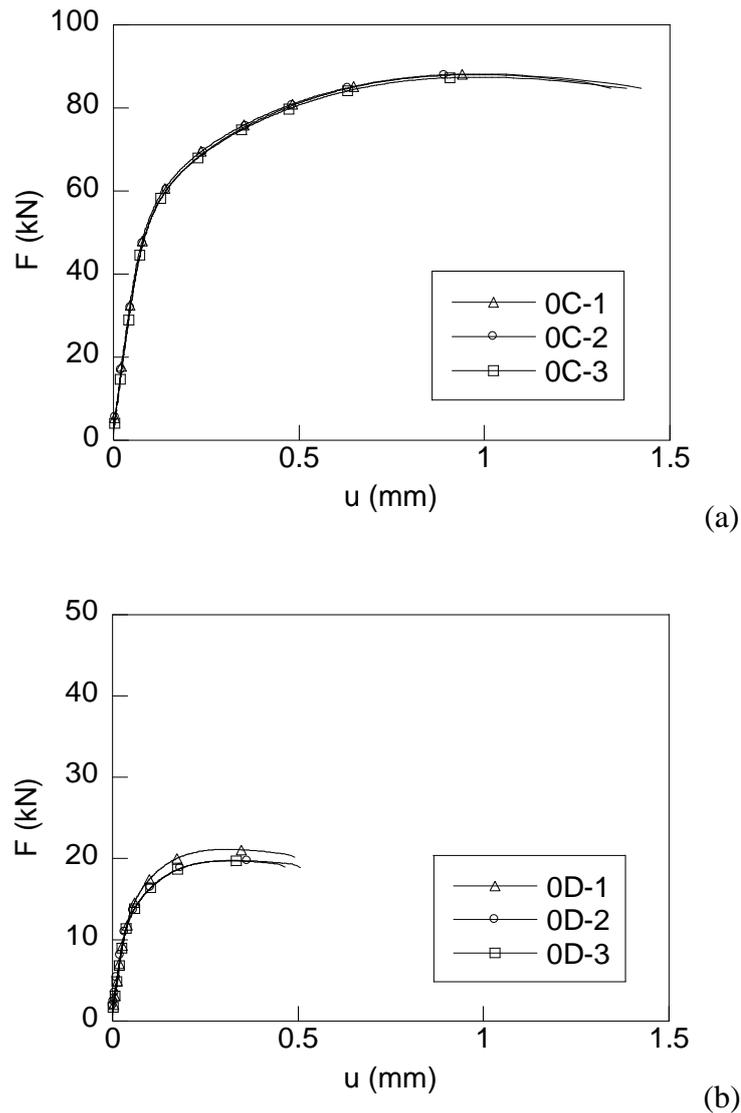


Fig. 2.75. Curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas (a) 0C y (b) 0D.

En las figuras anteriores en las cuales se muestran las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos bajo sollicitación de tracción de las probetas axisimétricas procedentes de la mecanización a partir del alambión inicial, se observa la poca disparidad que presentan las curvas $F-u$ de los diferentes ensayos realizados con el mismo tipo de entalla, es decir entre cada terna. Por otro lado cabe señalar las grandes diferencias existentes entre las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos de los distintos tipos de entalla como en el caso de aquellas correspondientes a los ensayos de las probetas axisimétricas con entallas de tipo A y C, en las cuales las cargas alcanzadas son muy superiores a las presentadas por las probetas de tipo C y D, debido lógicamente a la mayor sección neta que ambos tipos de probetas entalladas poseen. Otra de las diferencias apreciables en las curvas $F-u$ de las figuras anteriores es el mayor desplazamiento presentado en las pertenecientes a las probetas axisimétricas con entalla de tipo C, siendo éste muy superior al obtenido en las curvas de las otras probetas. Por el

contrario las curvas pertenecientes a las probetas con entalla de tipo B presentan un desplazamiento muy inferior al resto de los obtenidos.

Las curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas con entallas de tipo C y D muestran un mayor tramo de régimen plástico, además en ambas se observa un descenso de carga posterior a la carga máxima alcanzada en el ensayo. Éste hecho se debe a que ambos tipo de probetas entalladas, C y D, presentan el radio de curvatura de mayor cuantía, lo cual permite al material deformarse más plásticamente antes de la fractura del mismo. Por el contrario en las curvas $F-u$ de las entallas de tipo A y B la trayectoria de la carga es siempre ascendente hasta alcanzar la carga máxima la cual coincide con la fractura del material.

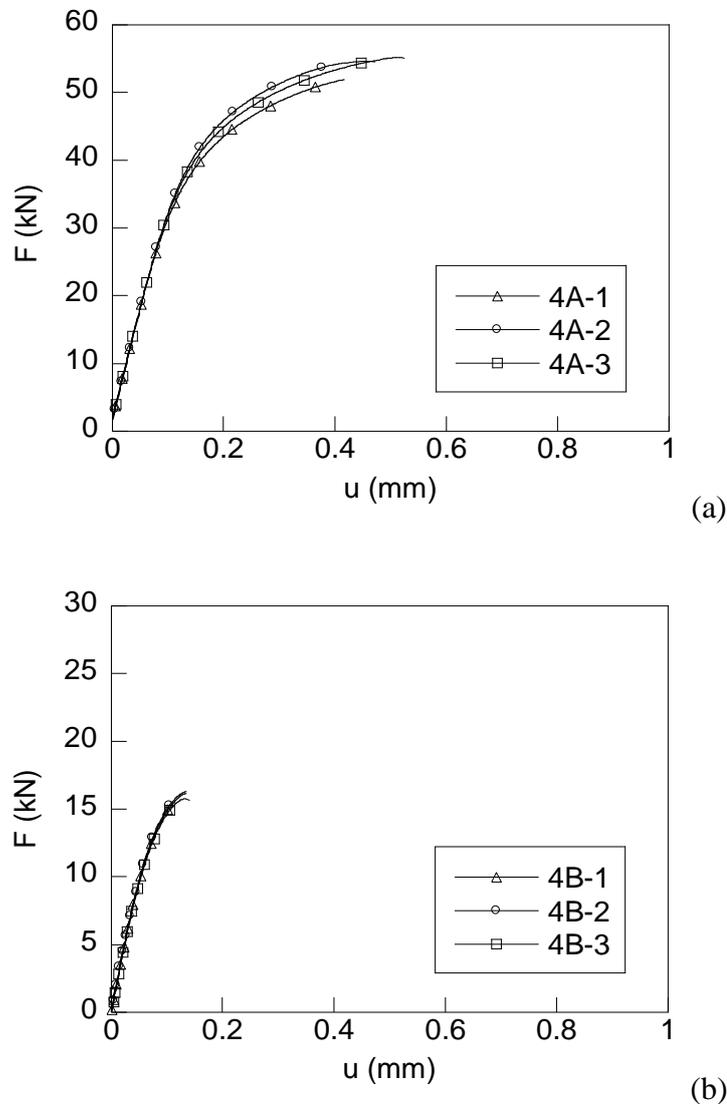


Fig. 2.76. Curvas $F-u$ de las probetas (a) 4A y (b) 4B.

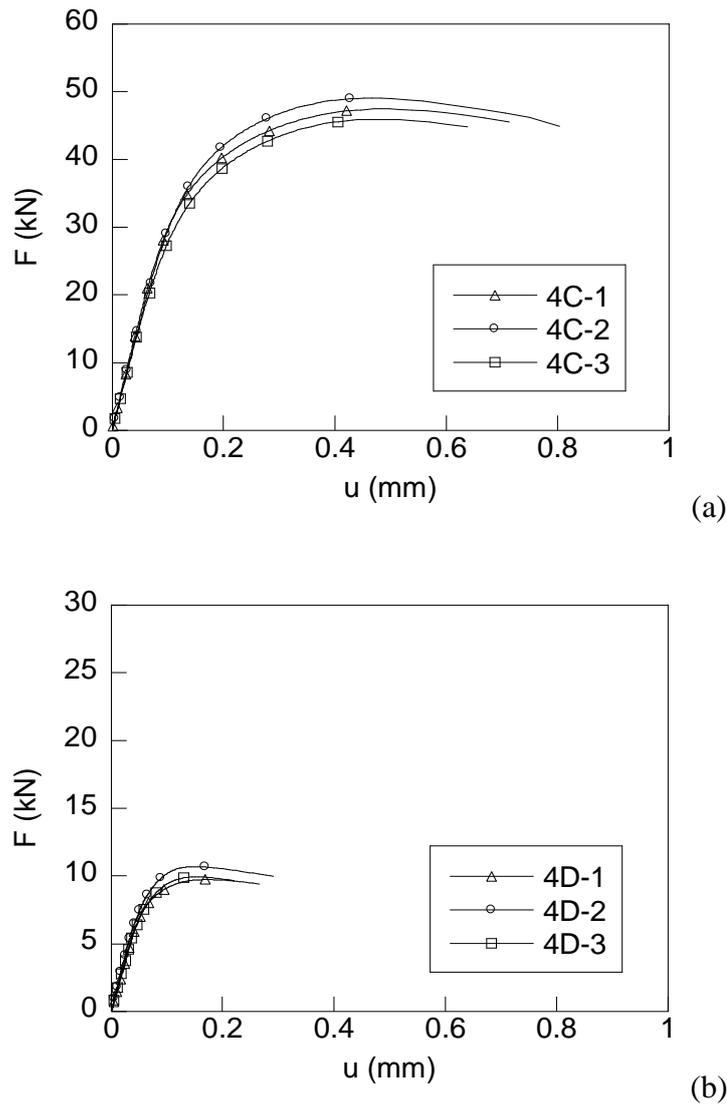


Fig. 2.77. Curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas (a) 4C y (b) 4D.

En las figuras de las curvas $F-u$ pertenecientes a las probetas axisimétricas obtenidas a partir del cuarto paso del proceso de trefilado (Figs.2.76 y 2.77) se puede observar una mayor disparidad entre las distintas curvas obtenidas de los ensayos realizados con el mismo tipo de entalla aunque ésta sigue siendo despreciable.

Como en el caso de las curvas $F-u$ anteriores, pertenecientes al alambrión inicial, se puede observar como las probetas con entallas de tipo A y C presentan mayores cargas y también las curvas $F-u$ de las probetas con entalla de tipo C presentan un mayor desplazamiento previo a la rotura final. De igual forma también se muestra como las probetas con entallas de tipo C y D presentan un descenso de carga antes de la fractura del material, como en el caso anterior producido por el mayor radio de curvatura que éstas presentan.

En el caso de las siguientes figuras en las cuales se representan las curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas entalladas procedentes del alambre de pretensado (Figs. 2.78 y 2.79), último paso de la cadena de trefilado, también se observa un mayor desplazamiento en las pertenecientes a las probetas con entalla de tipo C. Cabe señalar que las mayores cargas se registran para los ensayos de las probetas con entalla de tipo A y C.

La mayor diferencia observable entre este tipo de probetas, procedentes del alambre de pretensado, y las anteriores es el nulo descenso de carga que se registra en los ensayos pertenecientes a las probetas con entalla de tipo C. Sin embargo en las probetas con entalla de tipo D sigue existiendo un leve descenso de carga que precede a la rotura, aunque éste sea prácticamente despreciable frente a los observados anteriormente.

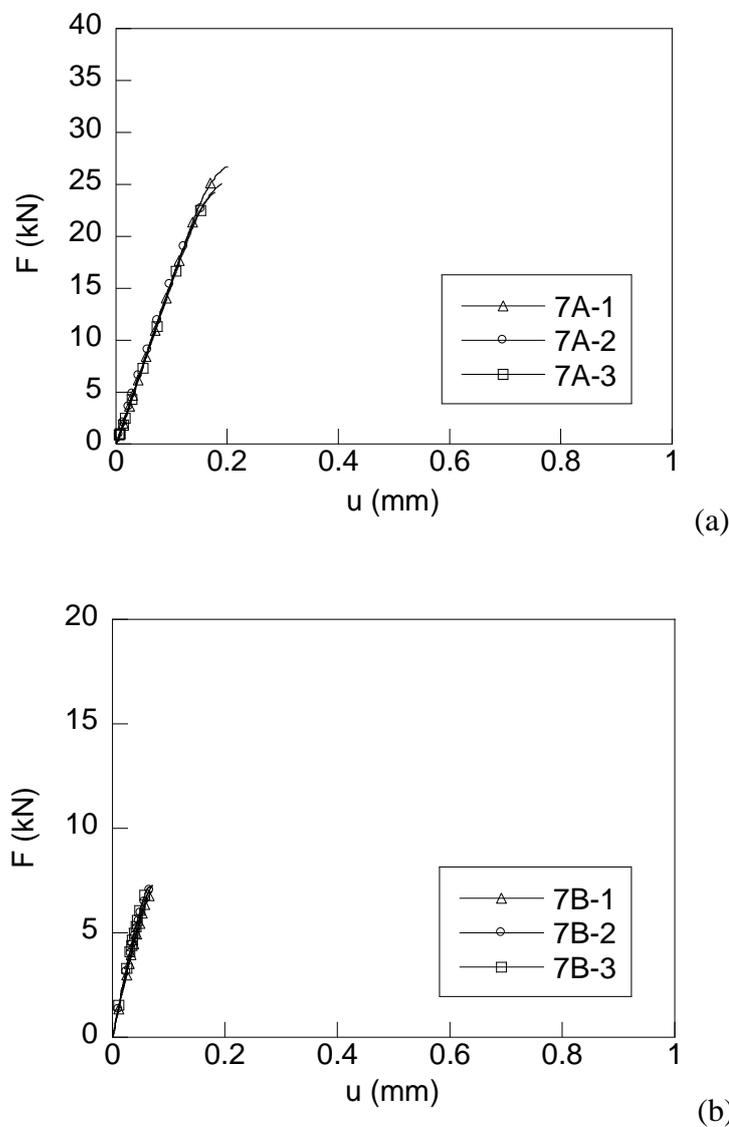


Fig. 2.78. Curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas (a) 7A y (b) 7B.

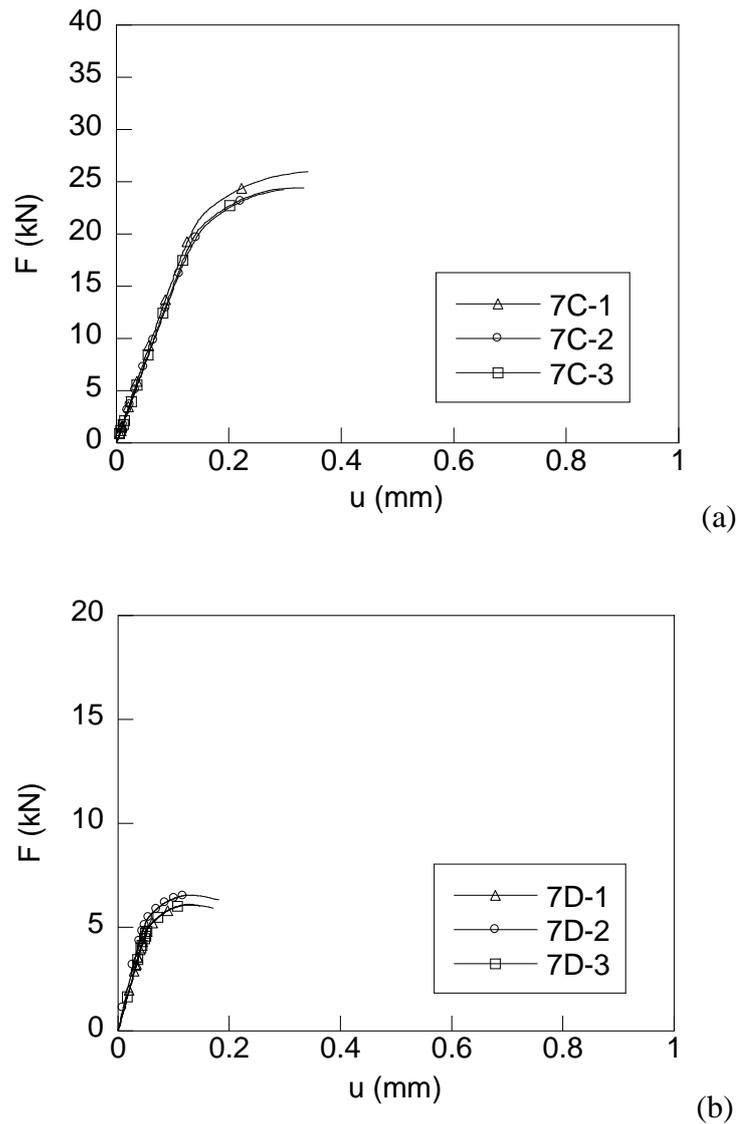


Fig. 2.79. Curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas (a) 7C y (b) 7D.

Para poder analizar la evolución de las curvas $F-u$ obtenidas con el mismo tipo de probetas entalladas para cada alambre procedente de los distintos pasos del proceso de trefilado, alambión inicial, cuarto y último paso del mismo, se han realizado las siguientes Figs. 2.80-2.81, en las cuales se ha representado dichas curvas intermedias de las probetas pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado de un mismo tipo de entalla. Para las curvas representadas pertenecientes a los alambres de los distintos pasos del proceso de trefilado se ha observado una evolución análoga para todos los tipos de entalla analizados en la cual a medida que aumenta el grado de trefilado se produce una reducción de carga así como una disminución de longitud. Cabe señalar que en las curvas $F-u$ pertenecientes a las probetas con entallas de tipo A y B se produce un ascenso de carga hasta rotura, por el contrario las probetas con entallas de tipo C y D muestran dicho descenso de carga previa a rotura a excepción de las curvas pertenecientes al último paso de la cadena de trefilado.

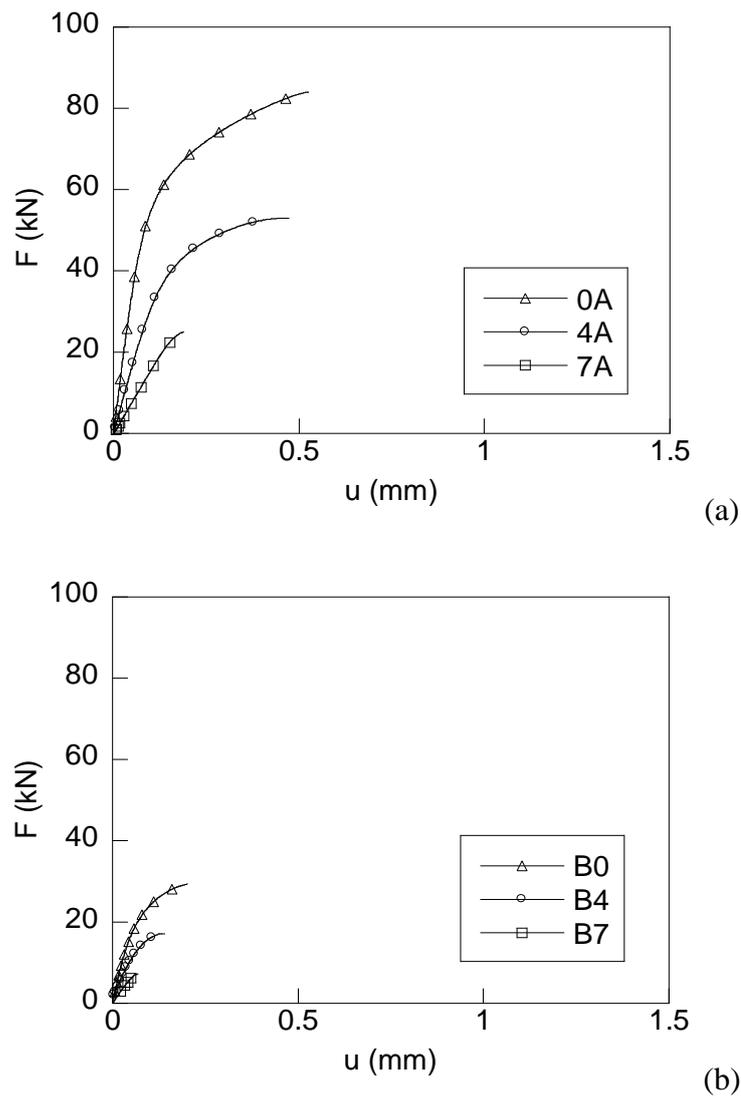


Fig. 2.80. Curvas $F-u$ de las probetas axisimétricas con entallas tipo (a) A y (b) B mecanizadas a partir de los alambres de los distintos pasos de la cadena de trefilado.

Dentro del análisis de las curvas $F-u$ se ha obtenido la carga correspondiente al límite elástico (F_Y), la carga máxima (F_{max}), la tensión neta correspondiente al límite elástico (σ_{NY}), la tensión neta correspondiente a la carga máxima (σ_{Nmax}) y los valores correspondientes a la rigidez (k), para cada caso de estudio. Las medidas obtenidas para todos los tipos de entallas, A, B, C y D, se muestran en la Tabla 2.14.

Para el cálculo de la carga correspondiente al límite elástico F_Y de cada caso de estudio, se han tomado, dentro del tramo lineal de la gráfica $F-u$ correspondiente al comportamiento elástico, distintos intervalos de registro los cuales han sido ajustados a una recta. De cada probeta se ha tomado el intervalo cuyo ajuste lineal presentaba un coeficiente de regresión (r) mayor o igual a 0.9995.

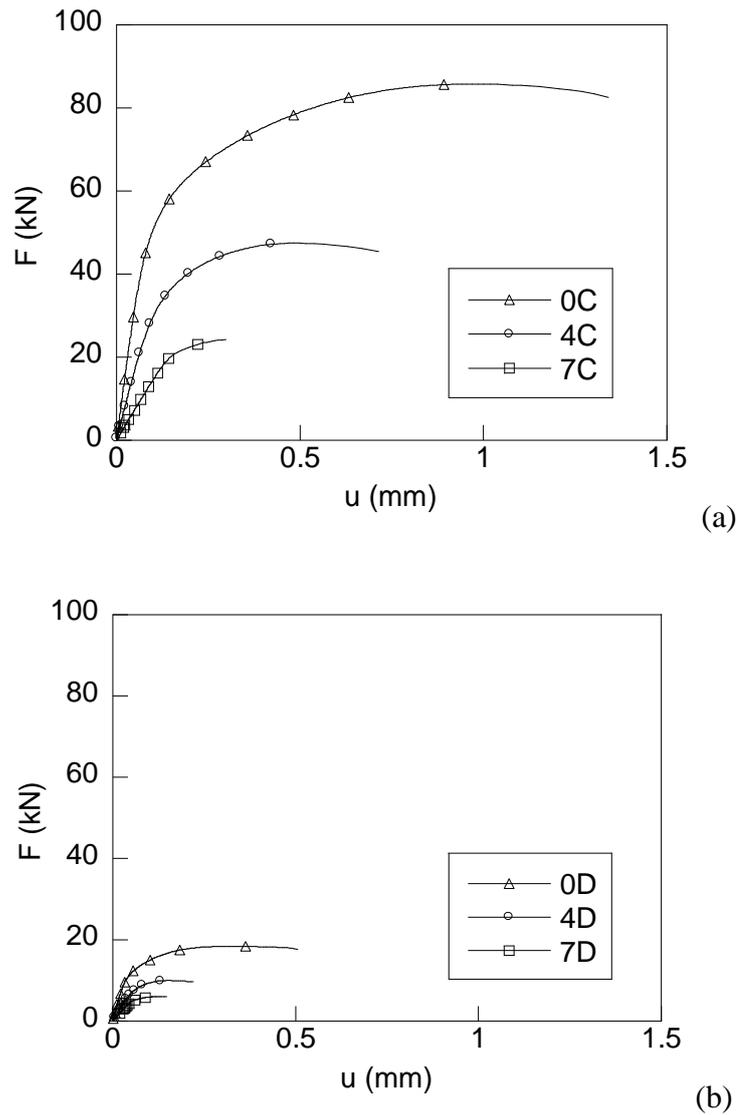


Fig. 2.81. Curvas F - u de las probetas axisimétricas con entallas tipo (a) C y (b) D mecanizadas a partir de los alambres de los distintos pasos de la cadena de trefilado.

Tabla 2.14. Parámetros de las probetas axisimétricas con entalla tipo A, B, C y D.

Probeta	F_Y (kN)	σ_{NY} (GPa)	F_{max} (kN)	σ_{Nmax} (GPa)	k (kN/mm)
A0	34.75	0.58	84.02	1.39	694.02
A4	28.58	0.99	52.88	1.83	318.30
A7	23.92	1.83	25.05	1.92	151.47
B0	16.62	0.99	29.37	1.75	338.31
B4	10.714	1.48	17.09	2.37	175.16
B7	5.21	1.57	7.21	2.17	125.82

Tabla 2.14.bis. Parámetros de las probetas axisimétricas con entalla tipo A, B, C y D.

Probeta	F_Y (kN)	σ_{NY} (GPa)	F_{max} (kN)	σ_{Nmax} (GPa)	k (kN/mm)
C0	34.15	0.56	85.77	1.40	648.00
C4	24.95	0.89	47.46	1.74	327.30
C7	19.83	1.65	24.24	2.02	141.59
D0	8.97	0.59	18.45	1.28	306.59
D4	6.09	1.01	9.94	1.65	143.74
D7	4.75	1.44	6.09	2.01	96.73

En la siguiente Fig. 2.82 se han representado los valores de la fuerza correspondiente al límite elástico para todos los tipos de probetas entalladas analizadas, A, B, C y D, y para cada alambre correspondiente a los distintos pasos del proceso de trefilado, alambre inicial, cuarto paso del proceso y alambre de pretensado.

La carga correspondiente al límite elástico a lo largo del proceso, para todos tipos de probetas entalladas, decrece. Se observa como los valores F_Y de las probetas con entalla de tipo A y C son similares para los alambres pertenecientes al mismo paso del proceso de trefilado.

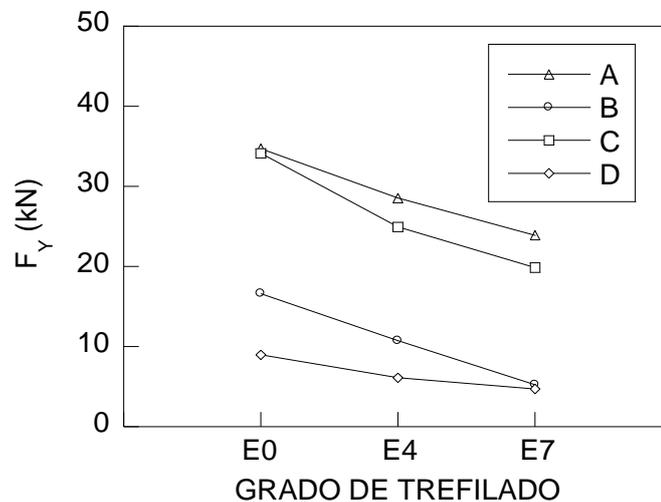


Fig. 2.82. Evolución de la carga correspondiente al límite elástico con el trefilado.

Por otra parte, la tensión neta correspondiente al límite elástico (2.4) presenta una tendencia creciente desde el alambre inicial hasta el alambre de pretensado comercial, Fig. 2.83, para todos los tipos de entalla analizados. El gran aumento es debido a la gran deformación plástica acumulada a lo largo del proceso de trefilado.

Para las entallas de tipo A y C los valores de la carga correspondiente al límite elástico y de la tensión neta correspondiente al mismo son análogos. Sin embargo en el caso del parámetro F_Y los valores correspondientes a las entallas de tipo B y D son bastante menores al resto. Por otra parte los valores de la tensión neta correspondiente al límite elástico son muy similares para el mismo grado de trefilado en todas las entallas objeto de estudio, pudiéndose observar un ligero aumento de los mismos para los correspondientes a la entalla de tipo B.

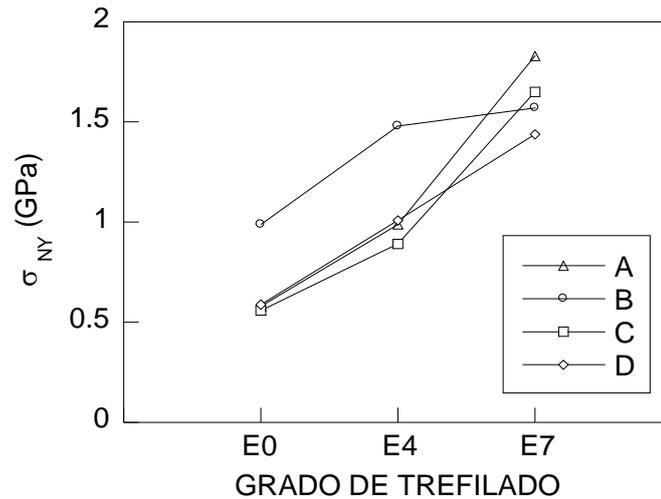


Fig. 2.83. Evolución de la tensión neta correspondiente al límite elástico con el trefilado.

Otro de los parámetros analizados es la carga máxima registrada (F_{max}) en cada uno de los ensayos realizados. En la siguiente Fig. 2.84 se puede observar como para todos los tipos de entalla estudiados, A, B, C y D, a medida que aumenta el proceso de trefilado la carga máxima disminuye. Además en dicho gráfico se muestra como los valores correspondientes a las entallas de tipo A y C son muy similares para cada paso del proceso analizado, al igual que los pertenecientes a las entallas de tipo B y D, siendo en éstas últimas mucho menores.

A partir de la carga máxima, obtenida de cada ensayo, se halla la tensión neta máxima (σ_{Nmax}) siendo ésta el cociente entre dicha carga máxima aplicada en el ensayo y la sección neta inicial de la probeta ensayada (2.5). En la siguiente Fig. 2.85 se muestra la variación de la tensión con el grado de trefilado, observándose como a medida que avanza el grado de trefilado aumenta la tensión neta máxima. Una de las excepciones a dicho aumento de la tensión neta máxima con el grado de trefilado se produce en la probeta 7B debido al reducido tamaño de la superficie neta de la entalla. Se observa que los valores de la tensión máxima son muy similares en todos los tipos de entallas analizadas, pero al igual que sucedía en el caso de la tensión neta correspondiente al límite elástico, en el caso de la entalla de tipo B se muestran valores ligeramente superiores.

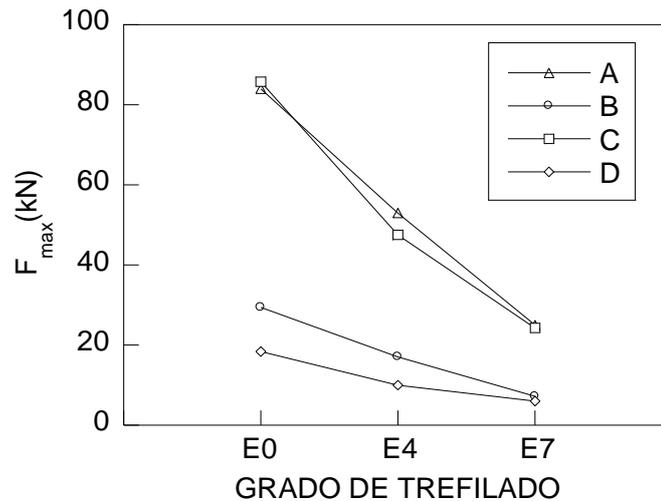


Fig. 2.84. Evolución de la carga máxima con el trefilado.

Cabe señalar que tanto en el caso de la tensión neta correspondiente al límite elástico como en la máxima, la diferencia entre los valores de los alambres consecutivos analizados es muy similar, esto es debido a que entre ellos existe una diferencia de deformación plástica semejante siendo el alambre perteneciente al cuarto paso del proceso el que posee la deformación plástica intermedia entre el alambroón inicial y el alambre de pretensado.

Por último, en el análisis de las curvas $F-u$ también se obtuvo el valor de la rigidez (k) para las distintas probetas estudiadas. Dichas medidas quedan representadas en la siguiente Fig. 2.86, en la cual se observa una tendencia análoga entre los dos tipos de entallas.

El valor de la rigidez obtenido disminuye a medida que aumenta el grado de trefilado de las probetas ensayadas, esto es debido al aumento de la deformación plástica acumulada y a la redistribución micro-estructural causa del proceso de trefilado (orientación de las láminas que conforman las colonias de perlita a favor de la dirección de trefilado, disminución del espaciado interlaminar y aumento de esbeltez de dichas colonias de perlita).

Cabe mencionar que tanto la fuerza correspondiente al límite elástico (F_Y), la tensión neta correspondiente al límite elástico (σ_{NY}), la carga máxima (F_{max}) y la tensión neta máxima (σ_{Nmax}), presentan tendencias similares para todos los tipos de entalla estudiados.

Los valores de los parámetros fundamentales obtenidos son similares en los casos de σ_{NY} y σ_{Nmax} , y para el resto de los parámetros, F_Y , F_{max} y k , los valores son muy semejantes entre las entallas de tipo A y C (igual profundidad) y entre las de tipo B y D (idéntico radio) respectivamente.

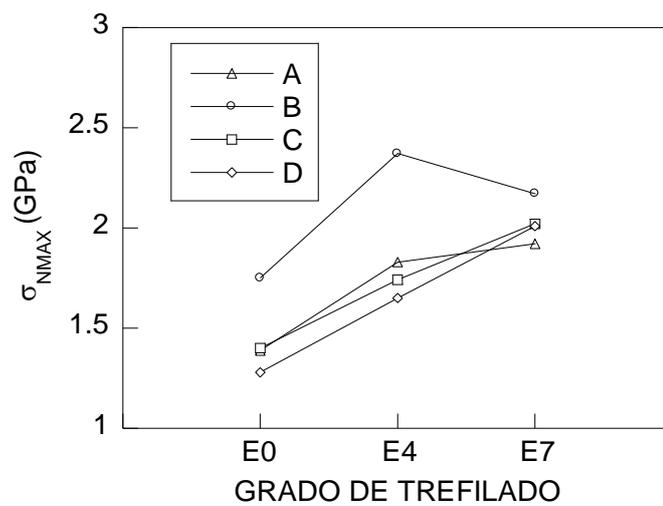


Fig. 2.85. Evolución de la tensión neta máxima con el grado de trefilado.

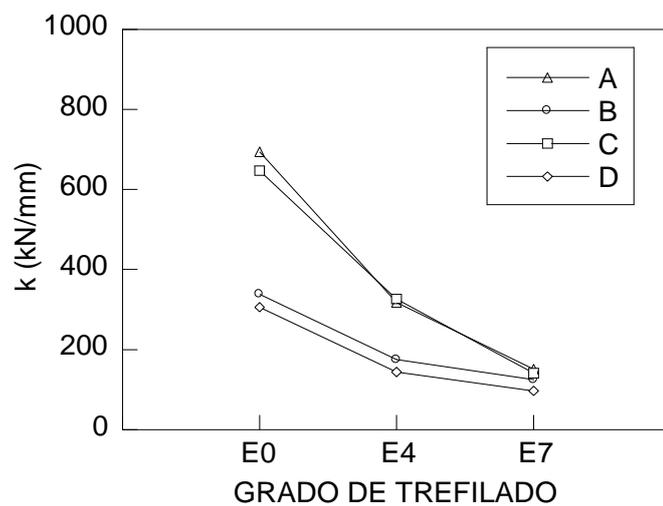


Fig. 2.86. Valores de la rigidez con el trefilado.

8. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS

Para la realización de los ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos se han utilizado dos tipos de probetas entalladas las cuales han sido mecanizadas a partir de alambres procedentes de una cadena real de trefilado pertenecientes a una familia de aceros denominada E (véase apartado 2). Los pasos de la cadena de trefilado seleccionados para la mecanización de las probetas han sido; el alambroón inicial (alambre sin trefilar), el tercer y cuarto paso del proceso y el alambre de pretensado comercial (resultado final del proceso): La elección de estos pasos se ha basado en la deformación plástica acumulada (ε^P_{acum}) en los mismos durante el proceso de trefilado, correspondiendo el valor medio de ésta al tercer y cuarto paso del proceso.

A partir de las muestras cilíndricas procedentes de los distintos pasos del proceso de trefilado objeto de estudio se han realizado mecanizados obteniéndose muestras prismáticas proporcionales a éstos diámetros de partida. En el presente estudio se han utilizado probetas prismáticas entalladas, con dos tipos de entallas distintas denominadas PA y PC con las geometrías mostradas en la Fig. 2.87. La nomenclatura utilizada para identificar los alambres analizados consta de una letra (en este caso acero tipo E), que identifica la composición del acero, y de un número representativo del paso de trefilado al que pertenece el alambre en cuestión: el número 0 para el alambroón inicial, 7 para el producto final, y los números del 3 y 4 para identificar los alambres correspondientes a los dos pasos intermedios del proceso.

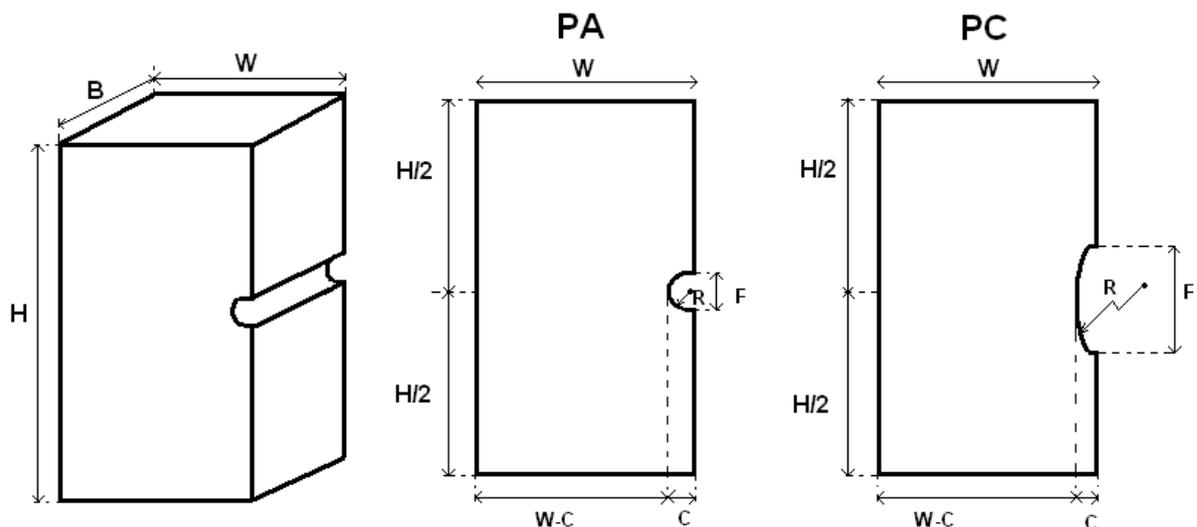


Fig. 2.87. Esquema de probetas con geometría de entalla PA y PC.

Las medidas de las probetas prismáticas entalladas ideales PA y PC, esto es, sin los errores propios del mecanizado, para cada paso del proceso de trefilado estudiado se muestran en la Tablas 2.15-2.16, siendo B el espesor de la entalla, C la profundidad, R el radio de curvatura y F la distancia entre extremos de la entalla o abertura de la misma. Dichas medidas conservan una relación de proporcionalidad con los alambres originales, de sección circular, manteniendo constante las siguientes relaciones $B/\phi = 0.375$, $W/\phi = 0.75$, $C/\phi \cong 0.14$, $R/\phi = 0.05$ en las PA y $R/\phi = 0.55$ en las PC para todo grado de trefilado, siendo C la profundidad de la entalla, R el radio de curvatura, B el espesor de la probeta, W la anchura de la misma y ϕ el diámetro del alambre correspondiente a cada paso de trefilado. La longitud de éstas para cada tipo de entalla y paso del proceso analizado se mantiene constante, $H = 90$ mm.

De cada caso de estudio se han realizado tres ensayos nombrándose a las diferentes probetas con un guión seguido de un número que indica el grado de similitud con la probeta ideal, siendo el uno el que menores variaciones presenta. Las medidas de las distintas probetas se han realizado con la ayuda del proyector de perfiles NIKON. Dichas medidas, con las pequeñas variaciones debidas al proceso de mecanizado, se muestran en el anexo I.

Tabla 2.15. Medidas ideales de las probetas PA.

ϕ (mm)	B	W	C	R	F
11.030	4.136	8.272	1.636	0.561	1.121
8.210	3.080	6.157	1.221	0.417	0.835
7.490	2.809	5.617	1.111	0.381	0.761
5.040	1.890	3.780	0.748	0.256	0.512

Tabla 2.16. Medidas ideales de las probetas PC.

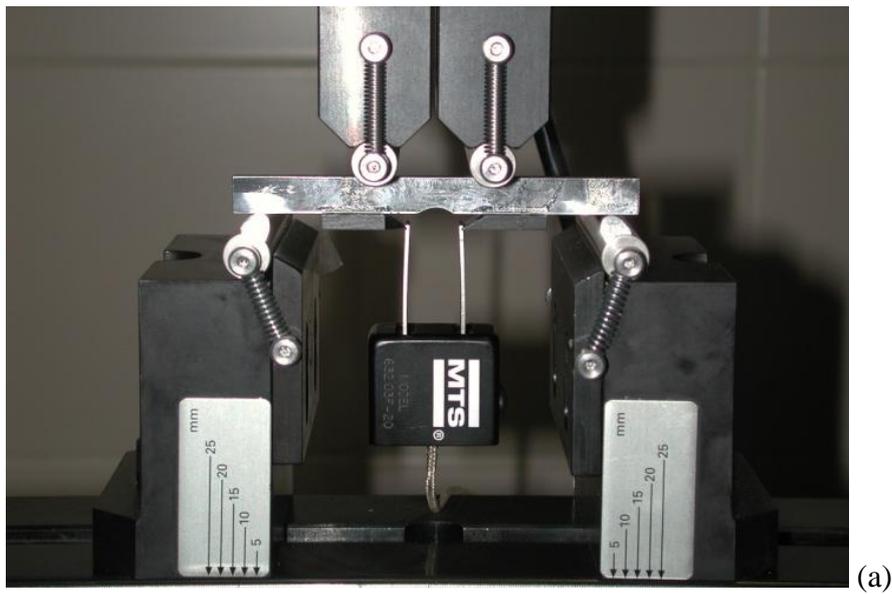
ϕ (mm)	B	W	C	R	F
11.030	4.136	8.272	1.544	6.030	8.061
8.210	3.080	6.157	1.149	4.488	6.000
7.490	2.809	5.617	1.049	4.094	5.474
5.040	1.890	3.780	0.706	2.755	3.683

8.1. Equipo experimental y método de ensayo

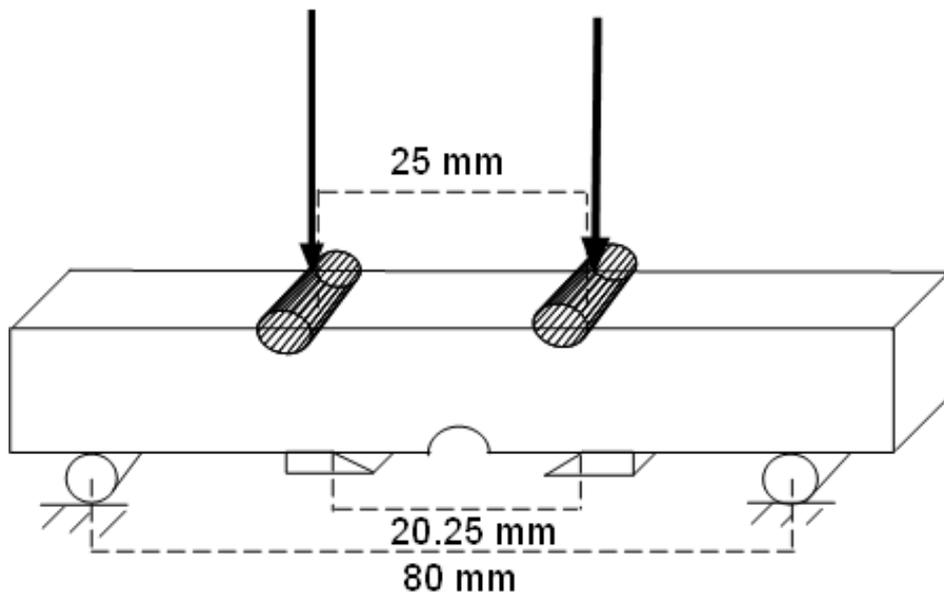
El equipo experimental utilizado para la realización de ensayos de flexión es el mismo que se ha utilizado para la realización de los ensayos mecánicos anteriores con la salvedad de que en éstos solo se ha utilizado una de las máquinas de ensayo, universal servomecánica MTS modelo Alliance RT/100 con una célula de carga de 100 kN de capacidad, y en vez de utilizar

los extensómetros dinámicos axiales se han realizado las mediciones de desplazamientos con un COD acoplado con cuchillas de forma equidistante al centro de entalla, Fig. 2.88. El COD es de la marca MTS modelo 632.03F-20.

Ambos tipos de muestras entalladas han sido sometidos a ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos. Dichos ensayos se han realizado bajo control de velocidad de desplazamiento imponiendo una velocidad de desplazamiento de puente de 0.01 mm/s en las probetas de tipo PA y de 0.025 mm/s en las probetas de tipo PC.



(a)



(b)

Fig. 2.88. (a) Ensayo bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos, (b) esquema del mismo.

La distancia entre los extremos de las cuchillas dónde se fija el COD es de 12 mm, siendo la distancia entre apoyos de las cuchillas 20.25 mm, como se observa en el esquema anterior. Para los ensayos de las probetas tipo PC y PA se ha diseñado una estructura que impide el movimiento de los rodillos, debido a la excesiva deformación que presentan dichas probetas. En todos los ensayos se han adherido las cuchillas a la probeta utilizando super glue-3, puesto que no era posible atornillarlas en probetas cuya sección era inferior al mismo tornillo, claro ejemplo son las probetas pertenecientes al acero de pretensado.

Una vez realizados los ensayos de flexión por cuatro puntos de estas probetas prismáticas entalladas se ha procedido a la realización del estudio fractográfico y micrográfico, siguiendo para el segundo de ellos el procedimiento experimental de corte transversal, embutición, pulido y atacado ya mencionado en el apartado 3 de la presente Tesis, y necesario para la posterior observación en el MEB.

8.2. Curvas carga-desplazamiento

Se han realizado tres ensayos para cada caso de estudio, es decir de cada tipo de probeta y cada paso del proceso de trefilado estudiado, un total de 24 ensayos hasta fractura.

Los registros carga-desplazamiento (curvas $F-u$) obtenidos de los distintos ensayos realizados están reflejados en las siguientes Figs. 2.89-2.93 de tal forma que en cada una de ellas se han representado para cada paso del proceso de trefilado las ternas de los distintos tipos de probetas prismáticas entalladas ensayadas.

Cabe señalar que en algunos casos no se muestran las curvas de todas las probetas que conforman las ternas, esto es debido a los fallos producidos por caída del extensómetro durante la realización del ensayo. Además de las cargas y el desplazamiento registrado por COD también se han adquirido los datos de desplazamiento del puente durante el ensayo, éstos quedan recogidos en el anexo II.

En las curvas carga-desplazamiento obtenidas a partir de los ensayos de flexión por cuatro puntos de las probetas prismáticas mecanizadas a partir del alambión inicial se puede observar la gran diferencia entre el comportamiento de las probetas con entalla de tipo A y de tipo C.

Las probetas prismáticas con entalla de tipo A soportan menores cargas, antes de la fractura, que las entallas de tipo C sin embargo el hecho más significativo, el cual también se producía en otras probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción con entallas de gran radio

de curvatura, es la gran deformación plástica asumida por las probetas con entalla de tipo C antes de la fractura.

Las probetas entalladas, con gran radio de curvatura, además presentan un descenso de carga antes de la fractura por separación total de superficies. De igual forma que sucede con las curvas carga-desplazamiento (COD) en las probetas prismáticas procedentes de alambrón inicial en el caso de las probetas realizadas a partir del alambre del tercer paso del proceso de trefilado también se ha observado una gran diferencia entre las probetas PA3 y PC3.

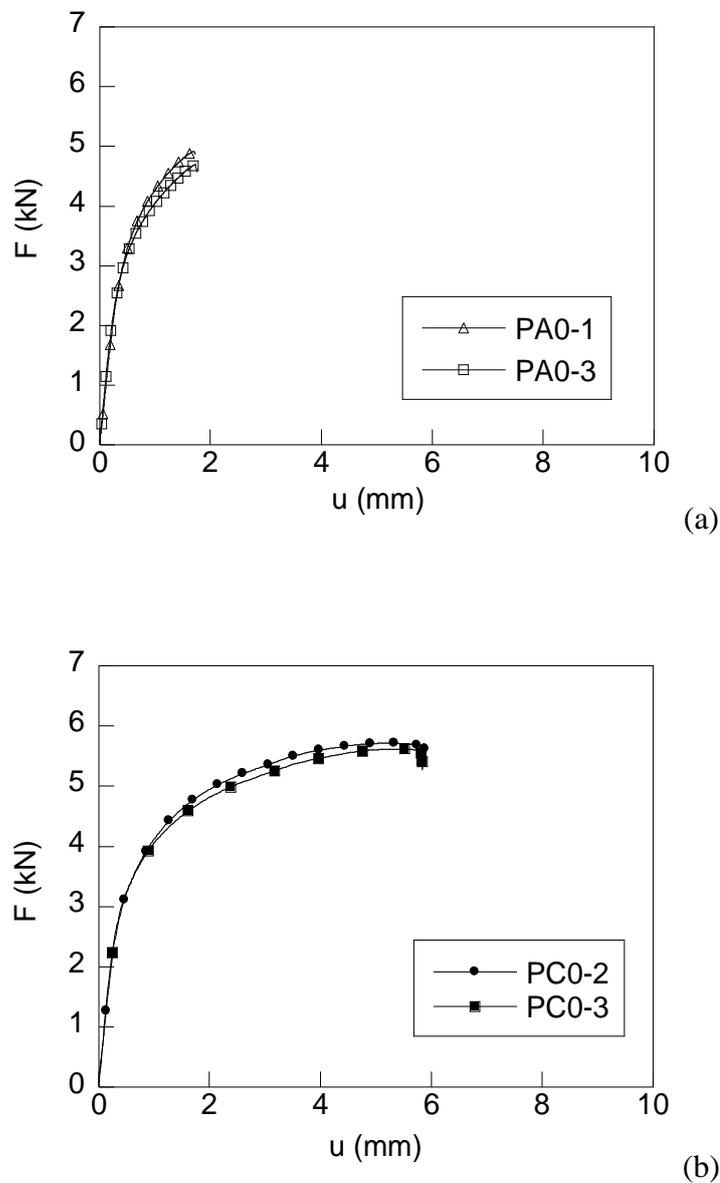


Fig. 2.89. Curvas carga-desplazamiento de las probetas (a) PA0 y (b) PC0.

En cuanto a las curvas $F-u$, de las probetas PA3 y PC3 (tercer paso del trefilado), las probetas PA3 presentan las mayores cargas, además se puede observar la gran deformación plástica sufrida por las probetas PC3 y el descenso de carga que en este tipo de probetas entalladas se produce antes de la fractura del material, Fig. 2.90.

En las probetas mecanizadas a partir del alambre del cuarto paso de trefilado (probetas PA4 y PC4) también se han podido observar las diferencias anteriormente comentadas para los dos tipos de entallas analizados. Las probetas PA4 y PC4 soportan, como era de esperar, menores cargas que las probetas anteriores. Sin embargo el descenso de carga mostrado por las probetas tipo PC4 es igual de significativo que el mostrado por las probetas PC0 y PC3.

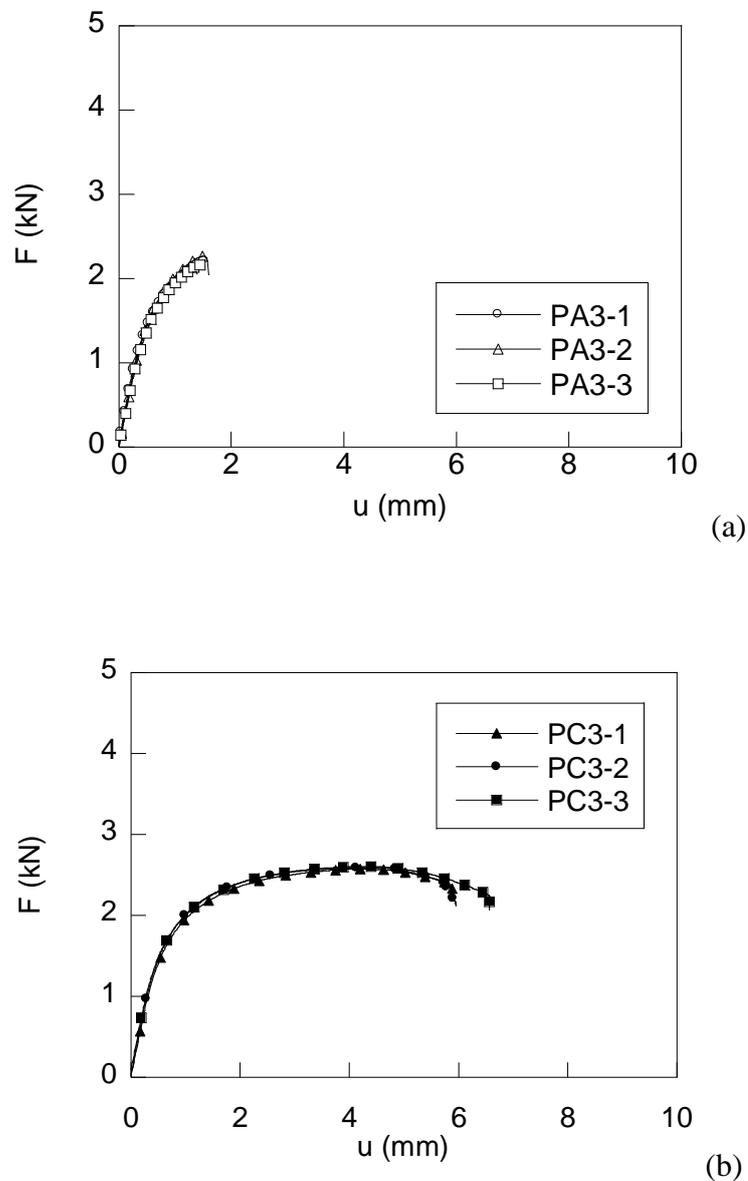


Fig. 2.90. Curvas carga-desplazamiento de las probetas (a) PA3 y (b) PC3.

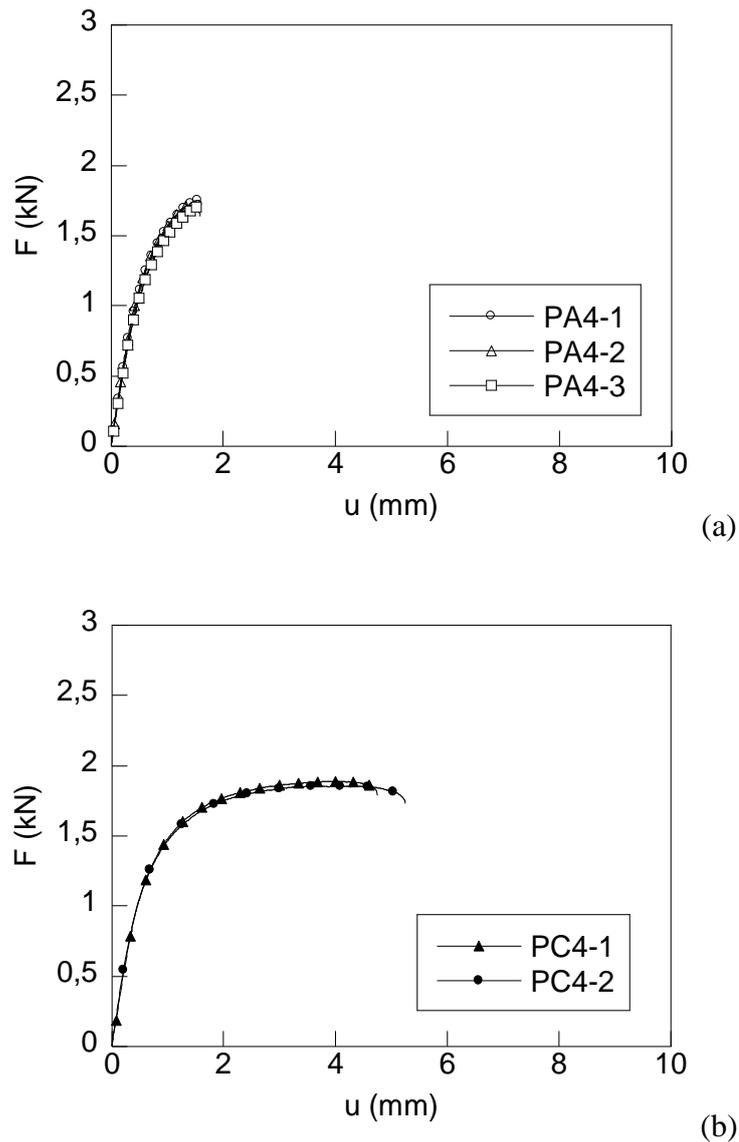


Fig. 2.91. Curvas carga-desplazamiento de las probetas (a) PA4 y (b) PC4.

Las curvas $F-u$ obtenidas de las probetas prismáticas entalladas mecanizadas a partir del alambre de pretensado comercial (PA7 y PC7), Fig. 2.92, muestran mayores valores de carga para las probetas con entalla tipo A, igual que en el resto de las probetas con este mismo tipo de entalla para los distintos alambres de los diferentes pasos ensayados.

Como hecho a destacar la mayor deformación plástica asumida por las probetas PC7, y el descenso de carga que éstas experimentan previo a la fractura final por separación total de superficies, al igual que las anteriormente analizadas [Fig. 2.92 (b)].

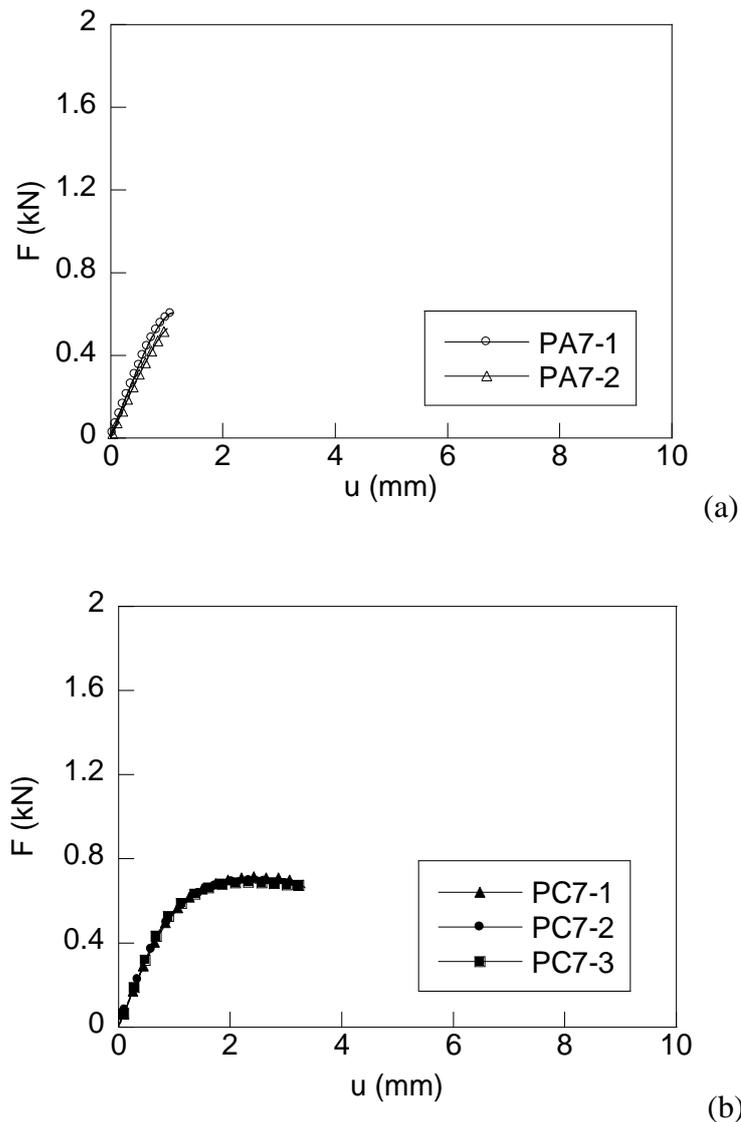


Fig. 2.92. Curvas carga-desplazamiento de las probetas (a) PA7 y (b) PC7.

En la siguiente Fig. 2.93 se muestra la comparativa de todas las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos de las probetas prismáticas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos. En ésta se ha representado la curva intermedia de las ternas analizadas para los distintos alambres de los diferentes pasos del proceso de trefilado analizado.

Las curvas $F-u$ pertenecientes a las probetas prismáticas con entalla de tipo A y C muestran un descenso de la carga de rotura cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre a partir del cual se han mecanizado dichas probetas. Además se observa la mayor deformación plástica que experimentan las probetas con entalla de tipo C.

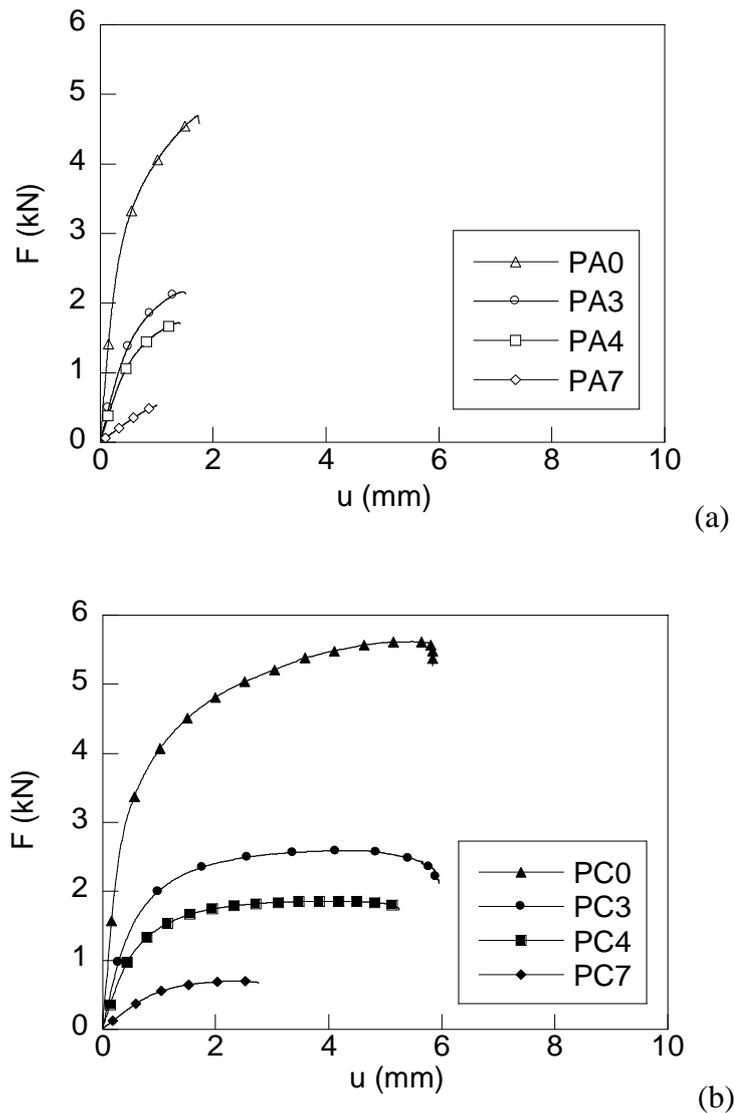


Fig. 2.93. Curvas carga-desplazamiento COD de las probetas prismáticas con entallas (a) PA y (b) PC de todos los pasos del proceso de trefilado analizados.

En las curvas $F-u$ obtenidas, para cada tipo de entalla y paso del proceso de trefilado estudiado, se observa una disminución en el desplazamiento registrado por el extensómetro en función del grado de trefilado para ambos tipos de entalla. A su vez, se puede observar como las probetas con entallas de tipo PC experimentan mayores desplazamientos. Esto se debe a que estas entallas son capaces de soportar mayores deformaciones que en el caso de las probetas con entallas tipo PA.

A partir del análisis de las curvas $F-u$ se ha extraído el momento flector máximo ($Mf_{\text{máx}}$) según la expresión (2.6) cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.17, siendo P la carga total aplicada, L longitud entre apoyos inferiores y D la distancia entre los rodillos superiores. Las muestras con entallas de tipo PC son capaces de soportar mayor carga hasta rotura lo cual

conlleva la generación de mayores momentos flectores antes de la misma. Dichos momentos son mayores para todos los alambres pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado con entallas de tipo PC.

$$Mf_{\text{máx}}^f = \frac{P \cdot (L - D)}{4} \quad (2.6)$$

Tabla 2.17. Medidas de $Mf_{\text{máx}}^f$ para las probetas con entallas tipo PA y PC.

	$Mf_{\text{máx}}^f$ PA (kN mm)	$Mf_{\text{máx}}^f$ PC (kN mm)
E0	62.93	72.47
E3	29.37	29.12
E4	23.39	23.86
E7	7.27	9.20

III. ANALISIS MACRO Y MICRO-FRACTOGRÁFICO

1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se han realizado estudios fractográficos y micrográficos de las probetas estudiadas en el capítulo II de la presente Tesis, siendo éstas las probetas lisas sometidas a ensayos de tracción simple interrumpidos, probetas prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción y probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos de flexión por cuatro puntos. En dicho estudio se muestra, además de las diferentes zonas de la superficie de fractura de las distintas probetas, un amplio análisis de los microdefectos presentes en las mismas.

Dentro del estudio de las probetas sometidas a ensayos de tracción simple, lisas, se ha centrado la atención en la microestructura presente en el cuello de estricción obtenida durante estos ensayos.

2. ESTUDIO MICROGRÁFICO DEL CUELLO DE ESTRICCIÓN

Las micrografías analizadas pertenecen al alambcón inicial (E0), los alambres de trefilado correspondientes al cuarto (E4) y quinto (E5) paso del proceso y por último al alambre de pretensado final (E7). A continuación se describen las micrografías obtenidas de cada acero, diferenciándose entre las obtenidas en el cuello de estricción y las pertenecientes a las probetas fracturadas. Para el estudio sobre la posible influencia de las inclusiones y pseudocolonias perlíticas en la fractura del alambcón inicial se han realizado los siguientes ensayos sobre probetas lisas, con sección uniforme y libre de entallas. Para ello se han sometido tres probetas pertenecientes al acero E0 a ensayos de tracción simple obteniéndose en una de ellas un cuello de estricción próximo a la rotura del material. En las dos probetas restantes se ha analizado la superficie de fractura del material. Una vez realizados los correspondientes ensayos y siguiendo el procedimiento experimental explicado, se procede al análisis de las micrografías obtenidas de dicho alambre. Cabe destacar dentro del análisis, en la zona de fractura del cuello de estricción, la poca o nula deformación presente en las inclusiones. Dicha deformación en las inclusiones es causa del previo proceso de laminación en caliente al que ha sido sometido el acero. En el cuello de estricción de la probeta no se han encontrado posibles iniciaciones de la fractura del material, micro-fisuras, así como tampoco micro-daños en las distintas colonias de perlita. Sin embargo en las superficies de fractura que se han analizado se pueden apreciar posibles indicios de la influencia de las inclusiones en la fractura del material.

En la micrografía de la Fig. 3.1 (a), se examina una sección longitudinal correspondiente a la zona de proceso de fractura del alambcón E0. El modo de fractura de las probetas pertenecientes al alambcón es desde el centro de la probeta hacia el resto del contorno, de forma radial según lo observado en estudios previos (RODRÍGUEZ, 2008). Debido al modo de fractura anteriormente comentado, en este alambre es complicada la observación de la incubación de la zona de proceso de fractura. En la micrografía perteneciente a dicha superficie de fractura se presentan microhuecos. En la parte central de la micrografía se observa una micro-fisura que parte desde la superficie de fractura y se aproxima hacia una inclusión. Dicha micro-fisura no se llega a unir con la inclusión, pero las tensiones acumuladas alrededor de la misma podrían ser la causa de la aproximación de ésta.

Como se ha comentado anteriormente las inclusiones presentes en el alambcón inicial no han sufrido una gran deformación ni se encuentran fracturadas o separadas de la matriz que las rodea. Por este motivo la influencia de las inclusiones en la deflexión del camino de fractura es mínima, aunque la influencia de las mismas en la iniciación de la fractura no es tan clara.

En la micrografía presente en la Fig. 3.1 (b), se muestra la superficie de fractura a más aumentos, en ella se observa una inclusión con morfología esférica imbricada en los microhuecos. Con esta micrografía se puede determinar que las inclusiones sí afectan a la fractura del material; sin embargo la superficie de fractura no deflecta al atravesar dicha inclusión en este acero. El posible motivo de la fractura isótropa o la ausencia de deflexión del camino de fractura puede ser causa de la nula deformación de las inclusiones presentes.

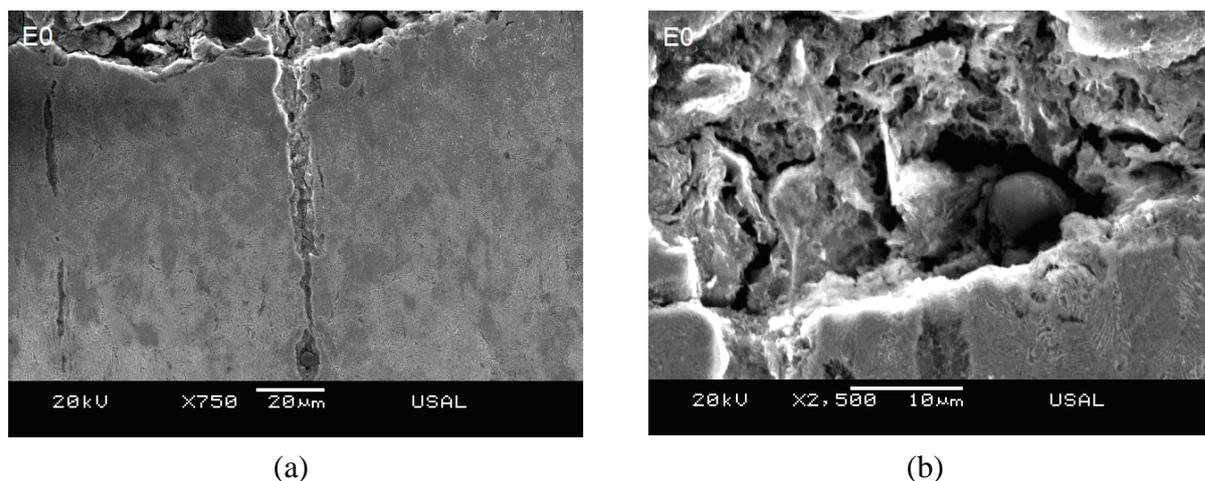


Fig. 3.1. Micrografías pertenecientes a la superficie de fractura del alambrión inicial; (a) Sección longitudinal de la ZPF, (b) aumento de micrografía en la ZPF.

Para el análisis del acero perteneciente al *cuarto paso del proceso de trefilado* se han realizado cuatro ensayos, de los cuales se obtuvieron tres cuellos de estricción y una superficie de fractura perteneciente a la única probeta de éste acero que llegó a la rotura

De los tres ensayos, en los cuales no se ha llegado a la fractura, se ha seleccionado el cuello de estricción más próximo a la fractura final para la obtención de micrografías. En la primera micrografía de la Fig. 3.2 (a) se observa en la parte central un micro-daño asociado al límite de una pseudocolonia. El micro-daño se produce en el límite inferior de la pseudocolonia en la cual las láminas de cementita poseen una orientación de 45° aproximadamente en relación con la dirección longitudinal del proceso de trefilado. En esta micrografía también se aprecia en la parte izquierda pseudocolonias perlíticas con una gran deformación en las cuales se puede observar las diferentes láminas de cementita muy curvadas y fragmentadas sin ningún micro-daño perceptible asociado.

En la micrografía de la Fig. 3.2 (b) se observa una gran inclusión deformada en la dirección del proceso de trefilado, al parecer la inclusión es bastante frágil puesto que se ven los diferentes fragmentos de la misma, aunque puede ocurrir que los diferentes fragmentos observados no pertenezcan a una única inclusión. En la micrografía también se aprecia una

pseudocolonia cercana a una inclusión de menor tamaño sin micro-daño asociado. Cabe destacar el gran número de inclusiones encontradas, las cuales aparecen deformadas en la dirección de trefilado. Las inclusiones y sus deformaciones, al igual que las pseudocolonias perlíticas, son de tamaños muy variados y se encuentran distribuidas de forma muy heterogénea dentro de la sección del alambre.

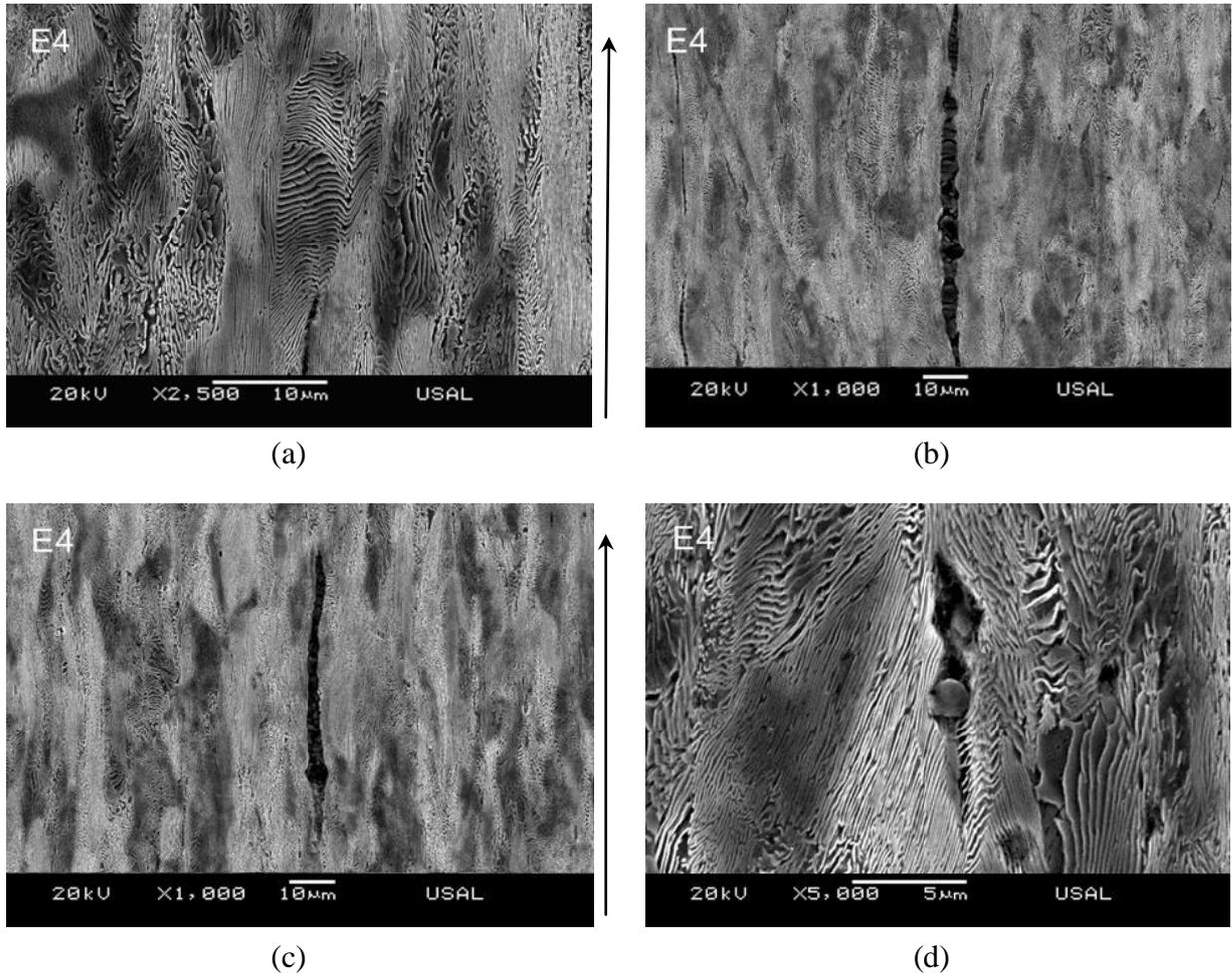


Fig. 3.2. Secuencia de micrografías pertenecientes al cuello de estricción formado durante el ensayo en el alambre correspondiente al E4; (a) micro-daño asociado a una pseudocolonia, (b) inclusión tipo mezcla, (c) inclusión tipo mezcla deformada, (d) inclusión de tipo duro.

De igual forma que en la micrografía anterior, en la micrografía de la Fig. 3.2 (c) se observa una gran inclusión deformada con una parte central de mayor anchura y de morfología más redondeada lo cual hace suponer que es una inclusión de tipo mezcla deformada, con una inclusión de tipo duro próxima a la zona central y una inclusión de tipo blando que la rodea. En esta micrografía se muestra un gran número de inclusiones deformadas en la dirección de trefilado y de pseudocolonias perlíticas.

El proceso de descohesión de la matriz perlítica, en inclusiones de tipo duro, y fragmentación de la inclusión, en las de tipo blando, se ha observado en todas micrografías obtenidas del alambre perteneciente al cuarto paso del proceso de trefilado.

En la micrografía perteneciente a la Fig. 3.2 (d) se muestra en la parte central una inclusión con morfología esférica, perteneciente al grupo de los óxidos. En la zona superior de la micro-fisura asociada a la inclusión se puede intuir otra inclusión de diferentes características con su respectiva micro-fisura. Esta micrografía es de gran importancia puesto que se aprecia micro-daño asociado a colonias cuyas láminas poseen una orientación próxima a 45° con la dirección de trefilado. El micro-daño se muestra en la colonia inferior central derecha y en una colonia de gran tamaño situada en la parte central izquierda.

Los micro-daños observados en las micrografías aparecen en las colonias cuyas láminas poseen orientaciones de 45° con respecto a la orientación del proceso de trefilado, puesto que es en estas direcciones dónde se producen las máximas tensiones y deformaciones cortantes.

Para la realización del estudio de los alambres correspondientes al *quinto paso del proceso de trefilado* se han realizado un total de tres ensayos. De todas las probetas ensayadas, como en los casos anteriores, se ha examinado el cuello de estricción más cercano a la rotura. En este caso la susceptibilidad de rotura impuesta ha sido del 12%. En la zona central del cuello de estricción se muestran varias posibles zonas de iniciación de la fractura, la zona dónde se encuentran dichas iniciaciones se le denomina zona del proceso de fractura (ZPF). Las posibles iniciaciones de la fractura se encuentran en la parte central del cuello de estricción distribuidas heterogéneamente.

La primera de las zonas observadas es una micro-fisura con morfología en forma de “x”. La micrografía de la Fig. 3.3 (a) muestra un daño extenso en el cual la micro-fisura posee una orientación cercana a los 45° con respecto a la dirección de trefilado. La micro-fisura atraviesa en su mayoría colonias orientadas en la dirección de trefilado. En la parte superior de la micro-fisura se encuentran más micro-fisuras de menor tamaño formadas en su mayoría a 45° y atravesando colonias orientadas en la dirección de trefilado. En esta micrografía también se observa una gran cantidad de micro-daño orientado en la dirección del trefilado. El micro-daño con esta orientación es producido por inclusiones, las cuales aparecen fragmentadas o deformadas en la dirección del trefilado. La siguiente micrografía de la Fig. 3.3 (b) muestra la misma zona con una mayor resolución. En estas micrografías se ven los daños producidos a 45° , los cuales en su mayor parte también atraviesan colonias orientadas en la dirección de trefilado (eje longitudinal del alambre/probeta), además de presentarse una gran cantidad de pseudocolonias sobre todo en la parte izquierda de la micrografía. Las láminas de cementita

que forman las pseudocolonias aparecen en ésta con grandes curvaturas. Sin embargo el micro-daño no aparece atravesando pseudocolonias sino en las colonias adyacentes a éstas. Además en dicha micrografía se observa con más detalle que la zona de acumulación de daño se produce aproximadamente a 45° respecto a la dirección de trefilado, dónde se producen las máximas tensiones cortantes. Otro micro-daño a tener en cuenta es el asociado a la rotura de láminas de cementita de forma puntual, el cual se observa en la parte superior e inferior central. En los bordes de las pseudocolonias se muestra micro-daño de menor tamaño debido a la descolonización.

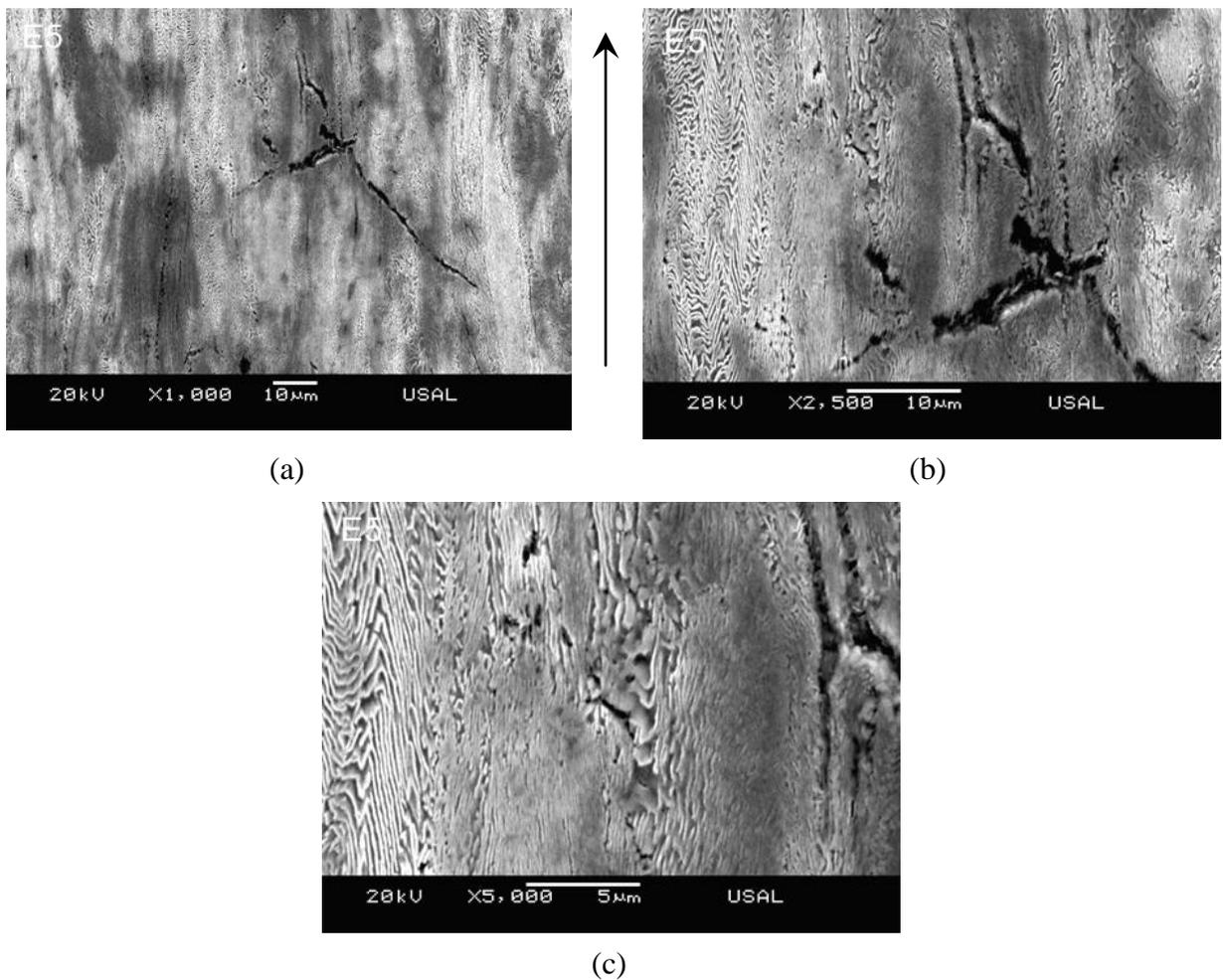


Fig. 3.3. Secuencia de micrografías pertenecientes al cuello de estricción del quinto paso del proceso de trefilado; (a) micro-fisura con orientación cercana a los 45° , (b) detalle de micro-fisura, (c) micro-fisura a través de una pseudocolonia.

Dentro de esta posible zona de iniciación de la fractura puede observar en la Fig. 3.3 (c) como las micro-fisuras atraviesan una pseudocolonia, uniéndose ésta con el micro-daño producido en las colonias totalmente orientadas, produciéndose un desgarramiento intercolonial (apartado 4.3). También se observa en la parte central de la micrografía daño asociado a la rotura puntual de láminas de cementita, muy orientadas en la dirección del proceso de trefilado. Dichas

colonias, fuertemente orientadas en la dirección del proceso de trefilado, son las que mayor micro-daño puntual presentan.

En la siguiente secuencia de figuras (Fig. 3.4) se muestra otra de las zonas posibles de iniciación de la fractura dentro de la ZPF. En esta zona se analizan en detalle dos micro-fisuras, la primera de ellas de gran longitud. En la Fig. 3.4 (a) se encuentra la micro-fisura de mayor longitud encontrada en la ZPF, en la cual se observa una deflexión del camino de fractura. En dicha micrografía se puede ver como una o varias inclusiones pueden ser la causa de la micro-fisura. No obstante, la gran deflexión situada en la parte central de la micrografía se puede deber fundamentalmente a dos causas. La primera de estas causas es la posible deflexión a través de una descolonización causada por el ensayo de tracción simple. La segunda causa posible es el avance de ésta micro-fisura por la deformación causada por una inclusión en la dirección del proceso de trefilado. En la parte central izquierda de la micrografía se observa como la micro-fisura atraviesa una pseudocolonia, no produciéndose una deflexión de la misma pese a la orientación de las láminas que la conforman.

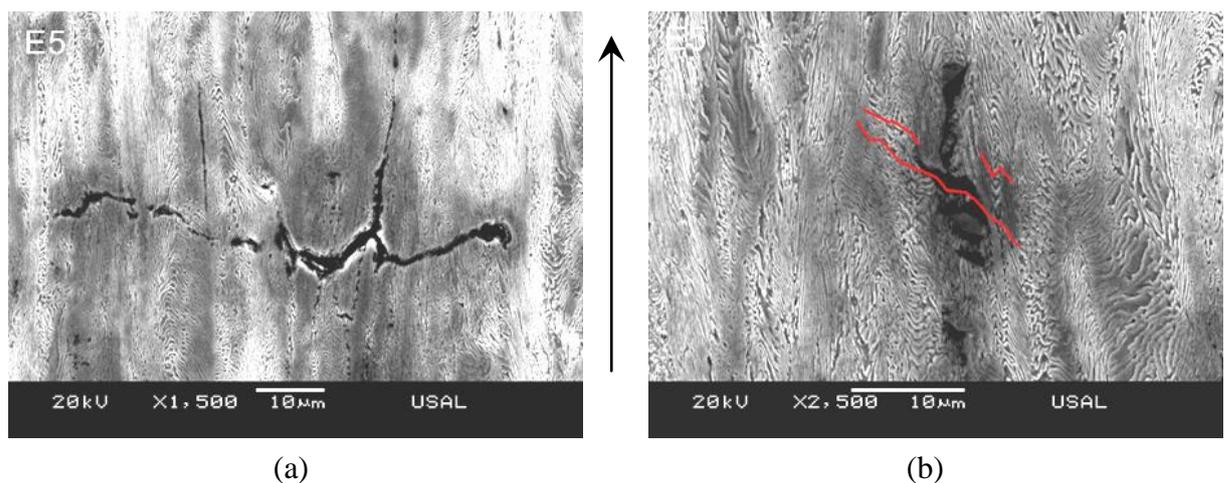


Fig. 3.4. Secuencia de micrografías pertenecientes al cuello de estricción del acero E5; (a) micro-fisura en la ZPF, (b) micro-fisura a través de una inclusión.

En la micrografía correspondiente a la Fig. 3.4 (b) se muestra un inicio de micro-fisuras en forma de zigzag. La mayoría de estas micro-fisuras parecen ser causadas por la deformación de las inclusiones. Cabe destacar la gran simetría presentada por estas micro-fisuras y el paralelismo entre ambas. Como curiosidad se puede observar la situación de las micro-fisuras entre pseudocolonias que presentan igual orientación. En la parte superior de estas micro-fisuras se encuentra otra micro-fisura orientada en la dirección del trefilado y en la cual se observa una pequeña inclusión fragmentada.

En la secuencia de micrografías, Fig. 3.5, se muestra una tercera zona encontrada de posible iniciación de la fractura en el alambre perteneciente al quinto paso del proceso de trefilado. En dicha secuencia se observa primero una vista general de la zona, que corresponde a la micrografía Fig. 3.5 (a), en la cual se pueden ver tres micro-fisuras. Dos de ellas son micro-fisuras de similar tamaño y forma, con direcciones semejantes. Son micro-fisuras formadas a 45° respecto a la orientación del proceso de trefilado. La micro-fisura superior se muestra con una mayor resolución en la Fig. 3.5 (b), en ésta se observan dos inclusiones de gran tamaño con micro-fisuras asociadas. Las inclusiones aparecen formando parte de la micro-fisura. Es posible que la unión de las inclusiones, que forman la micro-fisura, se deba a descolonizaciones. Se pueden ver también micro-daños en la dirección del trefilado, algunos provocados por inclusiones y otros por roturas puntuales de láminas de cementita. También aparecen en esta micrografía daños asociados a los bordes de la pseudocolonia, como se observa en la presente en la parte inferior derecha de la micrografía. En la zona superior de la inclusión izquierda se aprecia una descolonización causante de la gran deflexión de la micro-fisura asociada.

Son de gran interés para el presente estudio los micro-daños que se presentan cercanos a la micro-fisura, en la dirección del trefilado, como el que se observa en la parte inferior derecha de la misma. Debido a la gran deflexión producida en la parte superior de la inclusión derecha de la micro-fisura anterior se ha realizado una micrografía correspondiente a la Fig. 3.5 (c) con una mayor resolución, donde se muestra una clara descolonización en la parte derecha de la inclusión.

La micro-fisura situada en la zona central de la vista general [Fig. 3.5 (a) y su ampliación Fig. 3.5 (d)] difiere de las dos micro-fisuras contiguas en cuanto a tamaño y forma. La morfología presentada por dicha micro-fisura es en forma de Y, la cual deflece al atravesar una pseudocolonia perlítica. En la micrografía se muestra en la parte derecha un micro-daño de similares características y de menor tamaño. La mayor parte de la micro-fisura se ha generado a través de colonias cuyas láminas están orientadas en la dirección del trefilado; sin embargo, también se aprecian en la micrografía daños de menor entidad producidos en los bordes de las colonias. El daño puntual en este caso, como en ocasiones anteriores, viene asociado a la rotura de láminas de cementita (posiblemente sea el inicio de una descolonización).

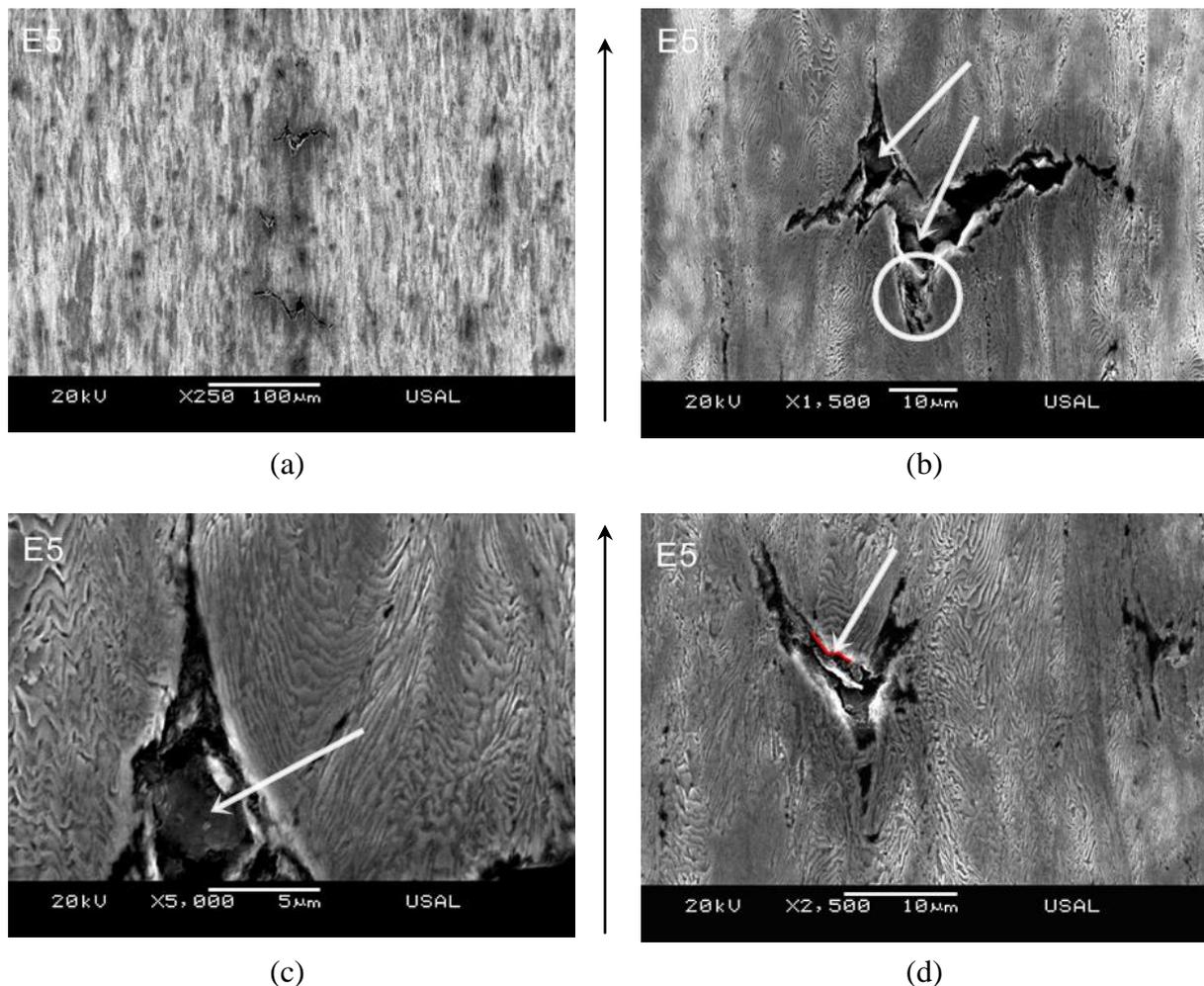


Fig. 3.5. Secuencia de micrografías pertenecientes al cuello de estricción del alambre del quinto paso del proceso de trefilado

Para el estudio del alambre pretensado o acero comercial final (E7) se han realizado tres ensayos de tracción simple, en los cuales se han obtenido cuellos de estricción y una superficie de fractura. Se ha analizado la superficie de fractura del alambre que ha llegado a la rotura y el cuello de estricción, como en los casos anteriores, más cercano a la rotura final del acero. En el estudio se ha podido identificar una zona del proceso de fractura, situada en la parte central del cuello de estricción.

Dentro del estudio del cuello de estricción previo a la rotura de las probetas se ha podido observar la superficie de fractura, obteniéndose las micrografías mostradas en la Fig. 3.6, en las cuales se muestra una clara deflexión del camino de fractura.

En la Fig. 3.6 (b) se observa una desviación de la fractura que forma aproximadamente 45° con la dirección de trefilado. Estas micro-fisuras formadas por las inclusiones se acercan a la superficie de fractura; si la tensión anular hubiese sido algo mayor probablemente la micro-

fisura continuaría por las mismas. La micro-grieta se origina en colonias orientadas en la dirección del trefilado (en detalle ésta parece haberse formado por más de una inclusión).

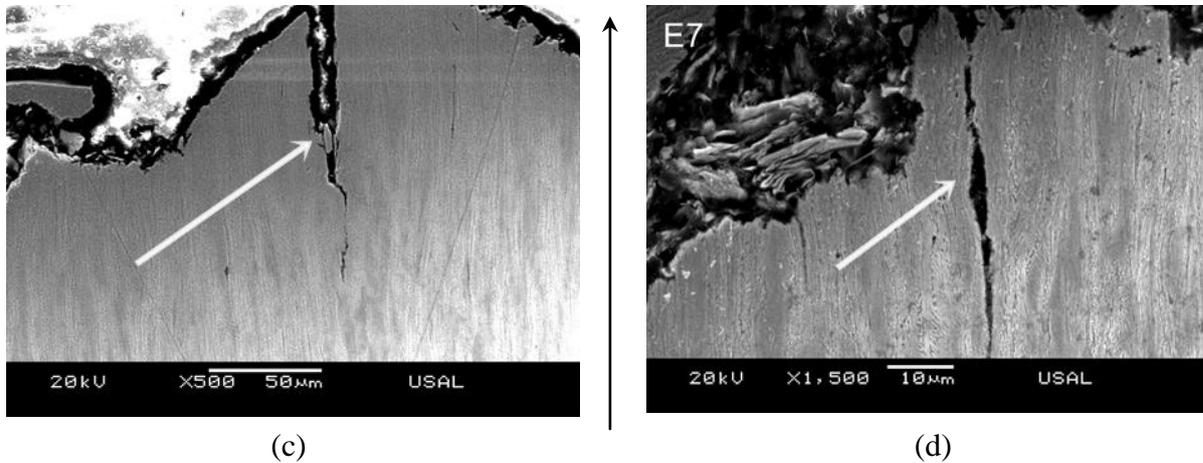


Fig. 3.6. Secuencia de micrografías pertenecientes a la superficie de fractura del acero de pretensado final.

En la probeta de acero de pretensado en la cual se encuentra el cuello de estricción, se ha analizado con un mayor detalle la ZPF. Para obtener las micrografías correspondientes a dicha zona, la muestra se ha sometido a varios pulidos. En la ZPF se muestran varios posibles inicios de la misma. La siguiente secuencia de micrografías pertenece a la zona central del cuello de estricción y la situación entre ambas fisuras es próxima (Fig. 3.7).

En la Fig. 3.7 (a) se observan dos grandes micro-fisuras con micro-daño asociado, en ambas éste está situado en dirección paralela al eje longitudinal del alambre y atraviesa colonias orientadas en su mayoría en la dirección del proceso de trefilado. El contorno de los micro-daños es tan nítido que podría haber sido causado por el pulido. En la micro-fisura situada en la parte derecha de la micrografía el daño se presenta sólo en los bordes inferiores, mientras en la micro-fisura contigua se presenta alrededor de toda su morfología. En el resto de la micrografía se observan otras micro-fisuras, de menor tamaño, producidas probablemente por inclusiones.

La micrografía perteneciente a la Fig. 3.7 (b) muestra el micro-daño, a mayores aumentos, en torno a la micro-fisura anterior, situada a la derecha de la micrografía. En esta micrografía se puede ver con claridad la dirección del contorno del micro-daño, 45° . La mayoría del micro-daño se presenta paralelo a la micro-fisura generadora.

En la Fig. 3.7 (c) se pueden observar dos micro-fisuras. En la micro-fisura situada en la parte derecha se observa la inclusión causante de la misma y unas pequeñas micro-fisuras asociadas al extremo inferior de ésta. El micro-daño observado alrededor de la micro-fisura presenta una

orientación de 45° con respecto a la dirección de trefilado, en la dirección de los máximos esfuerzos cortantes. Se observa en la micro-fisura situada a la izquierda de la micrografía un marcado micro-daño con morfología curva y paralelo a la micro-fisura.

En la última micrografía perteneciente a esta secuencia Fig. 3.7 (d) se puede ver una gran zona de iniciación de fractura con una inclusión fragmentada en la zona central y micro-daño alrededor de la misma con más micro-fisuras de menor tamaño. La zona del micro-daño tiene un contorno muy definido. Dicha zona se sitúa alrededor de las micro-fisuras, produciéndose una gran zona de posible comienzo de fractura.

Las micro-fisuras que se presentan en este acero, en la parte central del cuello de estricción, casi siempre van acompañadas de inclusiones. Estas aparecen muy deformadas en la dirección del trefilado y fragmentadas. Los micro-daños generados alrededor de las inclusiones, mostrados en las micrografías anteriores, están orientados en la dirección longitudinal del alambre. En las posibles zonas de iniciación de fractura encontradas se muestra gran cantidad de micro-daño, apareciendo éste muy localizado.

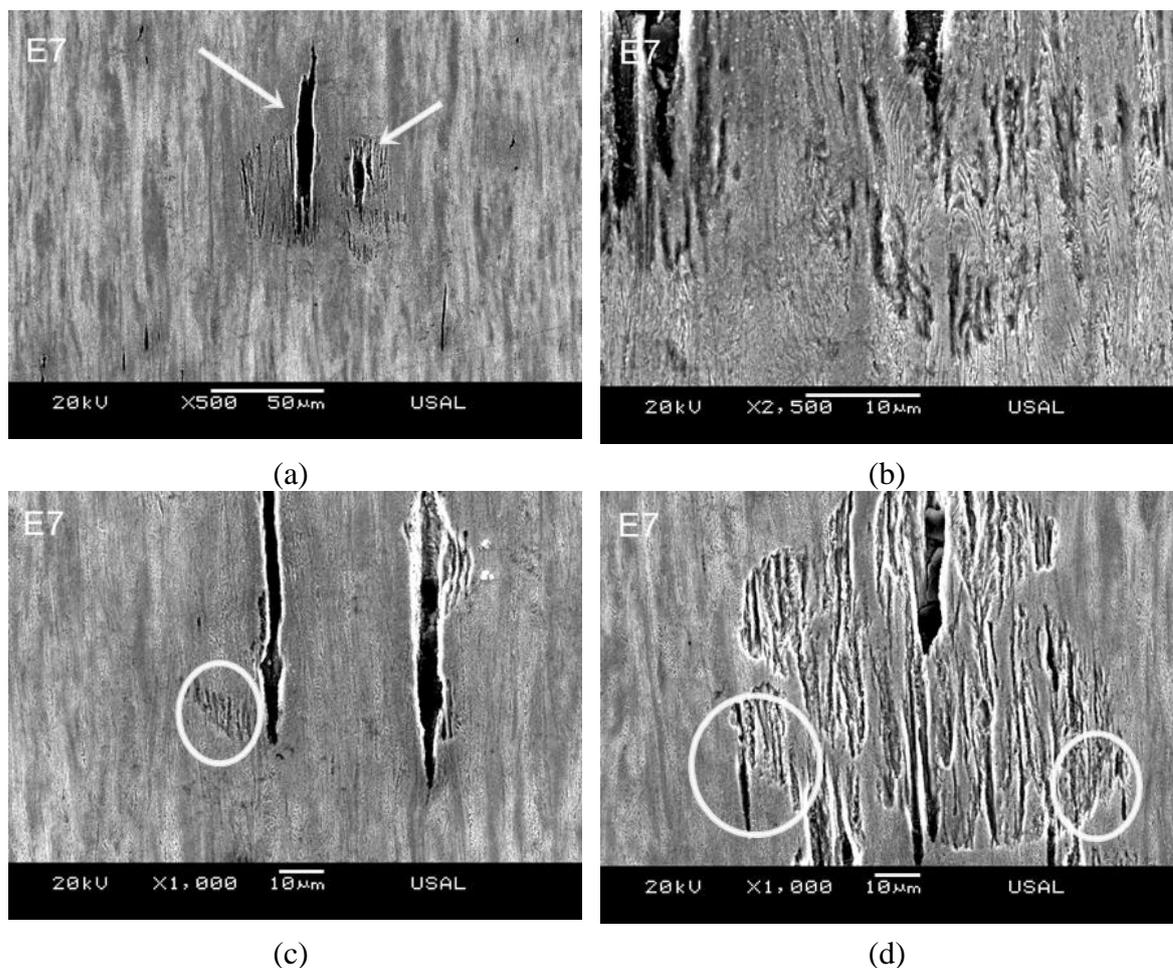


Fig. 3.7. Secuencia de micrografías pertenecientes al cuello de estricción, E7.

3. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

Una vez que se han llevado las distintas probetas a fractura, por total separación de superficies, se ha procedido al análisis de las superficies fractográficas mediante la observación de éstas en el microscopio electrónico de barrido (MEB).

Al final de cada ensayo las muestras fueron pulverizadas con un material aislante (AISLARCO®) cubriendo éste toda la superficie de fractura de la probeta con el objeto de evitar la corrosión que podría originar el ambiente. Posteriormente las muestras fueron cortadas transversalmente con un disco Struers modelo Labotom, como se indica en la Fig. 3.8 por la línea x-x', obteniéndose muestras de aproximadamente 1cm de altura las cuales presentan en uno de sus extremos la superficie de fractura del material.

Previamente a la observación en el MEB las muestras fueron limpiadas con acetona utilizándose para ello una máquina de ultrasonidos en la cual fueron sumergidas las muestras durante unos 15-25 minutos aproximadamente, eliminándose la capa de Aislarco®, anteriormente aplicada sobre dicha superficie.

Para una mejor visualización de la superficie fractográfica, dentro del MEB al porta-muestras del mismo se le han acoplado pequeñas cintas de fibra de carbono que conectan la muestra con dicho porta-muestras haciendo que el haz de electrones de alta energía se focalice mejor sobre ésta.

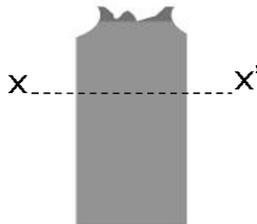


Fig. 3.8. Corte transversal previo a la observación en el MEB.

Una vez preparadas las muestras se ha procedido a su observación mediante el MEB, en el cual se han realizado dos estudios diferenciados. Por una parte, un estudio macro-fractográfico, en el cual se muestran los mapas de las superficies de fractura a 25x; y por otra parte, un estudio micro-fractográfico, en el cual se han realizado micrografías de dicha superficie de fractura a 500x, 1000x y 2500x y utilizando una tensión de trabajo de 20 kV.

En las superficies de fractura de todos los casos estudiados se pueden observar tres zonas distintas, las cuales son comunes para ambos tipos de entallas. Estas zonas diferenciadas son la corona exterior (CE), la zona intermedia o de avance de fractura (Z_{INT}) y la zona de proceso

de fractura (ZPF). Dichas zonas, que se observan en las superficies de fractura, vienen caracterizadas por los distintos micro-mecanismos de fractura que en ellas se encuentran.

En la Fig. 3.9 se muestran las superficies fractográficas representativas de cada caso de estudio, el resto de las superficies fractográficas se adjuntan en el anexo III. La variación del área de las distintas zonas que se puede observar en estas fractografías, entre ambas entallas y a su vez en los distintos pasos del proceso de trefilado es orientativa puesto que, como se ha comentado, no están representadas las tres fractografías de cada entalla para cada paso, en las cuales se muestran variaciones significativas de las mismas. Para recoger dicha información de manera cuantitativa, como se verá a continuación se han realizado las mediciones de las distintas zonas de todas las probetas objeto de estudio.

El tamaño de la CE está relacionado con la capacidad que posee el material para deformarse plásticamente. En ambos tipos de entallas se puede observar cómo, a medida que avanza el proceso de trefilado, aumenta el tamaño de la corona exterior, siendo en las PAA0 casi inexistente. Las PCC (gran radio de curvatura) son las que mayor zona de CE presentan.

Al contrario que la corona exterior, la ZPF va disminuyendo a medida que aumenta el paso de trefilado del cual se han mecanizado las probetas, siendo cada vez menos discernible, puesto que a medida que avanza el proceso de trefilado la Z_{INT} también va a estar formada por CMH. Para un mejor estudio de dichos cambios se ha optado por realizar las mediciones de éstas zonas para todas las ternas de probetas ensayadas.

A continuación se muestran las fractografías representativas de cada caso de estudio acompañadas por las micrografías características de las distintas zonas presentes en éstas superficies fractográficas (Figs. 3.10-3.17). En dichas micrografías se observan los micromecanismos característicos de las distintas zonas de la superficie de fractura y la variación de los mismos a lo largo del proceso de trefilado. En las micrografías obtenidas en la zona de CE se observa una superficie generada a partir del CMH, por el contrario en las micrografías realizadas en la Z_{INT} de las distintas probetas se observan clivajes y de igual forma que en la CE las micrografías pertenecientes a la zona de proceso de fractura han sido generadas por CMH. Los microhuecos presentes en la CE son de menor tamaño, en comparación con los presentes en la ZPF.

Los micro-mecanismos encontrados en las distintas zonas son comunes para ambos tipos de probetas entalladas, PAA y PCC. Además, a medida que avanza el proceso de trefilado, en la zona intermedia se produce una reducción del micro-mecanismo de C a favor del aumento del micro-mecanismo CMH en ambos tipos de entalla.

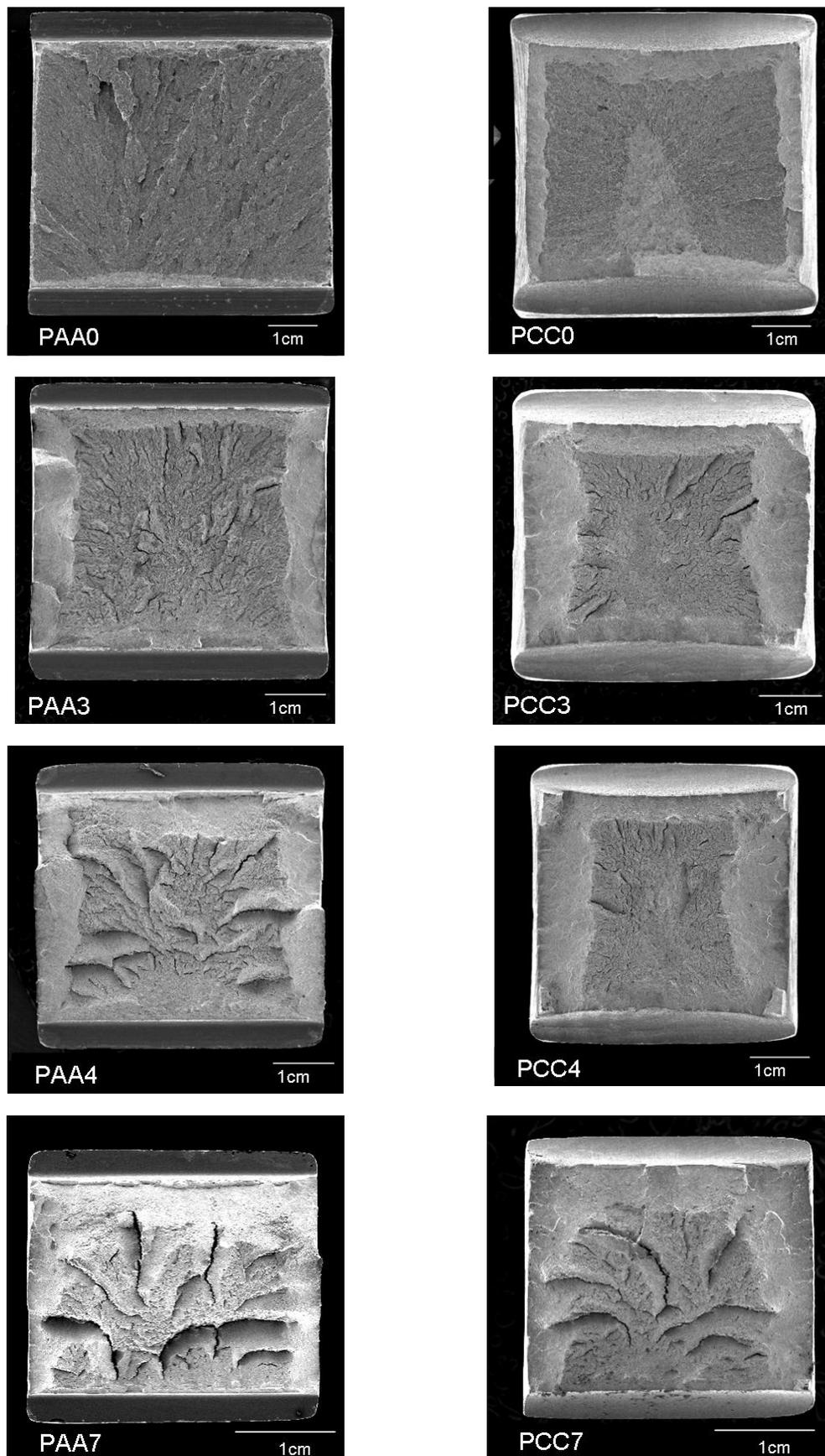


Fig. 3.9. Superficies de fractura de las probetas entalladas PAA y PCC.

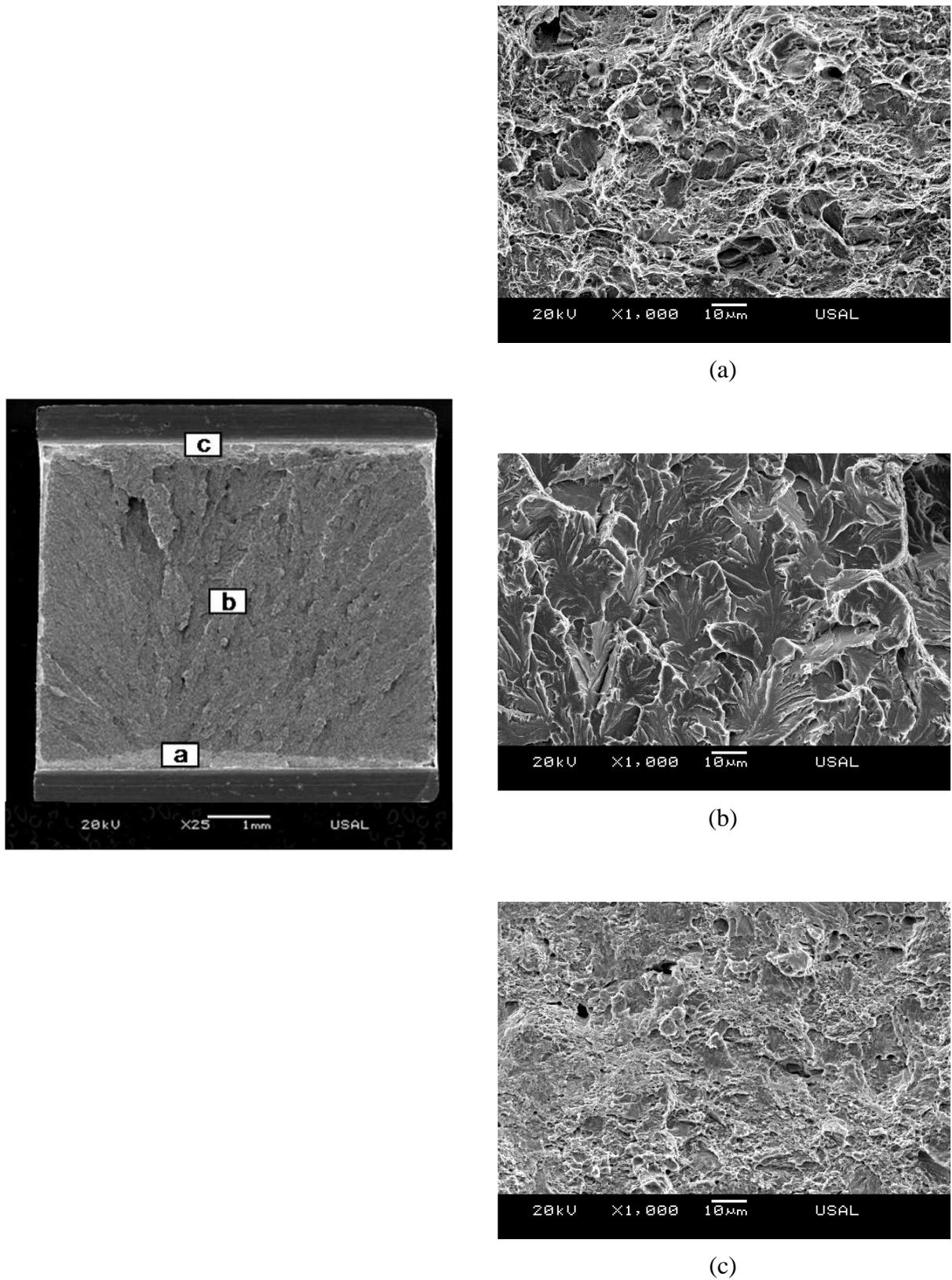


Fig. 3.10. Superficie de fractura de la probeta PAA0: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

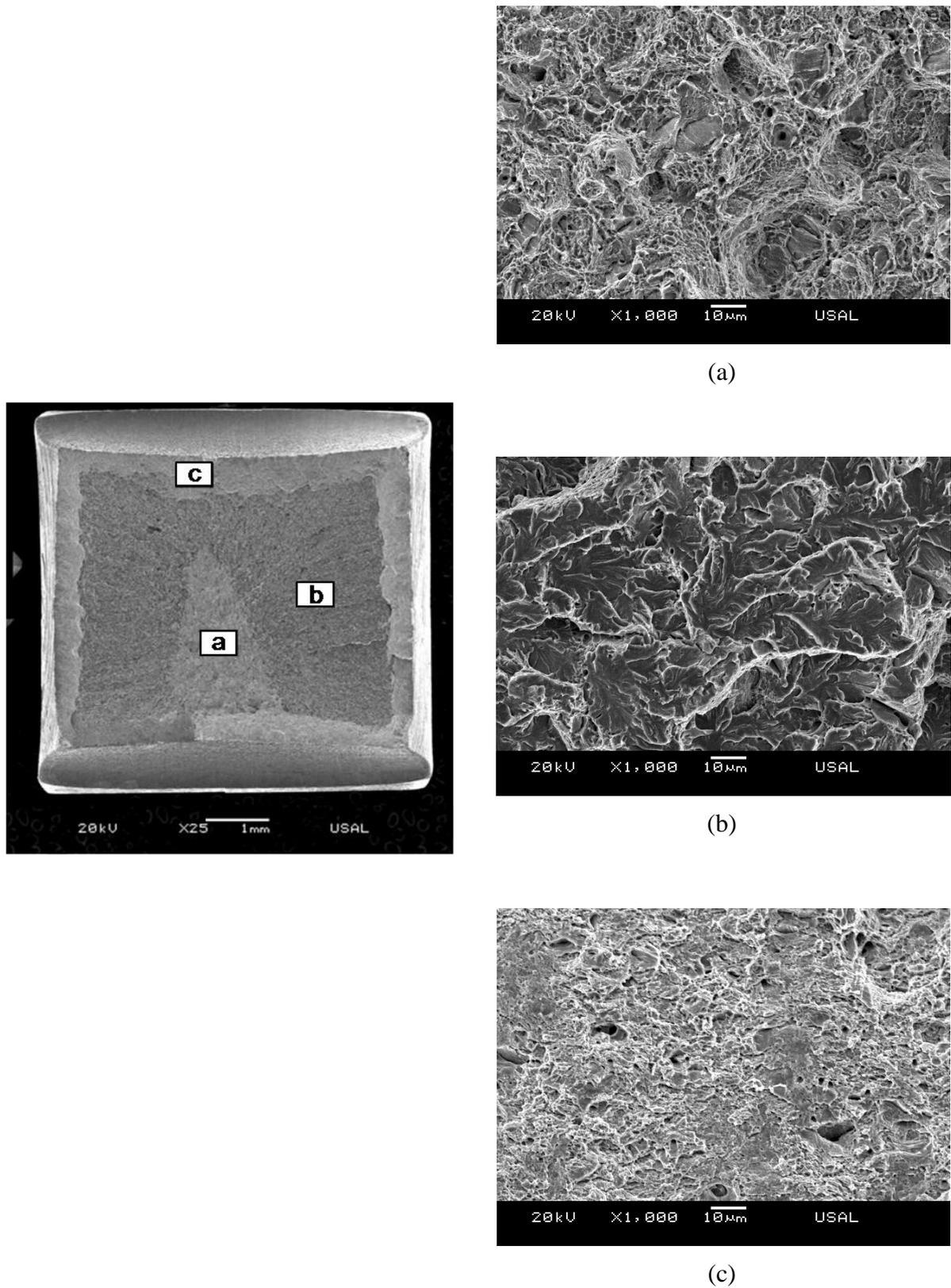


Fig. 3.11. Superficie de fractura de la probeta PCC0: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

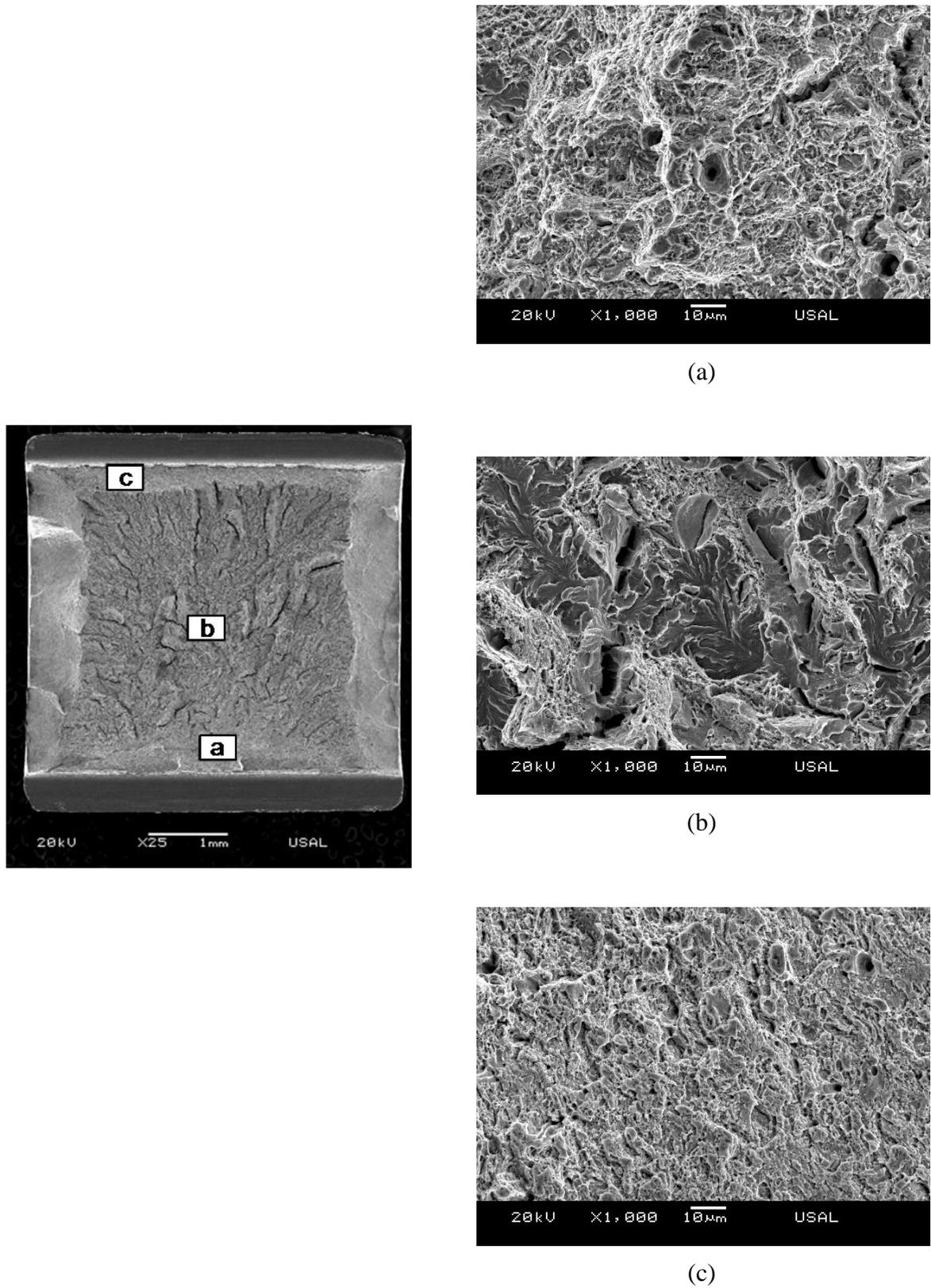


Fig. 3.12. Superficie de fractura de la probeta PAA3: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

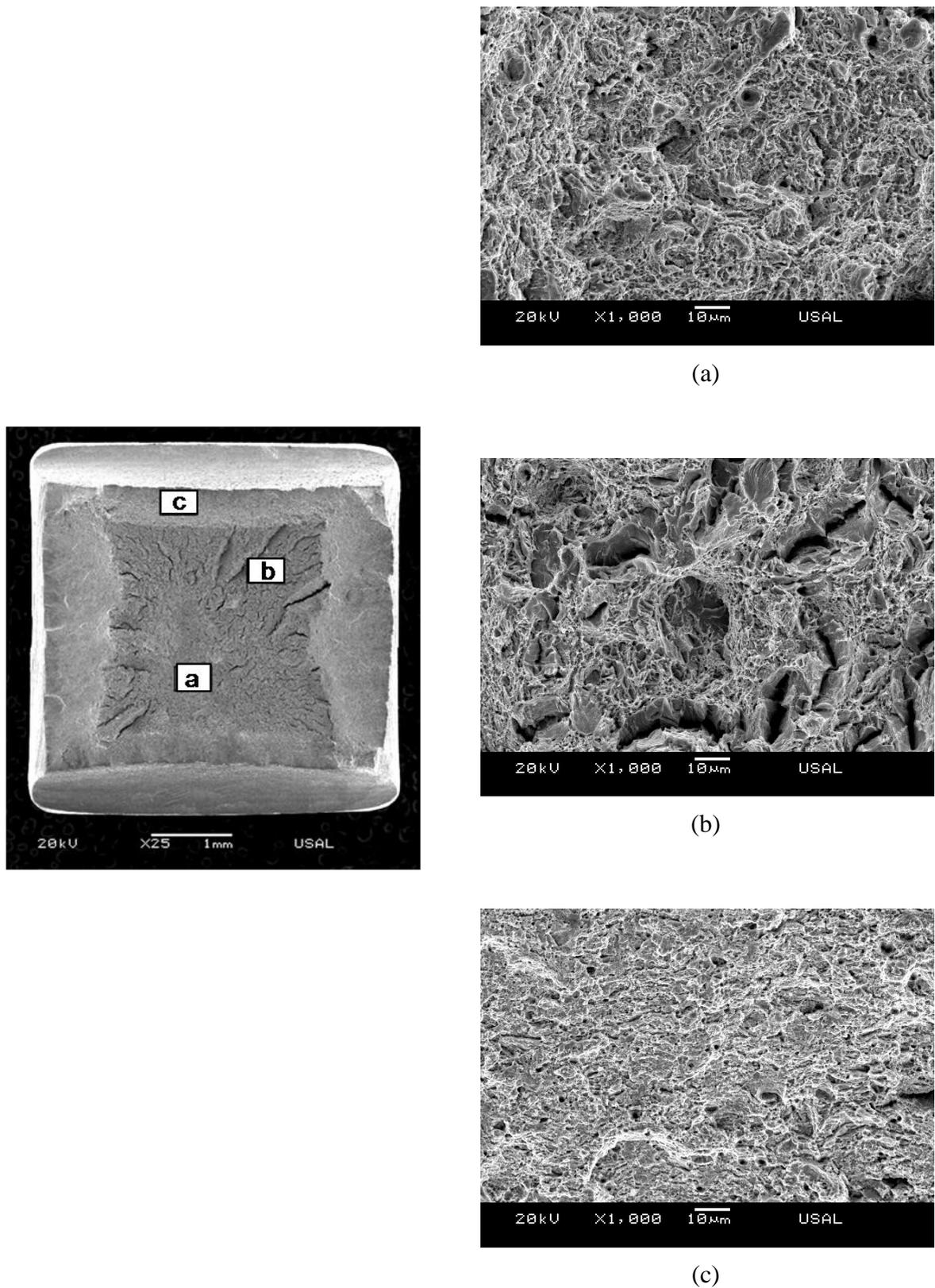


Fig. 3.13. Superficie de fractura de la probeta PCC3: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

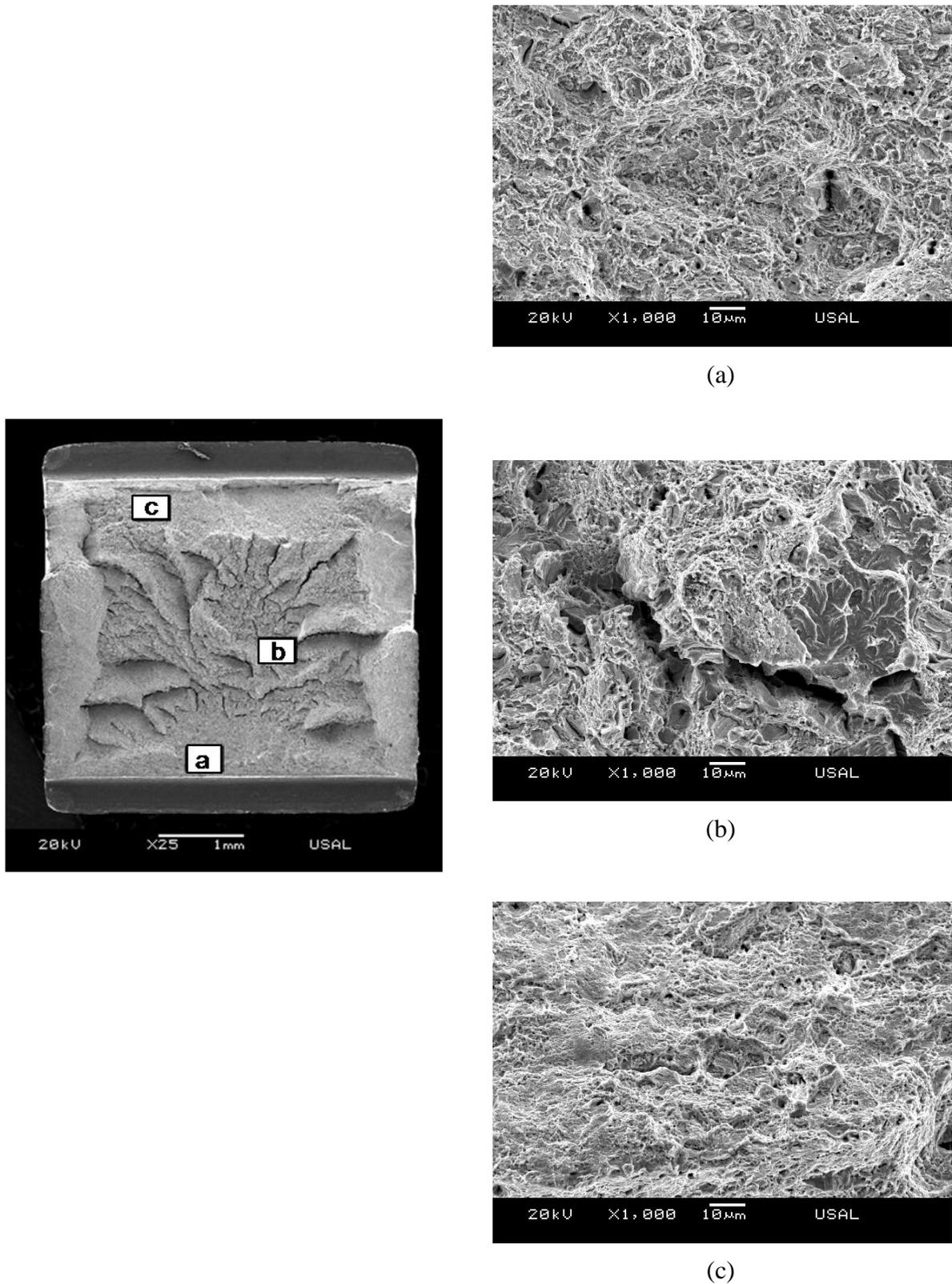


Fig. 3.14. Superficie de fractura de la probeta PAA4: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

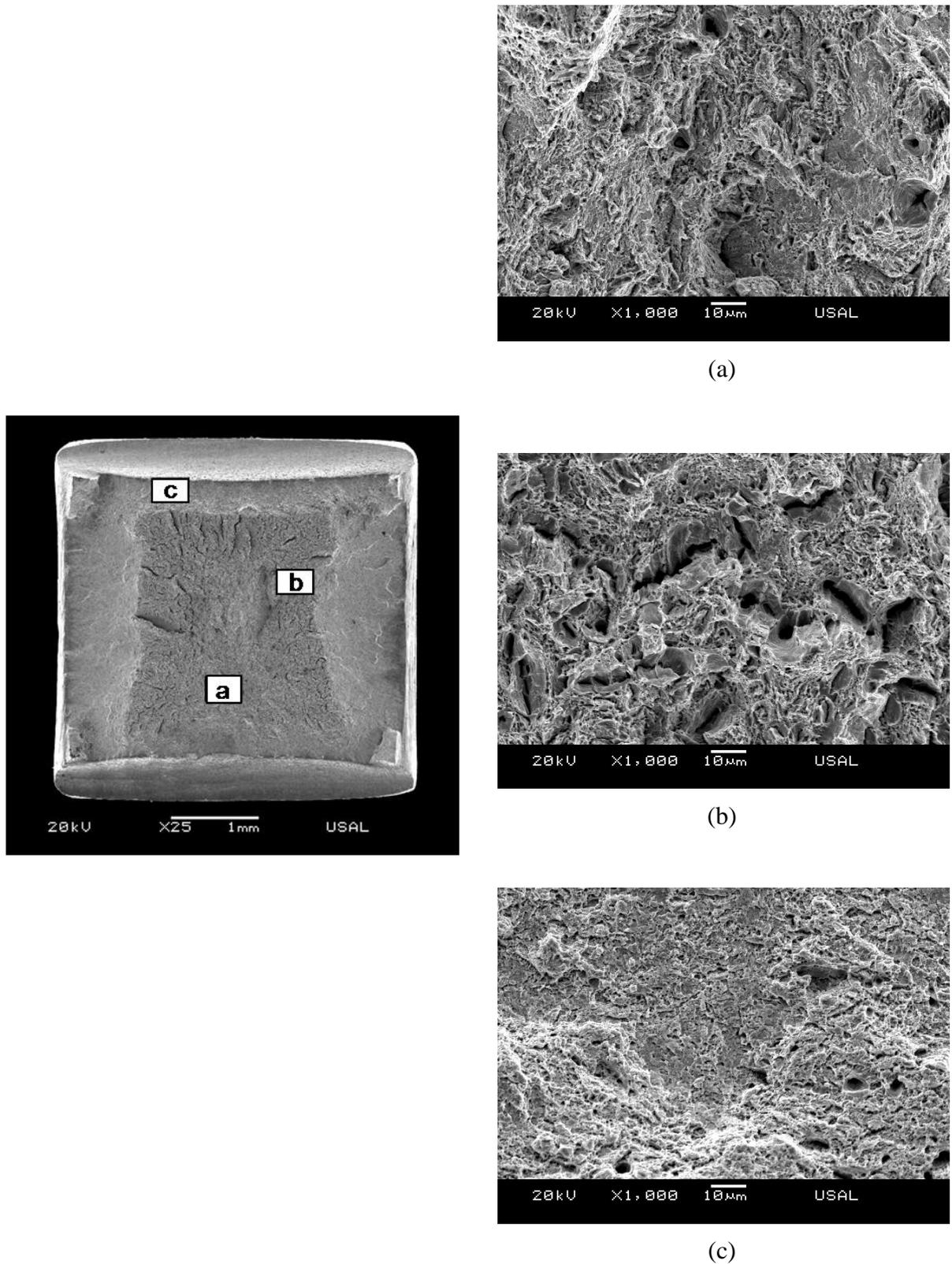


Fig. 3.15. Superficie de fractura de la probeta PCC4: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

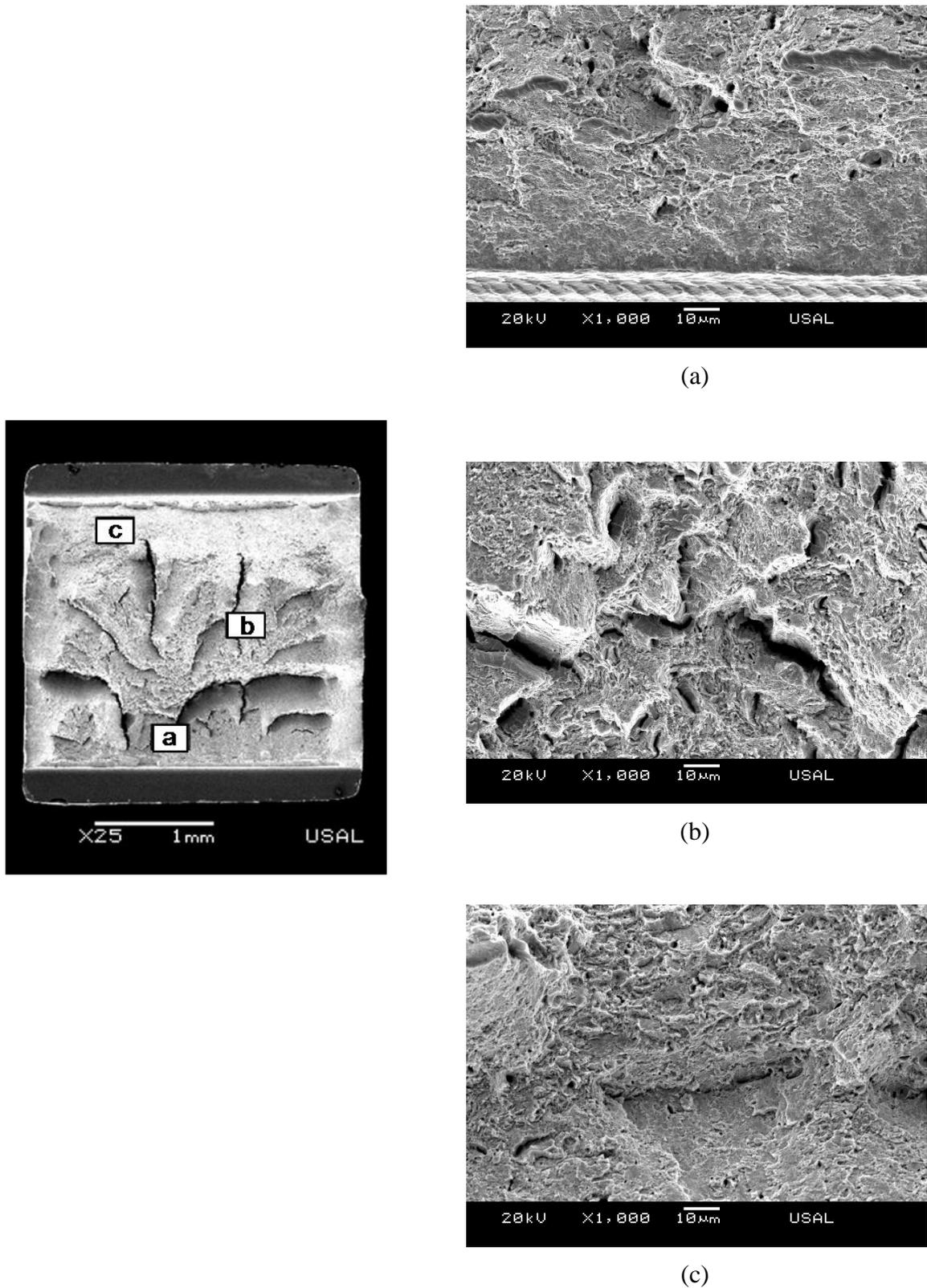


Fig. 3.16. Superficie de fractura de la probeta PAA7: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

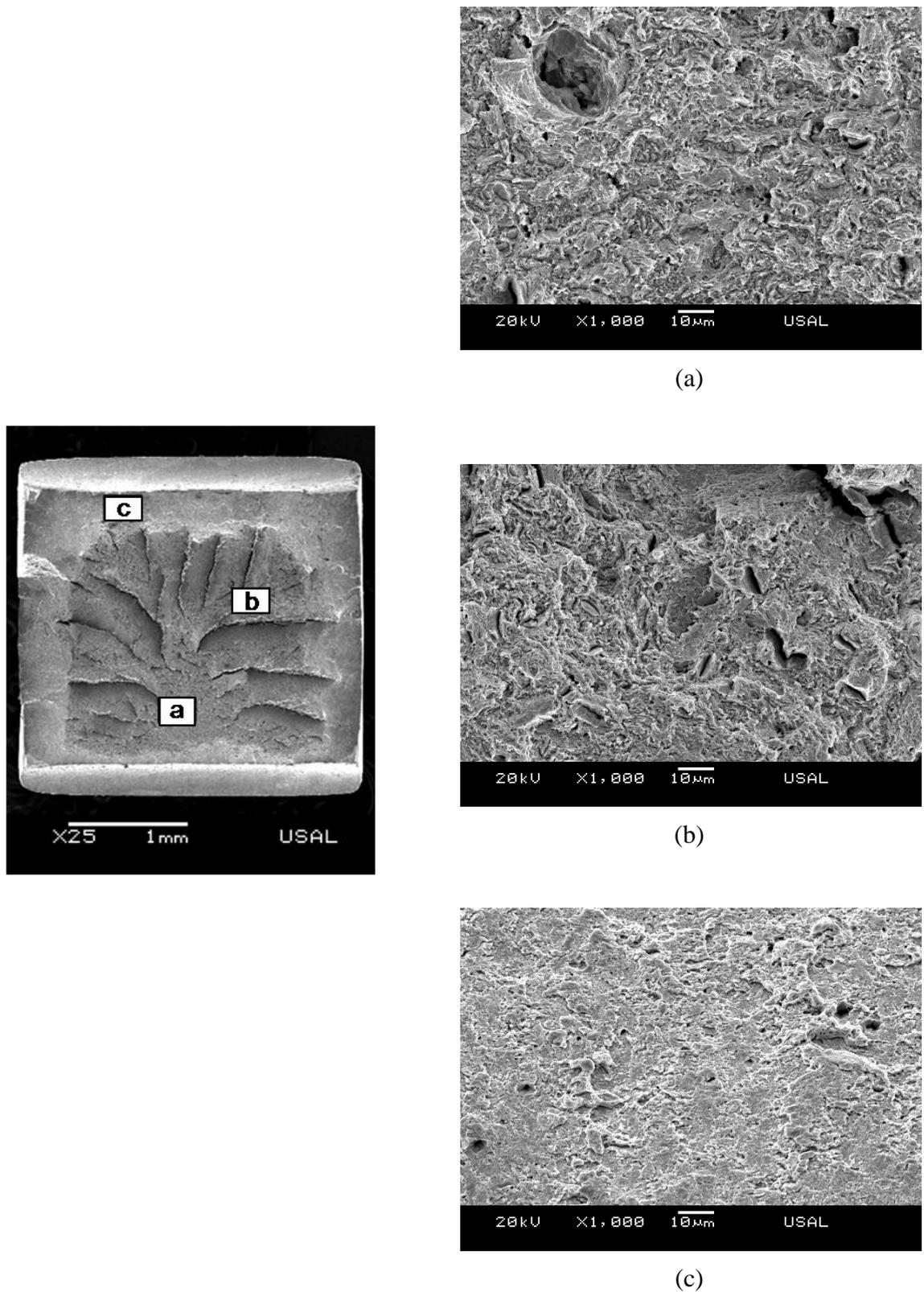


Fig. 3.17. Superficie de fractura de la probeta PCC7: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

De las micrografías obtenidas de los dos tipos de entallas analizadas se ha observado una disminución del tamaño de los microhuecos presentes en la ZPF a medida que aumenta el grado de trefilado (Fig. 3.18). Este hecho es debido a la disminución del espaciado interlaminar a medida que avanza dicho proceso, siendo la reorganización microestructural clave en la morfología de los micro-mecanismos que actúan en la fractura.

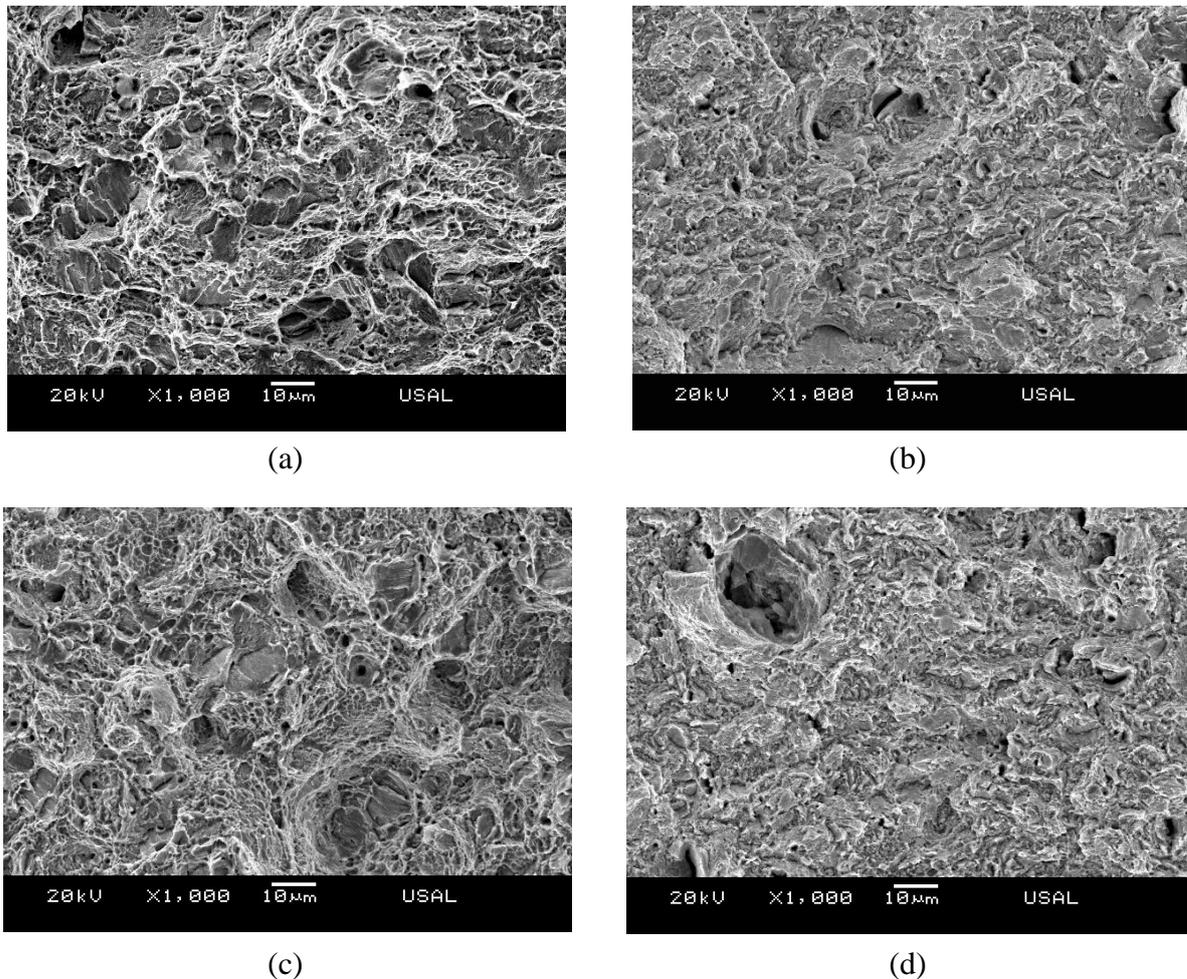


Fig. 3.18. Microhuecos generados en la ZPF: (a) PAA0, (b) PAA7, (c) PCC0 y (d) PCC7.

Además de la disminución del tamaño de los microhuecos, a lo largo del proceso de trefilado, en las micrografías pertenecientes a la alambre de pretensado comercial también se observan a simple vista algunos microhuecos los cuales presentan tamaños excepcionalmente superiores [Figs. 3.18 (b) y (d)]. Estos microhuecos pueden ser generados por micro-defectos que muestran una reorientación a lo largo del proceso de trefilado la cual no siempre va acompañada de una reducción de tamaño, como es el caso de las inclusiones de tipo duro.

Otro hecho observable en las micrografías es la disminución del tamaño de los microhuecos de la corona exterior a medida que avanza el proceso de trefilado, Fig. 3.19. La explicación de éste hecho también es atribuible a la reorganización microestructural del acero a medida que

avanza el proceso de trefilado. La variación del tamaño de los microhuecos de la zona de la CE, en el alambroón inicial y el alambre de pretensado, no es tan significativa como la variación que se observa en la ZPF. De igual forma que en la ZPF se observan algunos tamaños de microhuecos excepcionales para ambos tipos de entalla y para todas las superficies de fractura de los alambres ensayados.

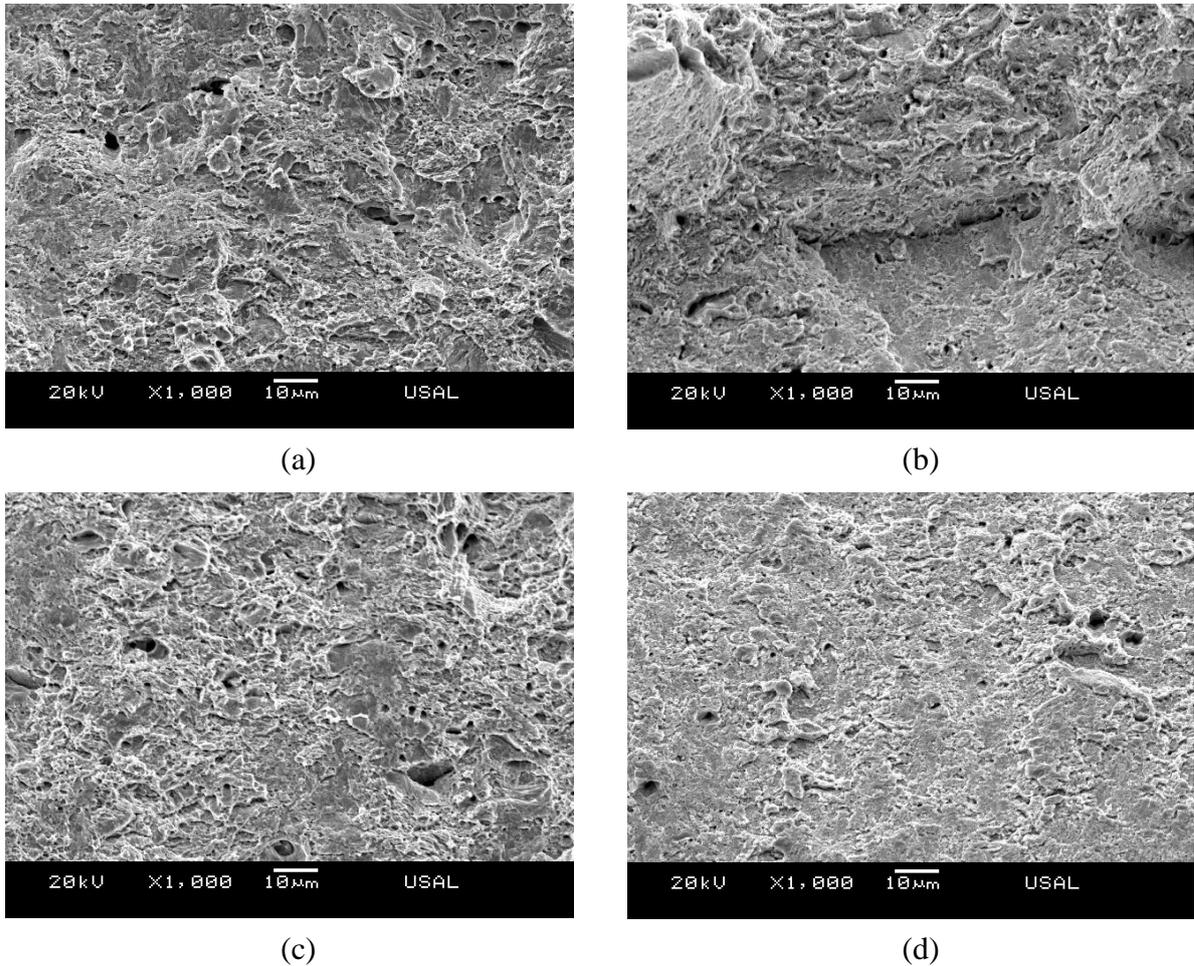


Fig. 3.19. Microhuecos generados en la zona de la corona exterior para: (a) PAA0, (b) PAA7, (c) PCC0 y (d) PCC7.

En las superficies de fractura de las probetas analizadas se ha observado la variación de las diferentes zonas a medida que aumenta el paso del proceso de trefilado del alambre ensayado, para ambos tipos de entalla estudiados. Las distintas zonas han sido medidas mediante el programa AnaliSYS 3.1, de dichas mediciones se ha obtenido el área de las distintas zonas de forma adimensional teniendo en cuenta para ello la relación A/A_S , siendo A el área de la zona medida y A_S el área total de la superficie de fractura analizada.

Con las diferentes medidas de las zonas de la superficie de fractura se ha realizado un gráfico en el cual se muestra la variación obtenida de dichas zonas para las probetas con entallas de tipo PAA y PCC ensayadas (Fig. 3.20).

Las medidas obtenidas de las distintas zonas de la superficie de fractura ratifican las dos tendencias anteriormente comentadas; la primera de ellas referente al aumento del área de la CE y la segunda a la disminución de la zona intermedia, ambas a medida que avanza el proceso de trefilado. Sin embargo, el área de la ZPF no experimenta variaciones significativas a lo largo del proceso de fractura para ambos tipos de entallas, aunque se puede observar un ligero aumento con el trefilado. La excepcionalidad a las tendencias anteriormente citadas, Fig. 3.20, la presentan las mediciones realizadas sobre las superficies de fractura pertenecientes al alambre de pretensado comercial para ambos tipos de entalla analizados. Dicha excepcionalidad es debida al proceso de relajación de tensiones, posterior al trefilado, al cual ha sido sometido dicho alambre unido a la gran deformación plástica acumulada que éste presenta.

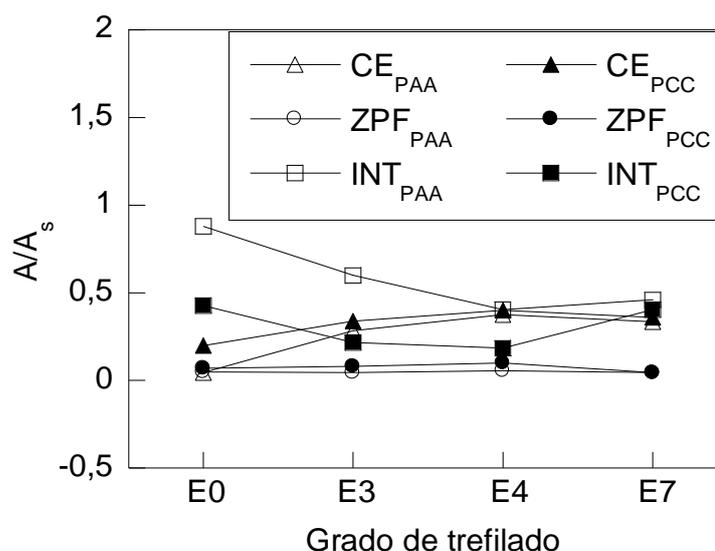


Fig. 3.20. Evolución del área adimensionalizada, de las distintas zonas de las superficies fractográficas para los dos tipos de probetas entalladas PAA y PCC, con el grado de trefilado.

3.1. Fractura anisótropa

El acero objeto de estudio presenta dos tipos de fractura: la fractura isótropa, en la cual la superficie de rotura está plenamente contenida en un plano transversal al eje longitudinal (o dirección de trefilado), y la fractura anisótropa en la cual la superficie de fractura presenta irregularidades en la forma de crestas y depresiones locales (AYASO *et al.*, 2005).

En las superficies de fractura analizadas se ha observado una deflexión del camino de fractura en los alambres pertenecientes al cuarto y al último paso del proceso de trefilado, con la formación de paredes totalmente verticales en el caso de los alambres de pretensado comercial, para ambos tipo de probetas entalladas PAA y PCC (Fig. 3.21).

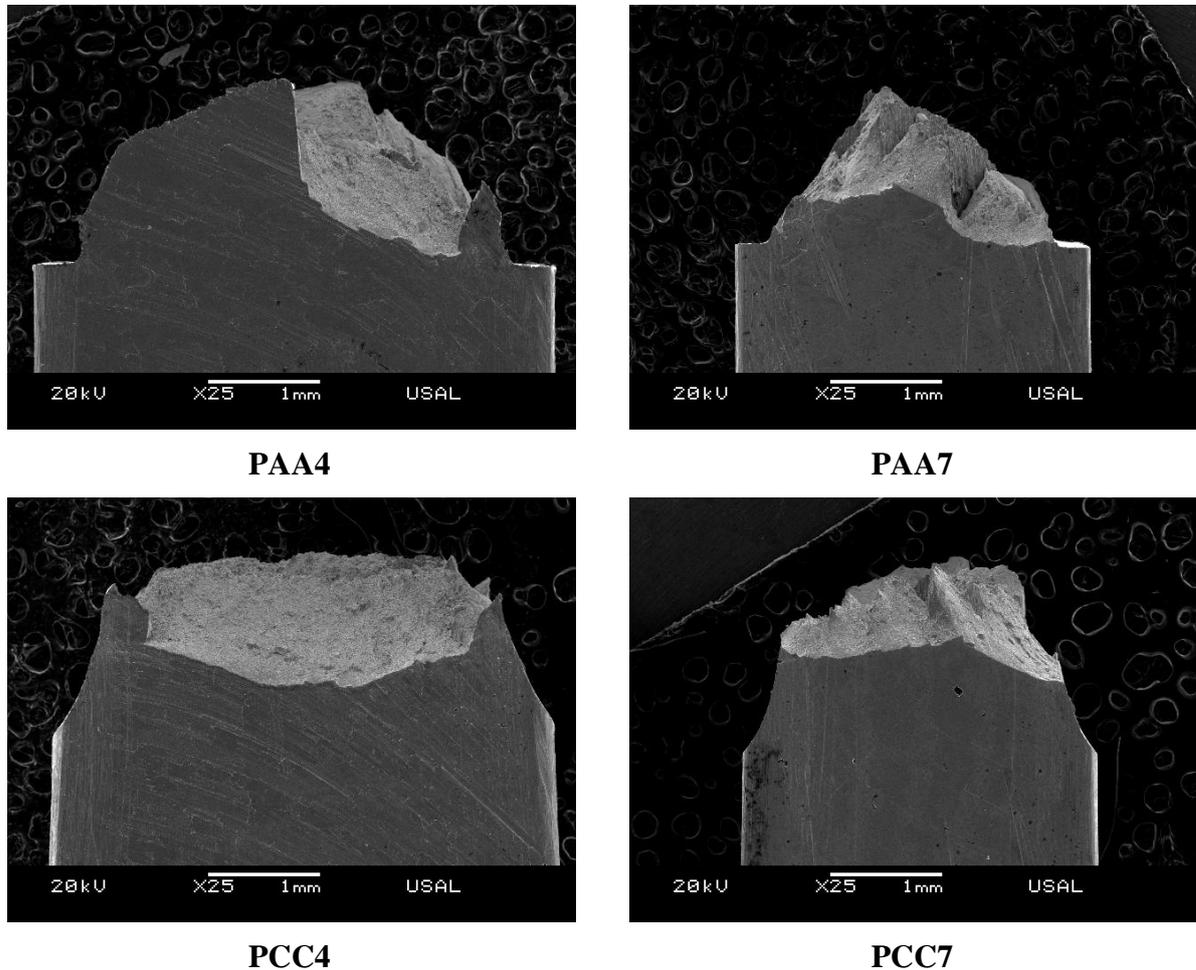


Fig. 3.21. Comportamiento anisótropo en fractura de las probetas PAA y PCC.

Para cuantificar la deflexión del camino de fractura presente en éstas superficies primero se ha medido la distancia entre fondos de entalla b seguida de la altura máxima alcanzada por la fractura anisótropa h , obteniéndose el parámetro adimensional h/b , el cual indica el grado de deflexión del camino de fractura que poseen las superficies de fractura analizadas (Fig. 3.22).

Las medidas de la deflexión del camino de fractura (h/b) obtenidas de las superficies de fractura pertenecientes a los alambres del cuarto paso del proceso de trefilado y del último paso de dicho proceso (alambre de pretensado comercial), para ambos tipos de probetas entallas analizadas (PAA y PCC) se muestran en la siguiente Tabla 3.1.

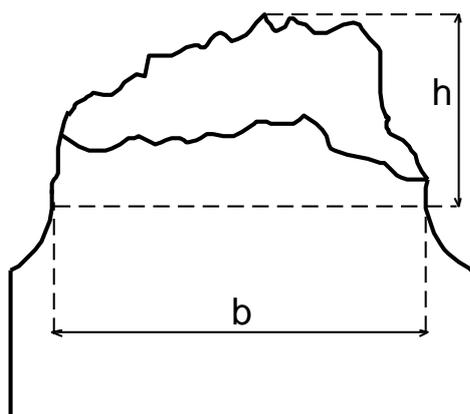


Fig. 3.22. Esquema de la medida de deflexión del camino de fractura.

Con las mediciones realizadas se observa un mayor comportamiento anisótropo en fractura en las probetas con entallas de tipo PAA (dichas entallas presentan un menor radio de curvatura que las entallas de tipo PCC).

La fractura anisótropa se presenta en alambres fuertemente trefilados debido a la reorientación microestructural, a favor de la dirección del proceso de trefilado, que experimentan las láminas de cementita y ferrita que conforman las colonias de perlita. En dichas mediciones, para ambos tipos de entallas analizados, también los alambres pertenecientes al acero de pretensado comercial son los que mayor comportamiento localmente anisótropo presentan.

Tabla 3.1. Medida de la deflexión del camino de fractura (h/b).

	PAA4	PAA7	PCC4	PCC7
h/b	0.39	0.53	0.14	0.35

Posterior al análisis de la deflexión del camino de fractura se han realizado las micrografías de las distintas zonas de dichas superficies de fractura en perfil. En éstas se observan los micro-mecanismos que en ellas imperan como; microhuecos en los fondos de la entalla en la ZPF, clivajes elongados en las paredes inclinadas de la zona intermedia y finalmente microhuecos con gran elongación, rasgados, en las paredes con inclinaciones próximas a 45° que conforman la CE (Figs. 3.23-3.26).

No obstante, en las micrografías de perfil pertenecientes a la probeta PCC4, no se han diferenciado dichas zonas, puesto que ésta no posee una fractura localmente anisótropa pronunciada debido a la cual sólo se han podido diferenciar pequeñas crestas y valles como se observa a continuación, Fig. 3.26.

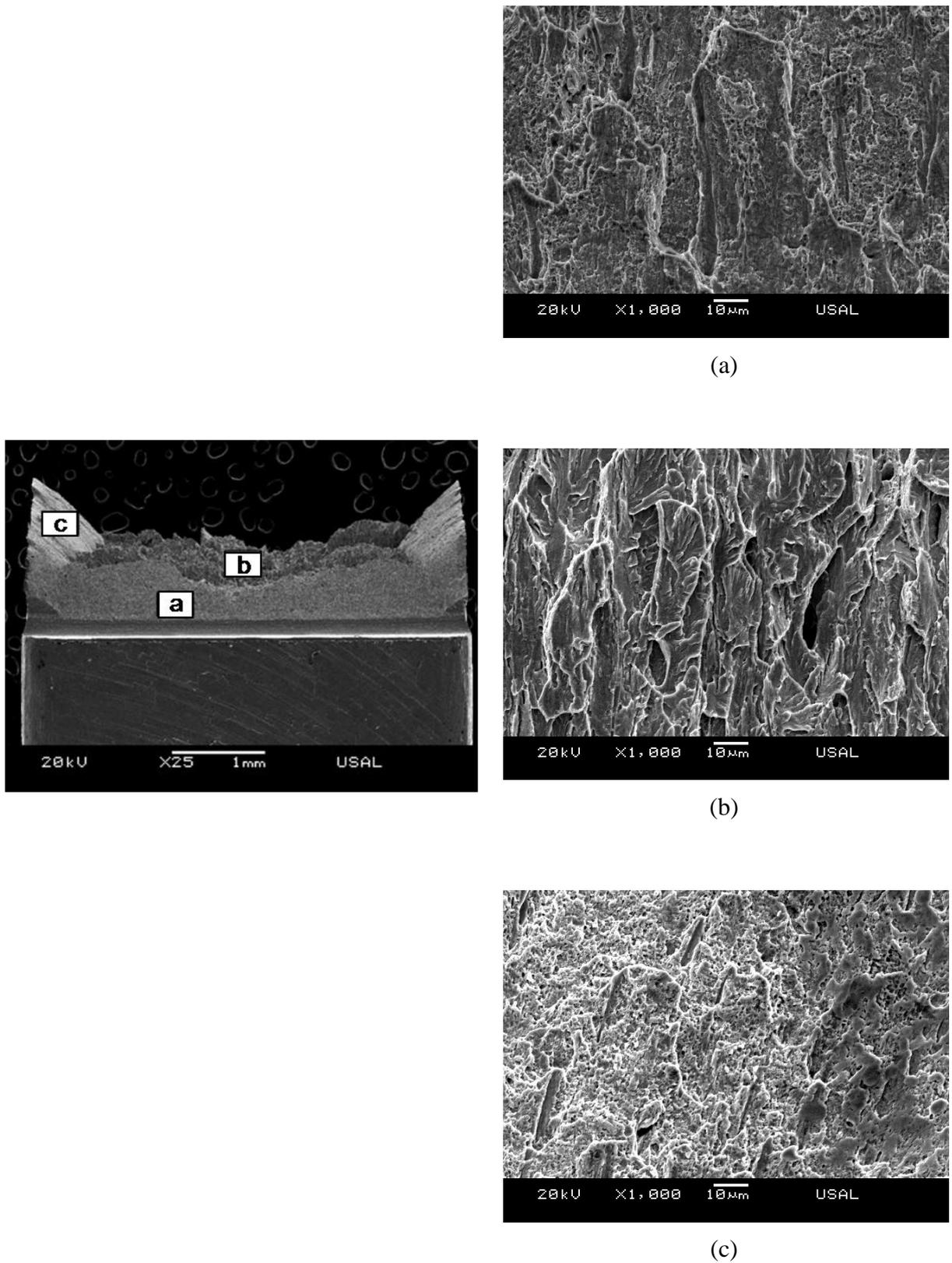


Fig. 3.23. Micro-mecanismos presentes en la superficie de fractura de las probetas PAA4, (a) microhuecos elongados en la ZPF, (b) clivajes en la zona intermedia y (c) micro-huecos elongados de la CE.

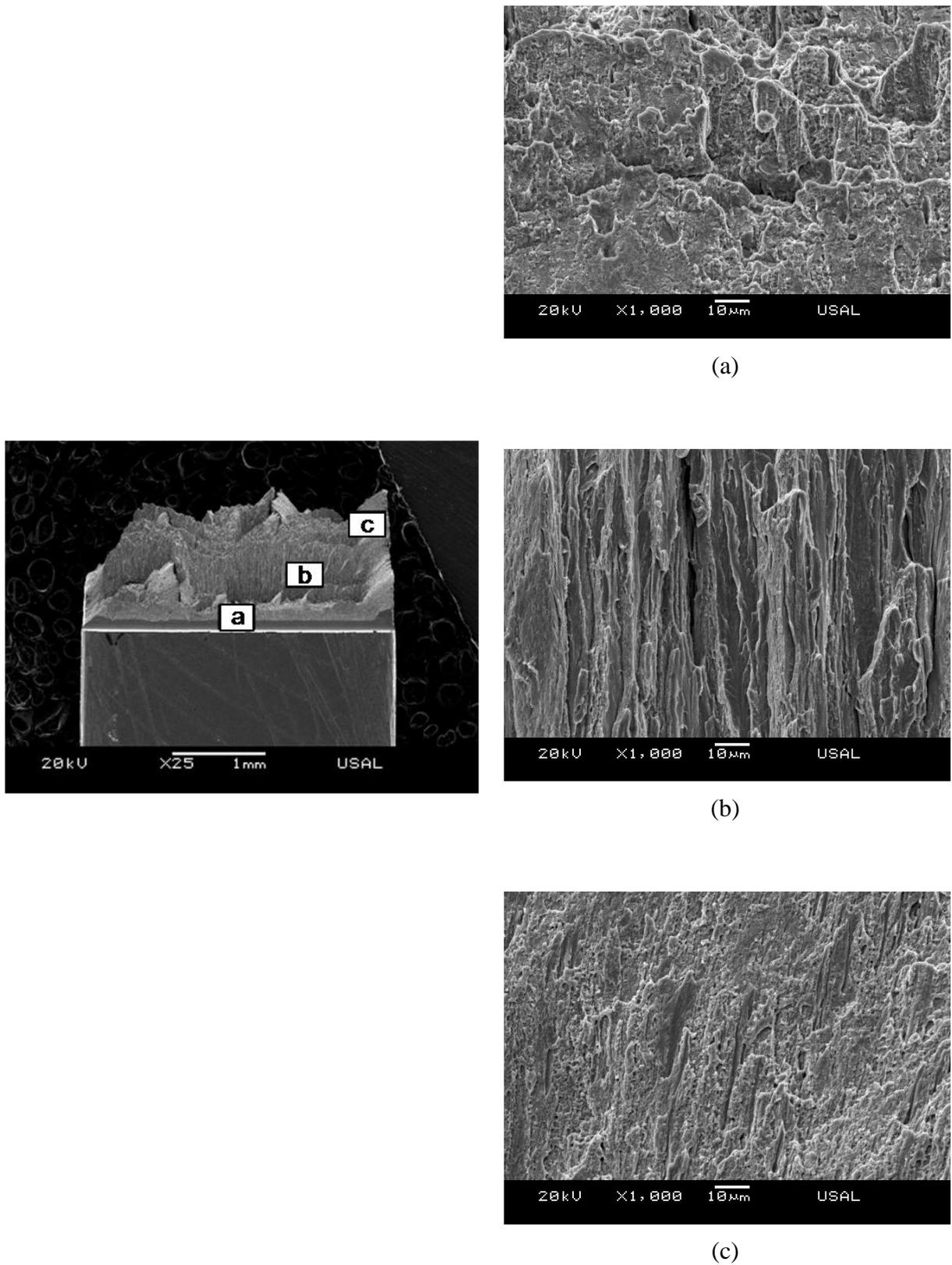


Fig. 3.24. Micro-mecanismos presentes en la superficie de fractura de las probetas PAA7, (a) microhuecos elongados en la ZPF, (b) clivajes en la zona intermedia y (c) micro-huecos elongados de la CE.

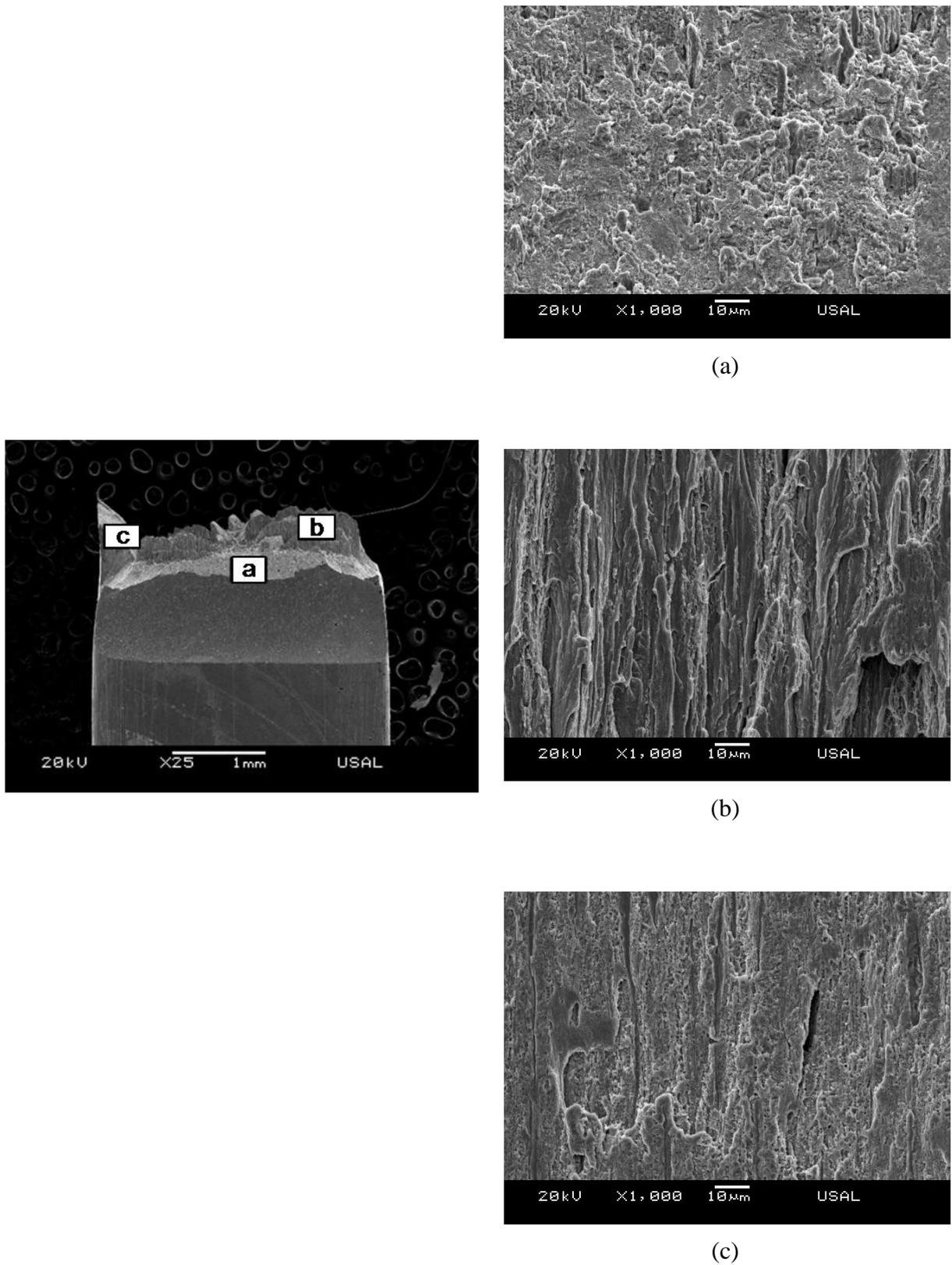


Fig. 3.25. Micro-mecanismos presentes en la superficie de fractura de las probetas PCC7, (a) microhuecos elongados en la ZPF, (b) clivajes en la zona intermedia y (c) micro-huecos elongados de la CE.

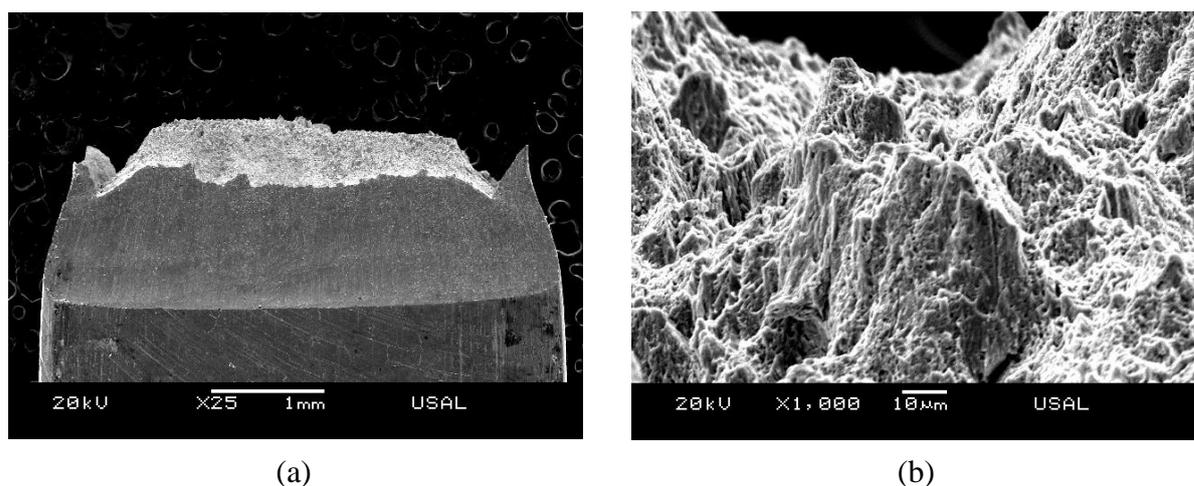


Fig. 3.26. (a) Superficie de fractura de la probeta PCC4, (b) detalle del comienzo de crestas y valles en la Z_{INT} .

En las micrografías obtenidas de las distintas zonas de la superficie de fractura, sobre los perfiles de las distintas probetas, se observan en la ZPF y en la CE microhuecos elongados. En dichas micrografías de estas zonas pertenecientes a los alambres del cuarto paso del proceso de trefilado, Fig. 3.23, la diferencia entre la elongación de microhuecos en ambas zonas, ZPF y CE, es mínima; sin embargo, en las superficies de fractura de los alambres de pretensado, último paso del proceso, la diferencia de esbeltez de los microhuecos de ambas zonas es muy significativa, presentándose microhuecos muy elongados en la CE, paredes a 45° , y con muy poca esbeltez en la ZPF para ambas entallas estudiadas, Figs. 3.24-3.25. La esbeltez presentada en los microhuecos presentes en la ZPF es incluso menor, a simple vista, que la esbeltez presentada por estos microhuecos en la misma zona para los alambres pertenecientes al cuarto paso del proceso de trefilado (Fig. 3.26).

Otra de las observaciones que se extraen de dichas micrografías es la gran esbeltez que presentan los clivajes que conforman las paredes verticales, dentro de la zona intermedia, siendo los de mayor elongación los presentes en las probetas mecanizadas a partir de los alambres de pretensado (probetas PAA7 y PCC7). Para ambos tipos de entallas analizadas pertenecientes al mismo paso de proceso de trefilado no se observa variación entre la elongación de los clivajes de la zona intermedia (Fig. 3.27). La gran esbeltez que presentan estos clivajes es debida a la reorganización micro-estructural que sufre el alambre a lo largo del proceso de trefilado, reducción del espaciado interlaminar, orientación de las colonias de perlita y aumento de esbeltez de las mismas. En ambos tipos de entallas las facetas de clivajes presentes en la zona intermedia, paredes cuasi-verticales, son muy similares, variando únicamente de un paso de trefilado a otro, en los cuales con el aumento del grado de trefilado del alambre éstos presentan una mayor esbeltez.

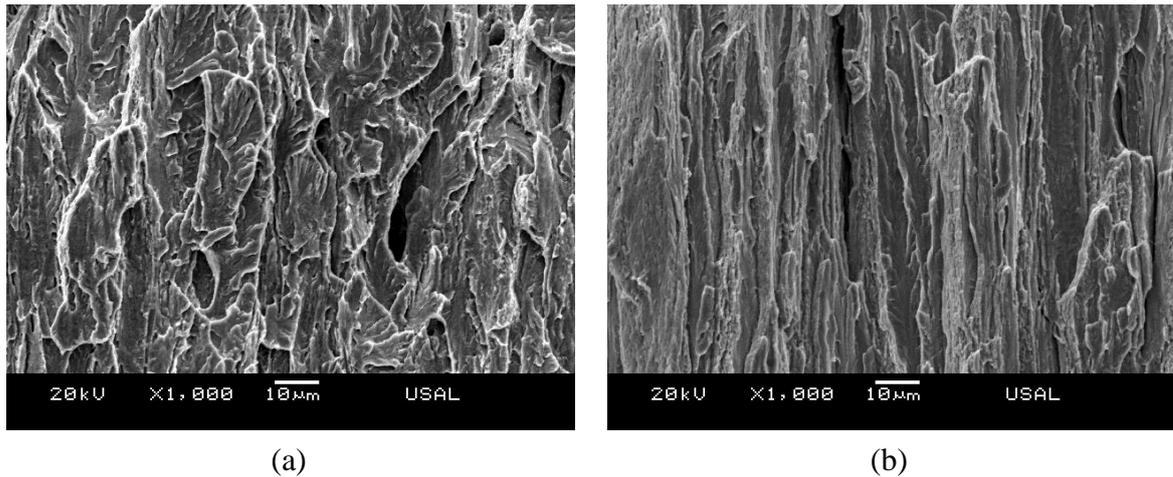


Fig. 3.27. Clivajes elongados en las paredes verticales de (a) los alambres del cuarto paso del proceso de trefilado y (b) del alambre de pretensado.

3.2. Análisis micrográfico de probetas de ensayos interrumpidos

Con el objeto de analizar el papel de los micro-defectos presentes en la micro-estructura, tanto los generados durante el propio proceso de trefilado como los generados y la evolución de éstos durante los ensayos a los que han sido sometidos dichas probetas, se han realizado ensayos de tracción de ambos tipos de probetas entalladas en los cuales no se ha llegado a la rotura por separación total de superficies. Para conseguir el máximo daño previo a la fractura total se ha tomado como referencia las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos anteriormente realizados para este tipo de probetas en particular. Como se ha comentado en apartados anteriores, las probetas entallas de tipo CC presentan curvas $F-u$ en las cuales se produce un descenso de carga antes de la fractura total, debido a lo cual ha sido fácilmente identificable el momento de interrumpir el ensayo previo a la fractura. Sin embargo, en las curvas $F-u$ pertenecientes a las probetas entallas de tipo AA no existe dicho descenso de carga, por lo que se han interrumpido los ensayos tomando como referencia las cargas máximas alcanzadas por dichas probetas para cada paso del proceso de trefilado.

Una vez realizados los ensayos de tracción interrumpidos de los dos tipos de probetas entalladas analizados, PAA y PCC, pertenecientes a los alambres de los distintos pasos del proceso de trefilado estudiados (alambroón inicial, tercer y cuarto paso y alambre de pretensado), se ha procedido a realizar cortes perpendiculares a la sección longitudinal del alambre aproximadamente de 1cm de altura en los cuales estaba presente la zona de las entallas. En dichas muestras obtenidas de los distintos ensayos interrumpidos realizados ya se podía observar, con ayuda de una lupa, los daños provocados en las diferentes entallas, tal y como se muestra en la Fig. 3.28.

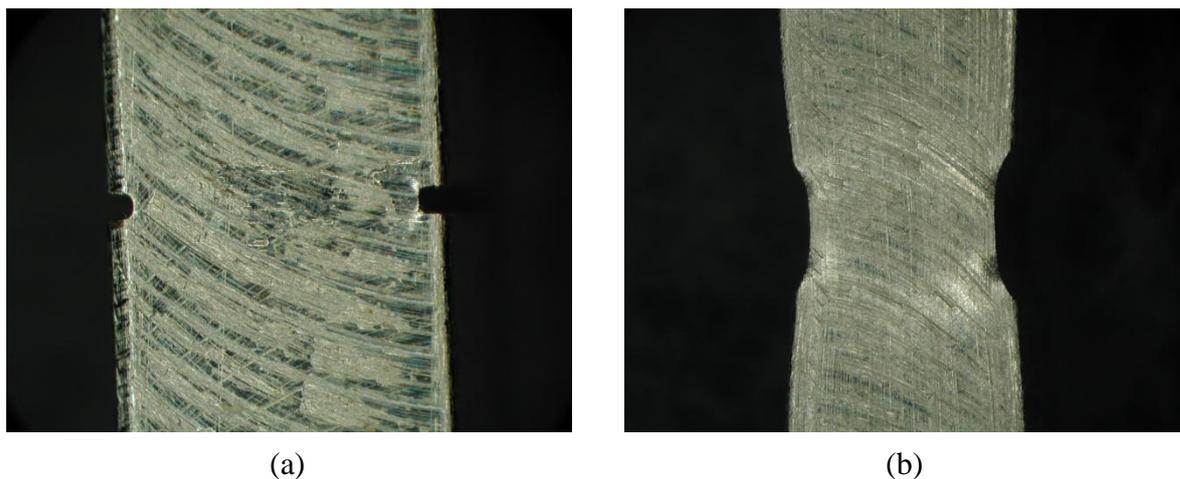


Fig. 3.28. Fotos de probetas prismáticas entalladas (a) de tipo PAA y (b) de tipo PCC, pertenecientes a ensayos de tracción interrumpidos.

Para poder observar los daños presentes en la micro-estructura de estas probetas se embutieron, pulieron y atacaron de igual forma que las muestras analizadas anteriormente (apartado 2). No obstante, el interés del estudio se centró en analizar el micro-daño producido a lo largo de las secciones longitudinales de la muestra, para lo cual se realizaron sucesivos pulidos, llegando hasta la sección longitudinal media de la misma. Las muestras fueron desbastadas mediante pulidos sucesivos de 5 mm de espesor, tras los cuales la muestra se preparaba para ser observada en el MEB. Del análisis microscópico de las muestras, de sus diferentes secciones longitudinales, se obtuvieron multitud de micrografías las cuales se muestran a continuación, asociadas a los distintos micro-daños encontrados.

Uno de los micro-daños más observado en las distintas muestras es el producido por la curvatura de las distintas láminas que conforman las pseudocolonias el cual, como se ha comentado en el apartado anterior 4.2, produce la rotura de las láminas que la conforman, así como un efecto posterior de unión entre éstas denominado de cremallera (Fig. 3.29). En dicha figura se muestra una micrografía perteneciente a una probeta mecanizada a partir del alambroón inicial, PAA0, en el cual no hay pseudocolonias perlíticas y sin embargo sí se pueden señalar las curvaturas de las láminas, producidas durante el ensayo, de las colonias que posiblemente progresarían a pseudocolonias perlíticas en sucesivos pasos de trefilado.

La rotura por curvatura de las láminas de ferrita y cementita se produce durante el proceso de trefilado, debido a la deformación que en dicho proceso ocurre, y durante los ensayos de tracción. La mayor deformación de estas láminas ocurre en el proceso de trefilado, pero las sollicitaciones a las cuales se someten los alambres durante los ensayos de tracción hace que éstas se acentúen e incluso que se generen en láminas sin curvatura alguna en los alambres de procedencia de las probetas.

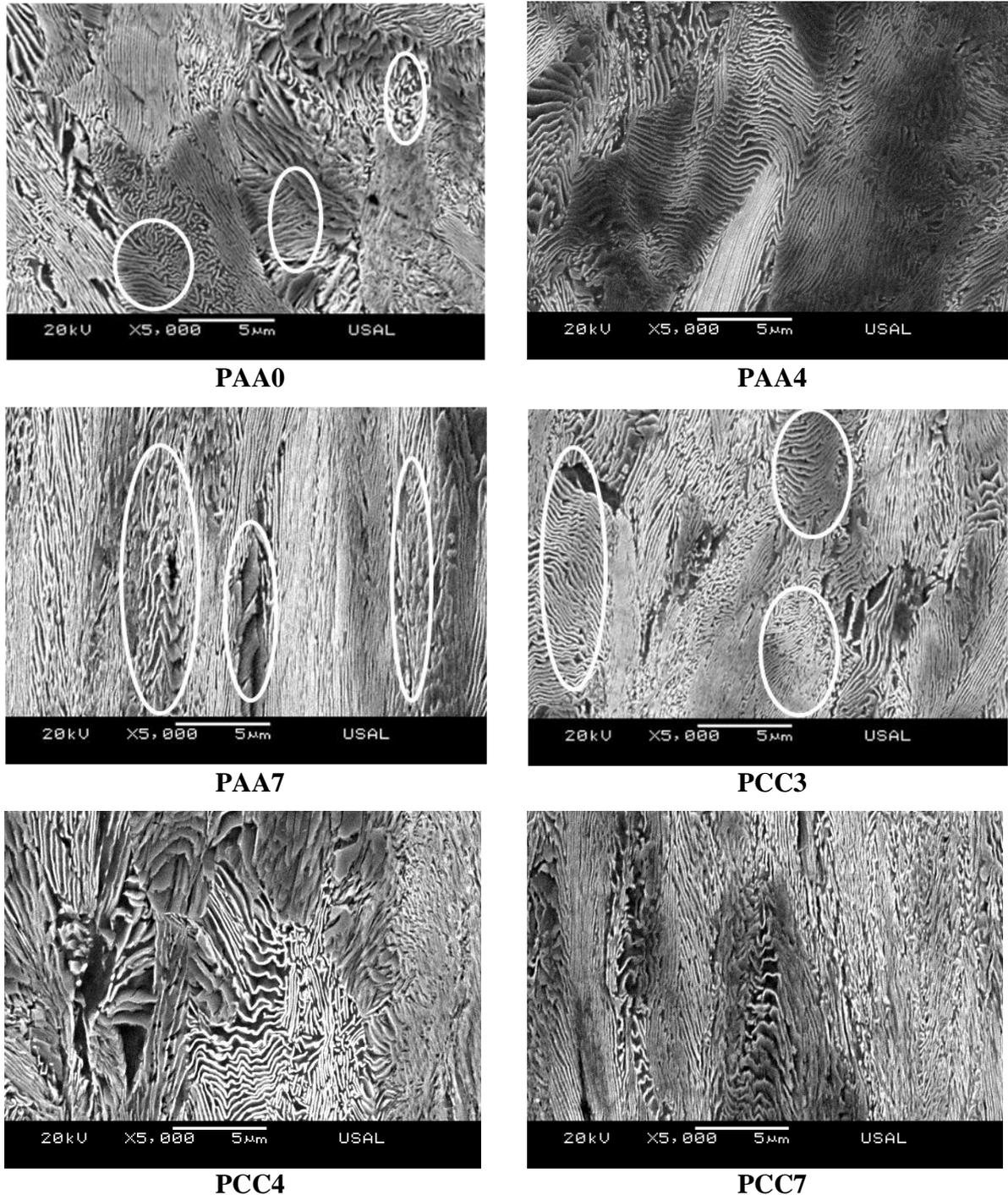


Fig. 3.29. Micro-daño presente en las pseudocolonias de las probetas PAA y PCC sometidas a ensayos de tracción interrumpidos.

Se han podido observar multitud de láminas curvadas y fragmentadas en las pseudocolonias presentes en las distintas probetas objeto de estudio. Sin embargo las estudiadas, de forma cualitativa, en las probetas PAA y PCC, presentan mayores curvaturas y fracturas que las láminas de las pseudocolonias presentes en los alambres de procedencia de dichas probetas (Fig. 3.30). Este hecho era previsible, puesto que en las inmediaciones de las entallas de las probetas ensayadas se producen grandes deformaciones previas a la fractura, las cuales

producen mayor constreñimiento del material, lo cual conlleva a una mayor visualización de estos microdefectos en las proximidades de la entalla.

En la Fig. 3.30 cabe no sólo señalar la mayor curvatura y fractura de las láminas que conforman las pseudocolonias, sino también la mayor reorganización microestructural, en cuanto a reducción de espaciado interlaminar y orientación de las colonias de perlita se refiere, presente en la micrografía perteneciente a la probeta PAA4.

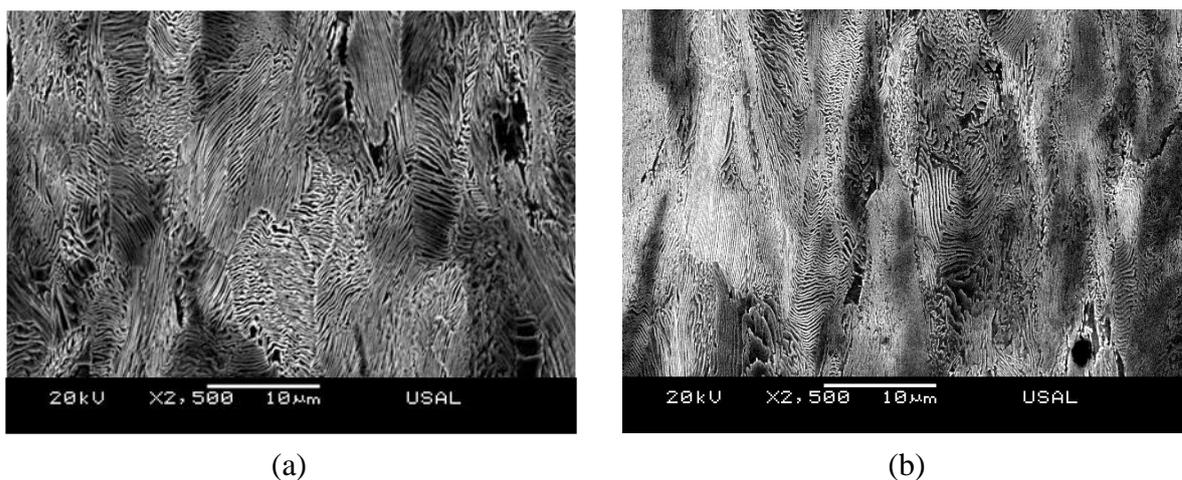


Fig. 3.30. Micrografías pertenecientes al alambre del cuarto paso del proceso de trefilado; (a) del alambre de procedencia, E4, y (b) de la probeta mecanizada y ensayada bajo sollicitación de tracción, PAA4.

Otro de los micro-defectos encontrado en la micro-estructura de las probetas de los ensayos interrumpidos PAA y PCC es la rotura por curvatura, Fig. 3.31. El micro defecto generado por las pseudocolonias de perlita se ha observado en todas las probetas analizadas de los distintos ensayos. La magnitud del mismo es similar a los ya estudiados en el apartado 4.2.3.

La rotura por curvatura es más fácilmente observable en la micro-estructura de los alambres de la cadena de trefilado intermedios, tercer y cuarto paso del proceso, al igual que sucedía en los estudios micro-estructurales previos de alambres de trefilado sin ensayar.

En las micrografías analizadas también se han observado microdescolonizaciones las cuales, como se comentó en el apartado 4.2.4, se sitúan en el límite de colonias y se producen por el acomodamiento entre las mismas, Fig. 3.32. En éstos casos, al igual que sucedía en estudios anteriores, no se han observado en las micrografías de las probetas mecanizadas a partir del alambroón inicial, alambre sin trefilar.

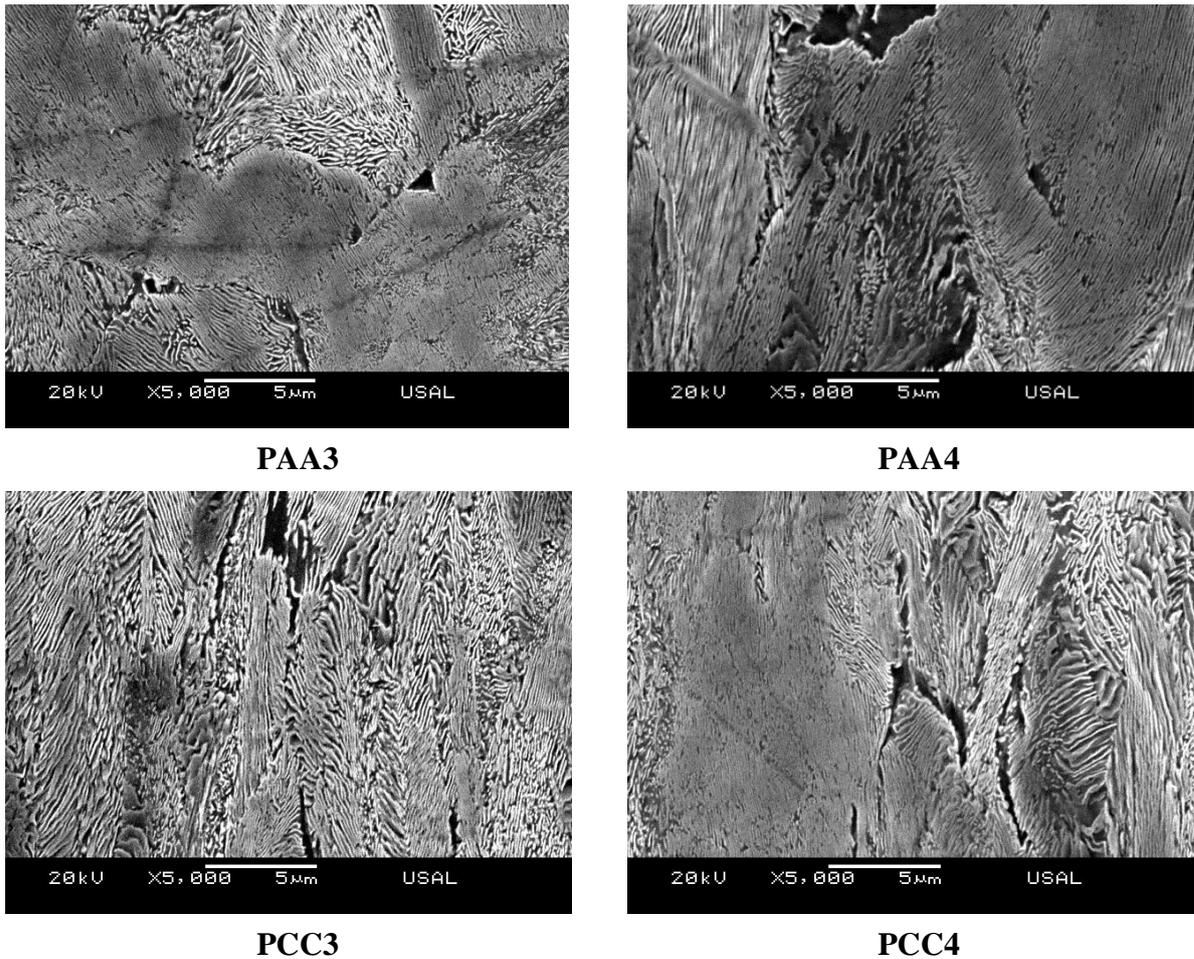


Fig. 3.31. Micro-defecto de rotura por curvatura en las probetas de los ensayos interrumpidos, PAA y PCC.

Uno de los micro-daños analizados con más interés en la presente Tesis es el generado por las inclusiones presentes en este acero. En las siguientes Figs. 3.33-3.34, se muestran las micrografías en las cuales se resumen los micro-defectos generados por las mismas.

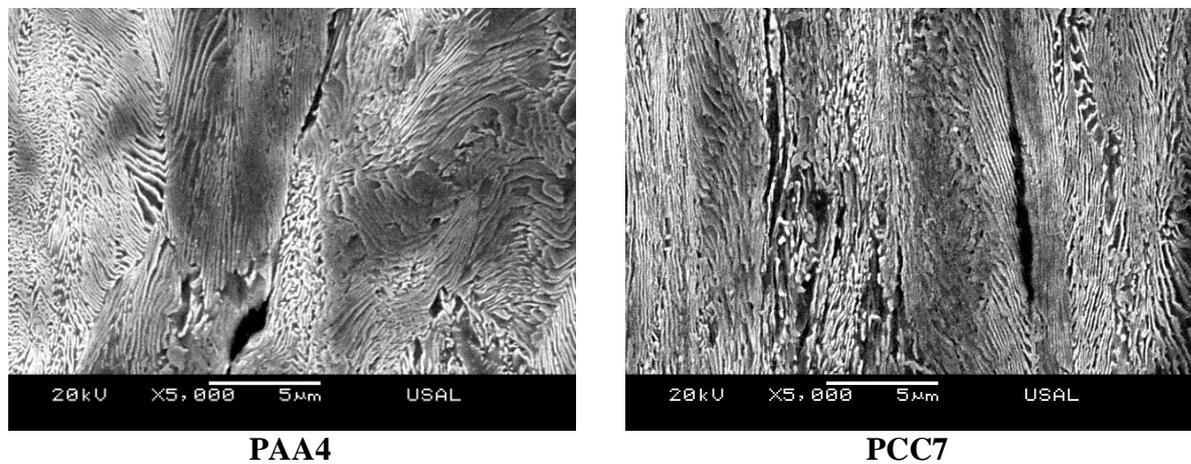


Fig. 3.32. Microdescolonzaciones presentes en las probetas de los ensayos interrumpidos PAA y PCC.

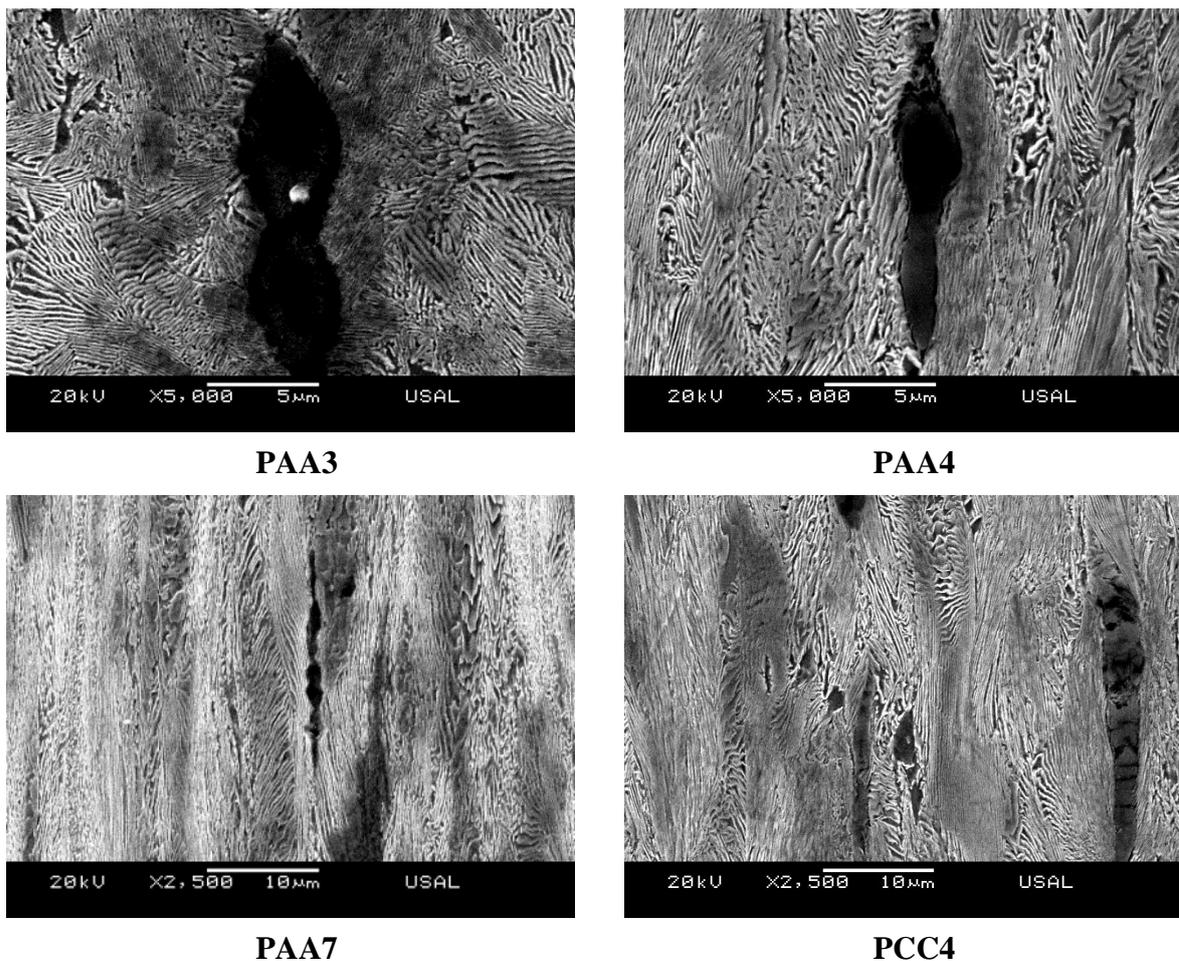


Fig. 3.33. Micrografías con micro-defectos generados por inclusiones de tipo mezcla pertenecientes a las probetas de los ensayos interrumpidos PAA y PCC.

En los micro-defectos generados por las inclusiones de tipo mezcla se ha podido observar cómo, en las probetas con entallas de menor radio de curvatura, PAA, y dentro de éstas en las que proceden de alambres pertenecientes a los primeros pasos del proceso de trefilado en particular, tercero y cuarto, se han generado micro-fisuras alrededor de las mismas debido a la separación entre este tipo de inclusión y las colonias de perlita colindantes. Cabe señalar la imperceptible separación existente entre estas inclusiones y las colonias de perlita circundantes en las micrografías pertenecientes a la probeta PAA7, Fig. 3.33. Por otra parte, las inclusiones de tipo mezcla estudiadas en las micrografías pertenecientes a las probetas de los ensayos interrumpidos PCC se muestran más fragmentadas, pero al igual que en el caso de las analizadas en la probeta PAA7 presentan micro-fisuras de menor tamaño a su alrededor.

En las inclusiones de tipo duro observadas en las micrografías correspondientes a ambos tipos de probetas, PAA y PCC, se observan las micro-fisuras generadas alrededor de éstas, siendo mayores cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre de procedencia y mayor es el radio de curvatura de la entalla de dichas probetas, Fig. 3.34.

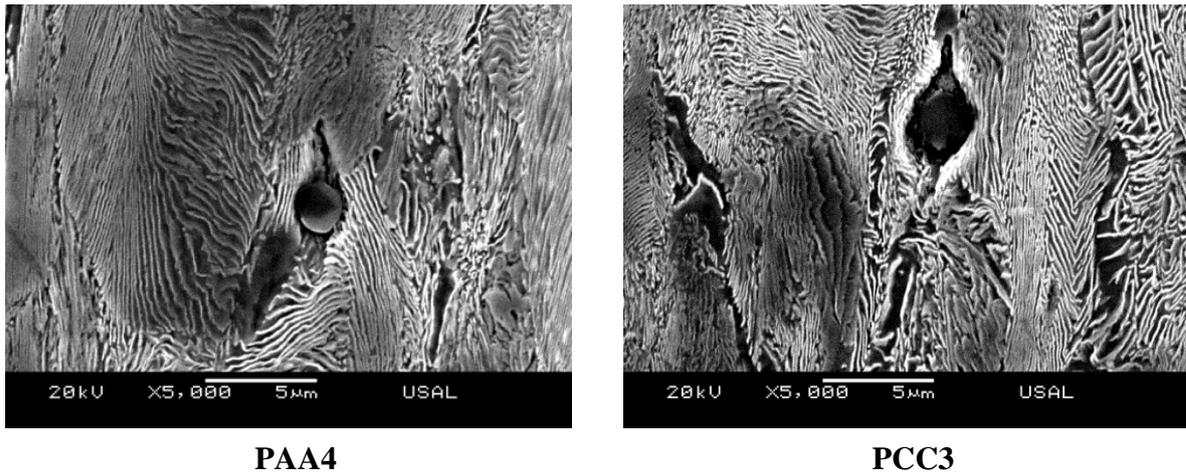


Fig. 3.34. Micrografías con micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro pertenecientes a las probetas de los ensayos interrumpidos PAA y PCC.

Los micro-defectos intracoloniales observados en los sucesivos pulidos de dichas probetas pertenecientes a los ensayos interrumpidos muestran una dirección predominante a 45° , como se comentó en apartados anteriores como evolución de garras de leopardo en colonias con láminas orientadas en la dirección de trefilado, Fig. 3.35. Dichos microdefectos se han observado en todas las probetas analizadas que han sido sometidas a ensayos interrumpidos.

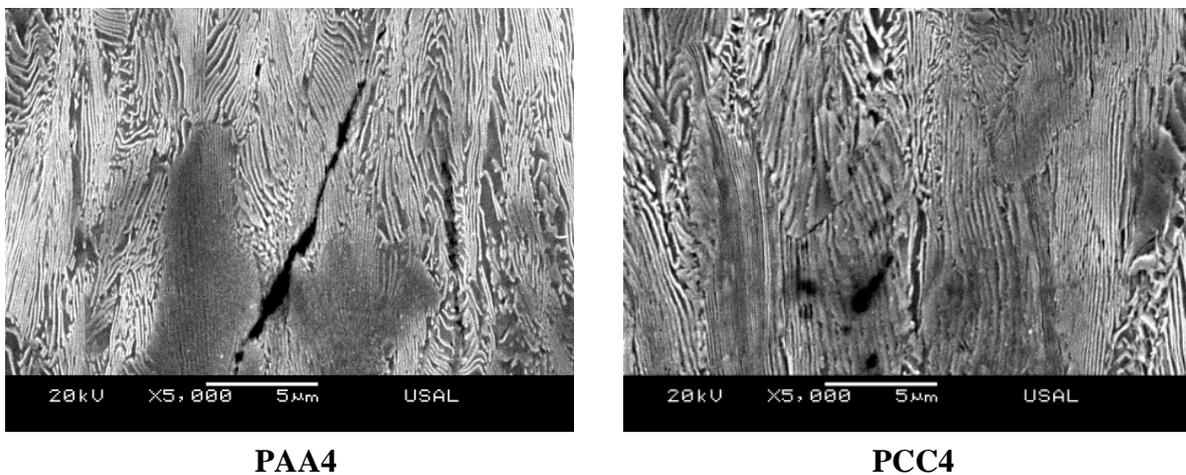


Fig. 3.35. Micro-defectos a 45° presentes en las probetas prismáticas de los ensayos interrumpidos PAA y PCC.

Dentro del análisis micrográfico de las probetas de ensayos interrumpidos, PAA y PCC, se han observado multitud de desgarros intercoloniales, Fig. 3.36, algunos asociados a micro-descolonizaciones o inclusiones, aunque en su mayoría parecen ser vestigios del borde del grano austenítico previo, puesto que los mismos son menos visibles en la microestructura del alambre de pretensado final.

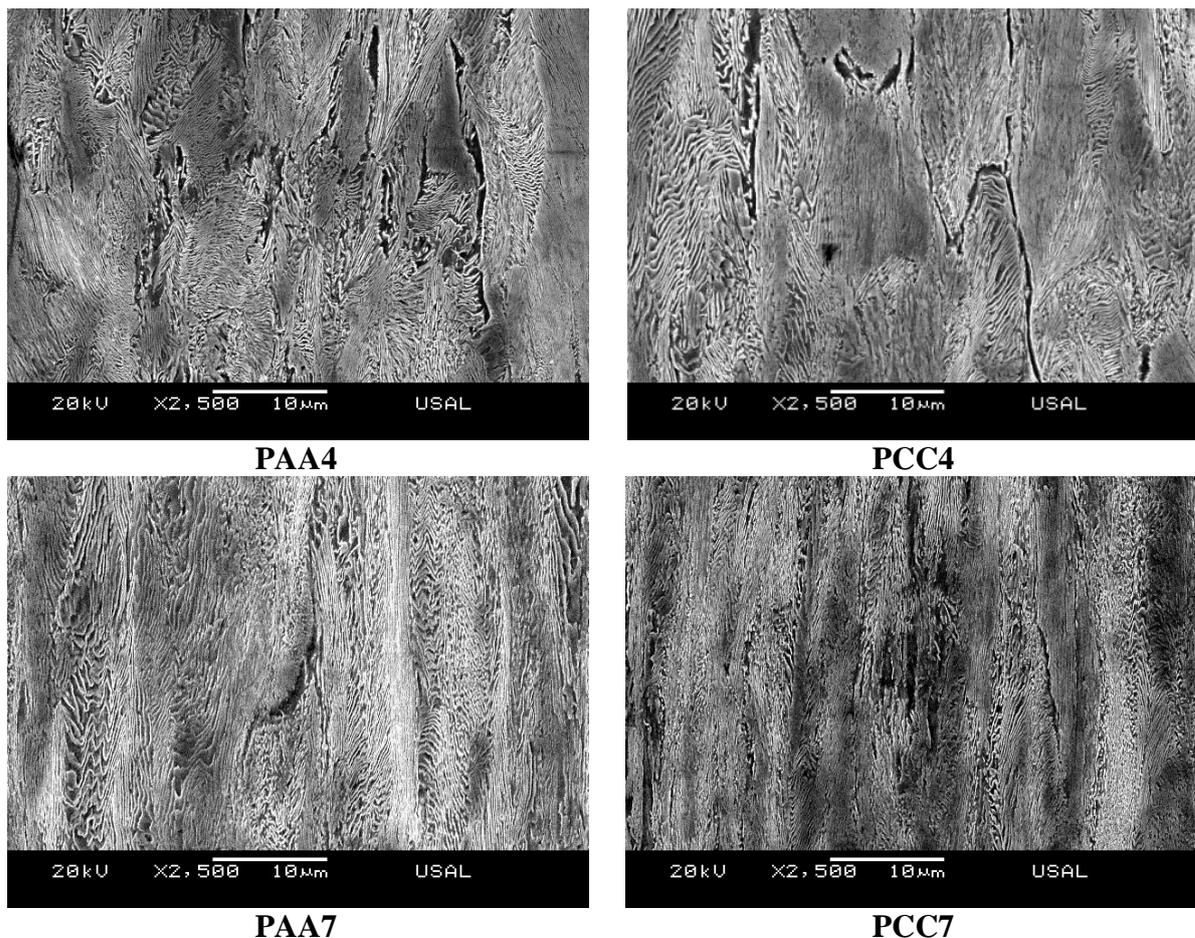


Fig. 3.36. Desgarros intercoloniales obtenidos en las probetas de los ensayos interrumpidos.

Dentro del análisis micrográfico de las probetas prismáticas de los ensayos interrumpidos tipo PAA se han podido observar micro-fisuras previas a la fractura total, las cuales comienzan en el fondo de entalla. En éstas micro-fisuras se aprecia el avance a través de la microestructura perlítica. En la Fig. 3.37 se muestra la micro-fisura obtenida en la probeta PAA3, la cual presenta una gran deflexión del camino de fractura al inicio producida al atravesar una pseudocolonia. La micro-fisura presenta una dirección de 45° y la deflexión local provoca un ángulo próximo a los 90° . En las micrografías pertenecientes a esta probeta también se muestra el avance de la micro-fisura a través de láminas orientadas (atravesándolas a 45°) bordes de colonias (con previa micro-descolonización) y pseudocolonias.

Dentro del análisis micrográfico de la probeta del ensayo interrumpido PAA4 también se pueden observar micro-fisuras con comienzo en los fondos de entalla. En estas se muestra el avance de la micro-fisura con direcciones cercanas a los 45° . El avance de la micro-fisura se produce a través de colonias orientadas y bordes de colonia. Cabe señalar el avance de la fisura a través de una colonia con láminas orientadas a 45° , al comienzo de la misma en la Fig. 3.38, en la cual la micro-fisura deflece a través de ella por una garra de leopardo.

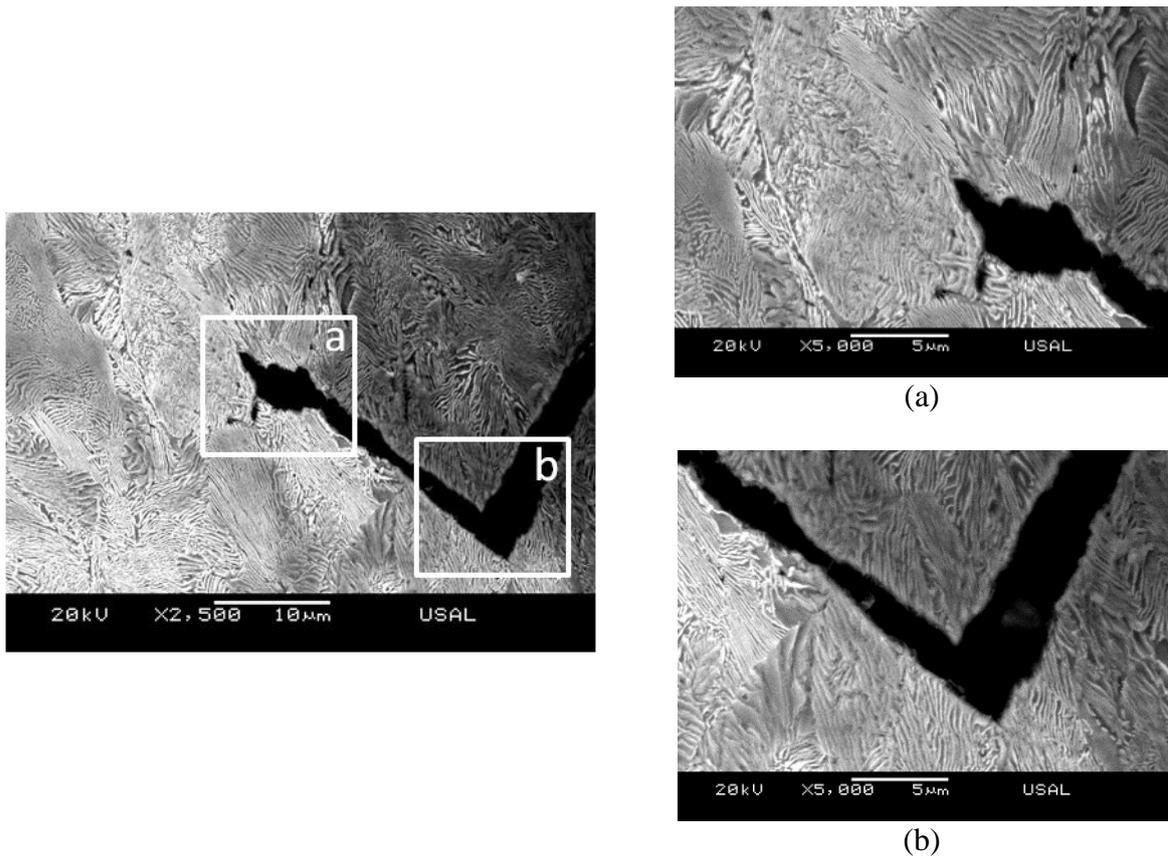


Fig. 3.37. Avance micro-fisura obtenido en el fondo de entalla de la probeta prismática del ensayo interrumpido PAA3.

En las probetas de los ensayos interrumpidos PAA7 también se han observado micro-fisuras que parten de los fondos de ambas entallas. En estas se muestra como la dirección de las micro-fisuras es mayor que en las observadas anteriormente, aunque siga siendo próxima a 45° . El avance de la micro-fisura se produce a través de todo tipo de colonias con láminas orientadas o sin ellas, Fig. 3.39. En este caso se puede ver como la micro-fisura sigue una determinada dirección sin producirse deflexiones apreciables.

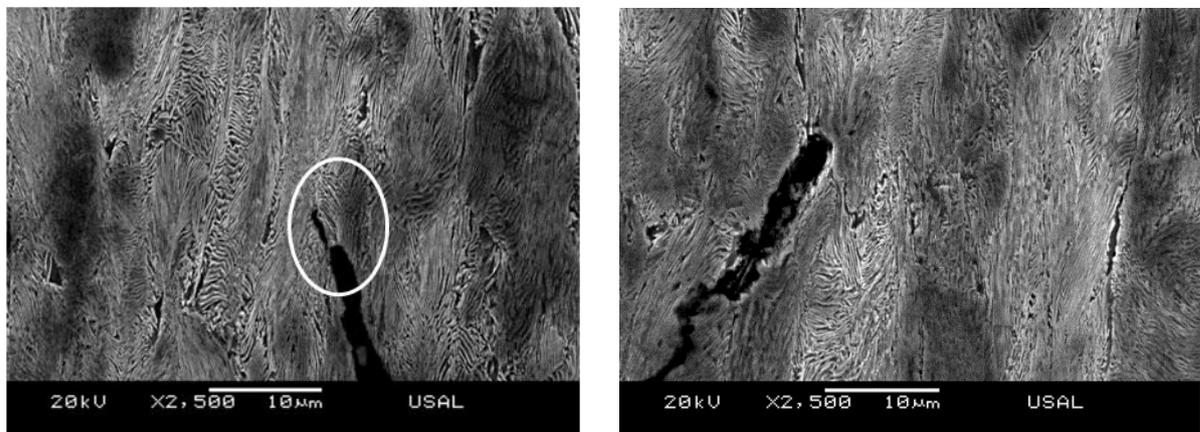


Fig. 3.38. Micro-fisuras obtenidas en la probeta de ensayo interrumpido PAA4.

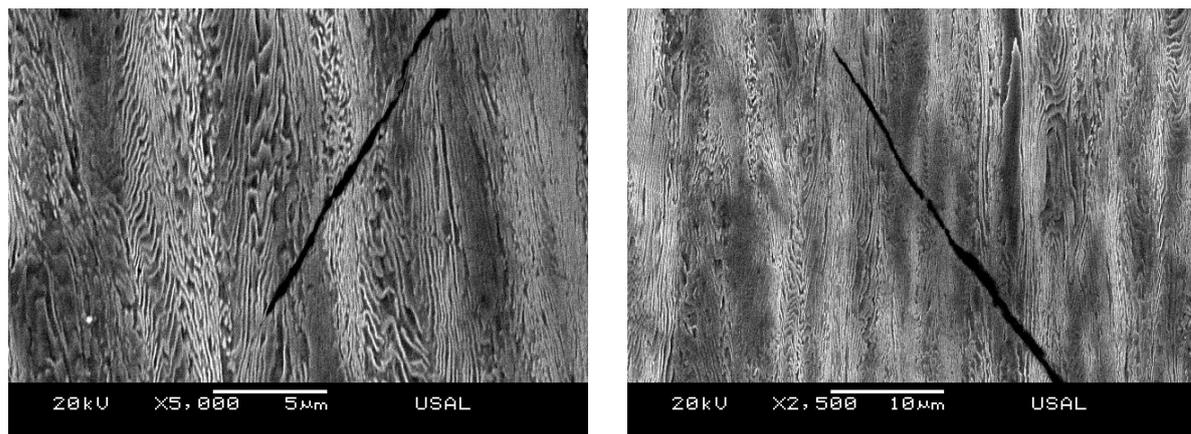


Fig. 3.39. Micro-fisuras en la probeta del ensayo interrumpido PAA7.

4. PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

Una vez obtenidas las distintas superficies de fractura se ha procedido a realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las mismas. En las siguientes Figs. 3.40-3.41 se muestran las distintas superficies de fractura de las probetas axisimétricas representativas de cada terna para cada tipo de entallada y alambres de acero (a partir de los cuales se han mecanizado las probetas) considerados. Todas las superficies de fractura de las probetas axisimétricas entalladas ensayadas se encuentran recogidas el anexo III.

En las superficies de fractura de todas las probetas axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción se han podido observar tres zonas; corona exterior (CE), zona intermedia o de avance de fractura (Z_{INT}) y la zona de proceso de fractura (ZPF).

En las probetas con entallas de tipo A y B (pequeño radio de curvatura), salvo las pertenecientes al alambroón inicial, presentan una superficie de fractura con multitud de crestas y valles. En las probetas 0A no se ha podido diferenciar de forma clara las tres zonas de la superficie de fractura (ZPF, CE y Z_{INT}) puesto que en este caso la ZPF se sitúa anexa a la CE en algunas zonas de ésta, de igual forma sucede en las probetas con entalla de tipo B en las cuales ha sido imposible delimitar las distintas zonas de la superficie de fractura. Por el contrario en las superficies de fractura pertenecientes a las probetas con entallas de tipo C y D (entallas con gran radio de curvatura) las tres zonas que componen las superficies de fractura son claramente diferenciables a simple vista y los límites entre las mismas fácilmente identificables. Además éstas poseen una mayor zona de CE la cual aumenta a medida que avanza el grado de trefilado del alambre ensayado. En todas ellas la ZPF se encuentra en el centro de la superficie, siendo ésta mucho mayor en las pertenecientes a las probetas de tipo D (entalla con gran radio de curvatura y gran profundidad).

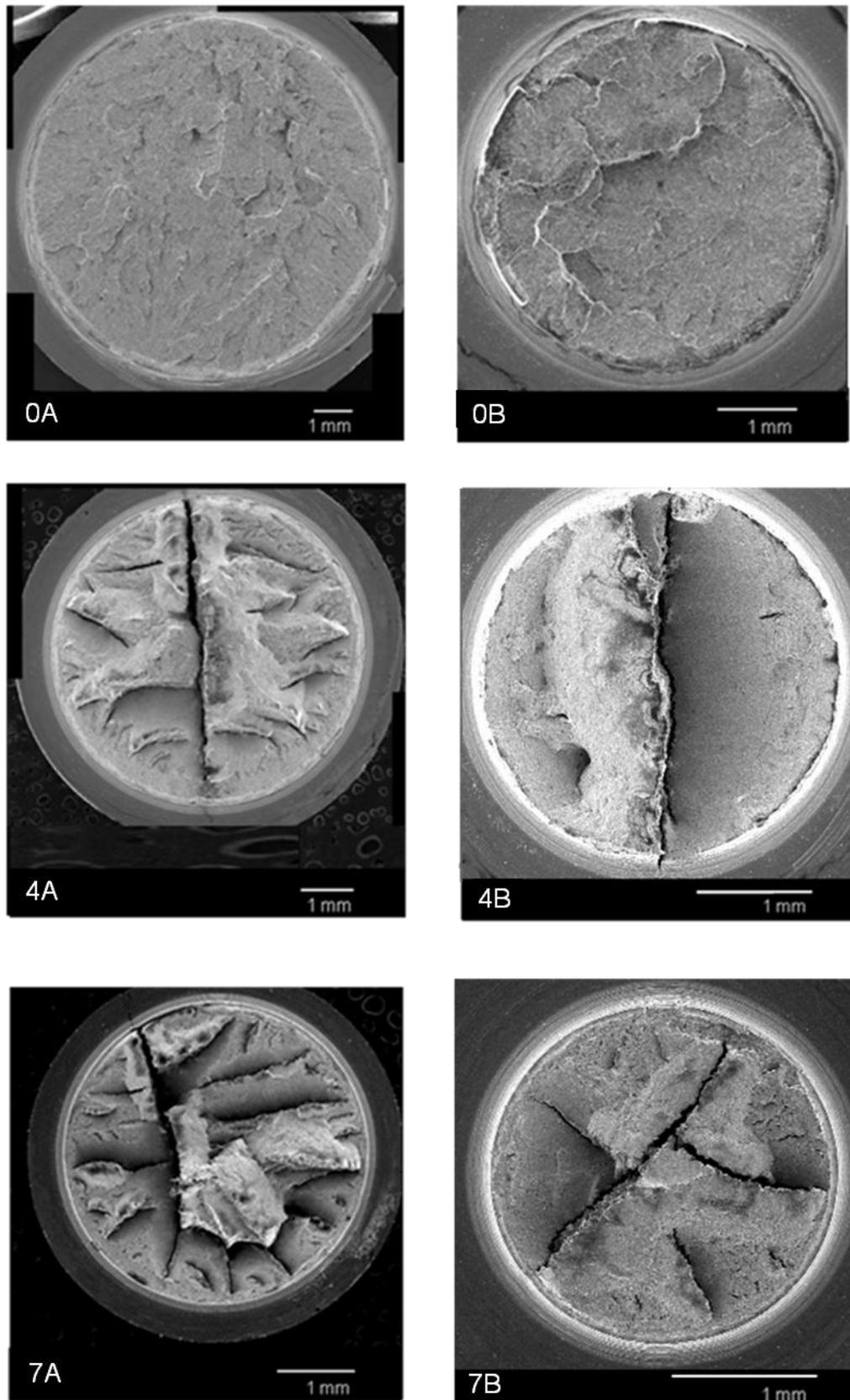


Fig. 3.40. Superficies de fractura de las probetas axisimétricas con entallas de tipo A y B.

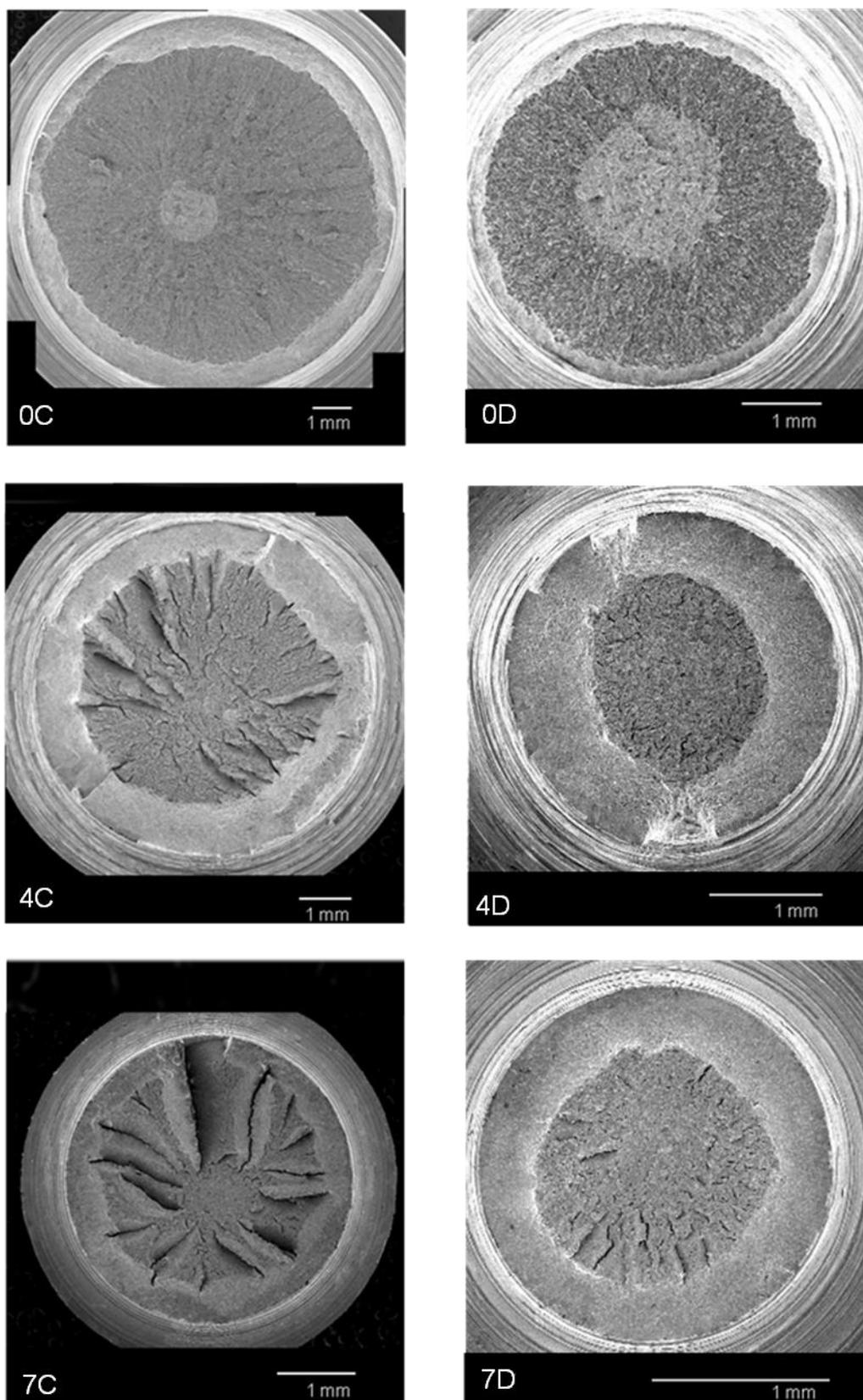


Fig. 3.41. Superficies de fractura de las probetas axisimétricas con entallas de tipo C y D.

A continuación se muestran en las siguientes Figs. 3.42-3.53. las micrografías pertenecientes a las distintas zonas de la superficie de fractura, en éstas se observan los micro-mecanismos de fractura que imperan en dichas zonas, bien CMH (asociado con una fractura del tipo dúctil) ó C (característicos de fracturas frágiles).

En las superficies de fractura pertenecientes a las probetas axisimétricas con entalla de tipo A se muestran las tres zonas. La ZPF no es diferenciable del resto a simple vista y además ésta se encuentra anexa a la CE, hecho que dificulta su observación, en todas las superficies de fractura de las probetas pertenecientes a todos los pasos del proceso de trefilado analizados.

La ZPF, está formada por coalescencia de microhuecos de tamaño mayor que los encontrados en la CE, los cuales se denominan CMH* (AYASO, 2001). La zona de la CE está también formada por CMH, éstos son de tamaño pequeño y a medida que avanza el grado de trefilado de los alambres mecanizados de las probetas ensayadas van disminuyendo notablemente.

La zona intermedia o zona de avance de fractura presente a las probetas correspondientes a la alambrón inicial, en probetas con entalla de tipo A, está formada en su totalidad por C que a medida que avanza el grado de trefilado del alambre ensayado van disminuyendo a favor de la presencia de CMH, hasta ser prácticamente inexistentes en la zona intermedia perteneciente al alambre de pretensado final. Las probetas pertenecientes al cuarto y al último paso del proceso presentan en dicha zonas multitud de crestas cuyas paredes inclinadas, como se observará en análisis posteriores, está formada por microhuecos elongados.

En cuanto a la ZPF, ésta está formada por CMH los cuales presentan un tamaño mayor que los encontrados en la corona exterior, siendo el tamaño menor cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha mecanizado dicha probeta. Las probetas axisimétricas con entalla de tipo A pertenecientes al alambre de pretensado final muestran en dicha zona estrías paralelas a la superficie de fractura, como se puede observar en la micrografía de la ZPF de la Fig. 3.44.

En las probetas pertenecientes a las entallas de tipo B, Figs. 3.45-3.47, no se observa una ZPF como tal sino que la fractura de éstas se produce a partir de puntos de disparo por clivaje. En dichas zonas se ha observado la dirección de los clivajes alrededor de éstos demostrándose que parten del punto de disparo hacia el exterior de la superficie de fractura. Las zonas de disparo por clivaje se sitúan en la zona intermedia de la superficie de fractura de la probeta próxima a la CE, aunque en la probeta procedente del alambrón inicial éstas estén más próximas al centro de la superficie. En la superficie de fractura perteneciente a las probetas del último paso del proceso de trefilado se muestran estrías paralelas a la superficie de

fractura, similares a las observadas en la superficie de fractura de las probetas con entalla de tipo A pertenecientes también al último paso del proceso.

Por otra parte, al igual que sucedía en las superficies de fractura de las entallas de tipo A, la zona intermedia de las probetas con entalla tipo B está formada por C que a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre ensayado disminuyen a favor del aumento de CMH. Cabe señalar también la presencia de crestas en dicha zona, en las probetas procedentes del cuarto y del último paso del proceso de trefilado, las cuales presentan microhuecos elongados en sus paredes inclinadas.

En las probetas con entalla de tipo C (Figs. 3.48-3.50) se observan en todos los pasos del proceso de trefilado las tres zonas bien delimitadas. La ZPF se sitúa en el centro de dichas probetas, aunque la situación de ésta varía en las superficies de fractura de las probetas pertenecientes al último paso del proceso de trefilado, en las cuales se encuentra situada próxima al borde de la superficie de fractura y anexa a la corona externa. En la ZPF perteneciente al alambre de pretensado comercial se han podido observar también estrías concéntricas paralelas a la misma.

En las probetas axisimétricas con entallas de tipo D (Figs. 3.51-3.53) también se muestran las tres zonas bien delimitadas y diferenciables a simple vista. La corona exterior, al igual que sucedía en los casos anteriores, está compuesta por CMH con microhuecos de menor tamaño que los que componen la ZPF. La zona de proceso de fractura se encuentra en todas las probetas analizadas con este tipo de entalla en la parte central de la superficie. La zona intermedia está formada por C que, de la misma forma que sucedía en las probetas anteriores, disminuye a favor del aumento de CMH a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre ensayado.

En todos los casos estudiados las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado final, también se observa en la ZPF estrías concéntricas paralelas a la superficie de fractura. En las probetas con entalla de tipo C y D la zona intermedia presenta pequeñas crestas únicamente en las superficies de fractura pertenecientes al alambre de pretensado o producto final del proceso de trefilado.

En las superficies de fractura analizadas se ha podido observar la variación de la ubicación de la ZPF, estando en las probetas con entallas de tipo A y B anexa a la CE y en las probetas con entallas del tipo C y D situándose en el centro de la misma, a excepción de las probetas pertenecientes al último paso de trefilado en las cuales se sitúa también anexa a la CE.

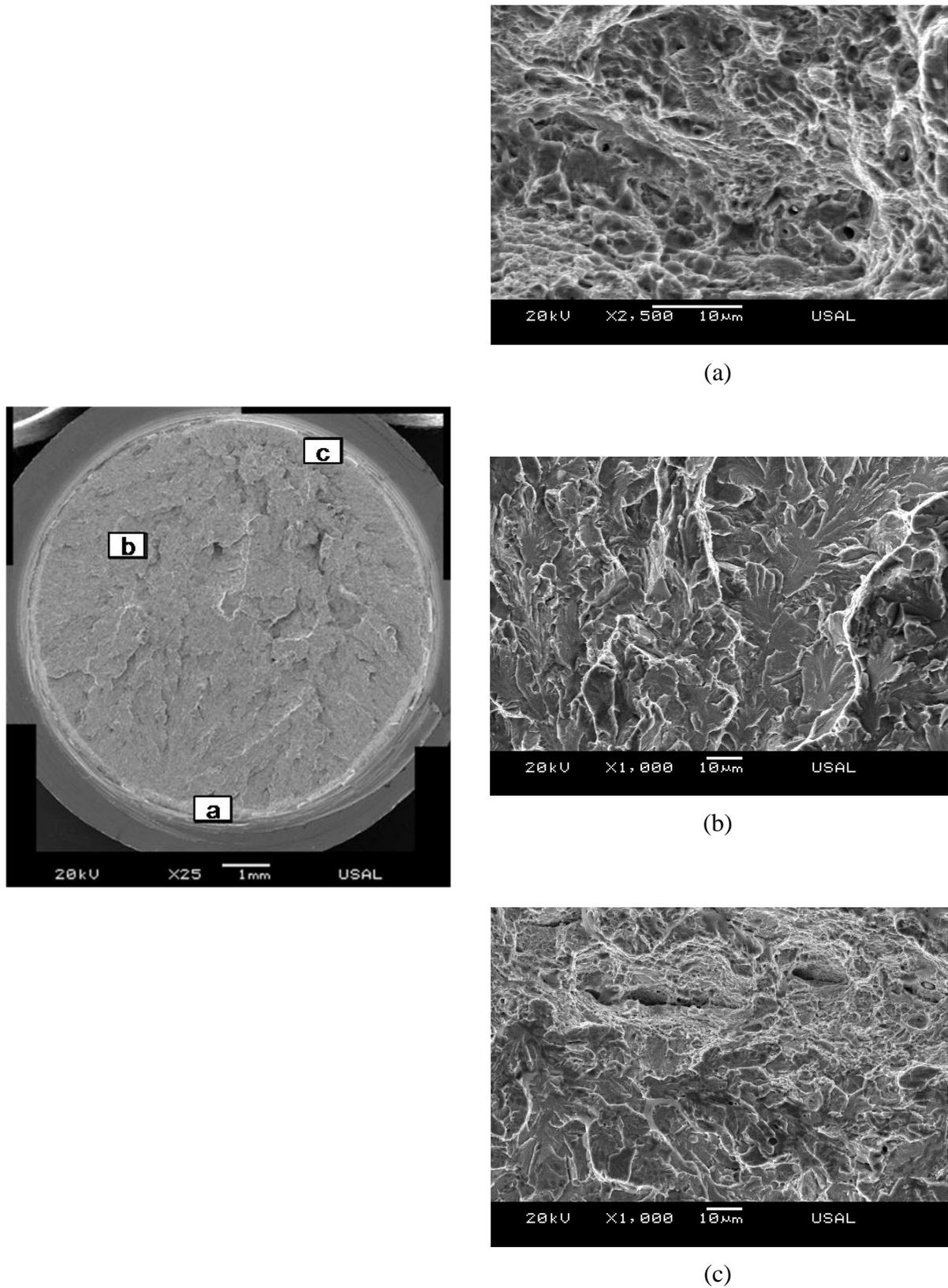


Fig. 3.42 Superficie de fractura de la probeta 0A; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

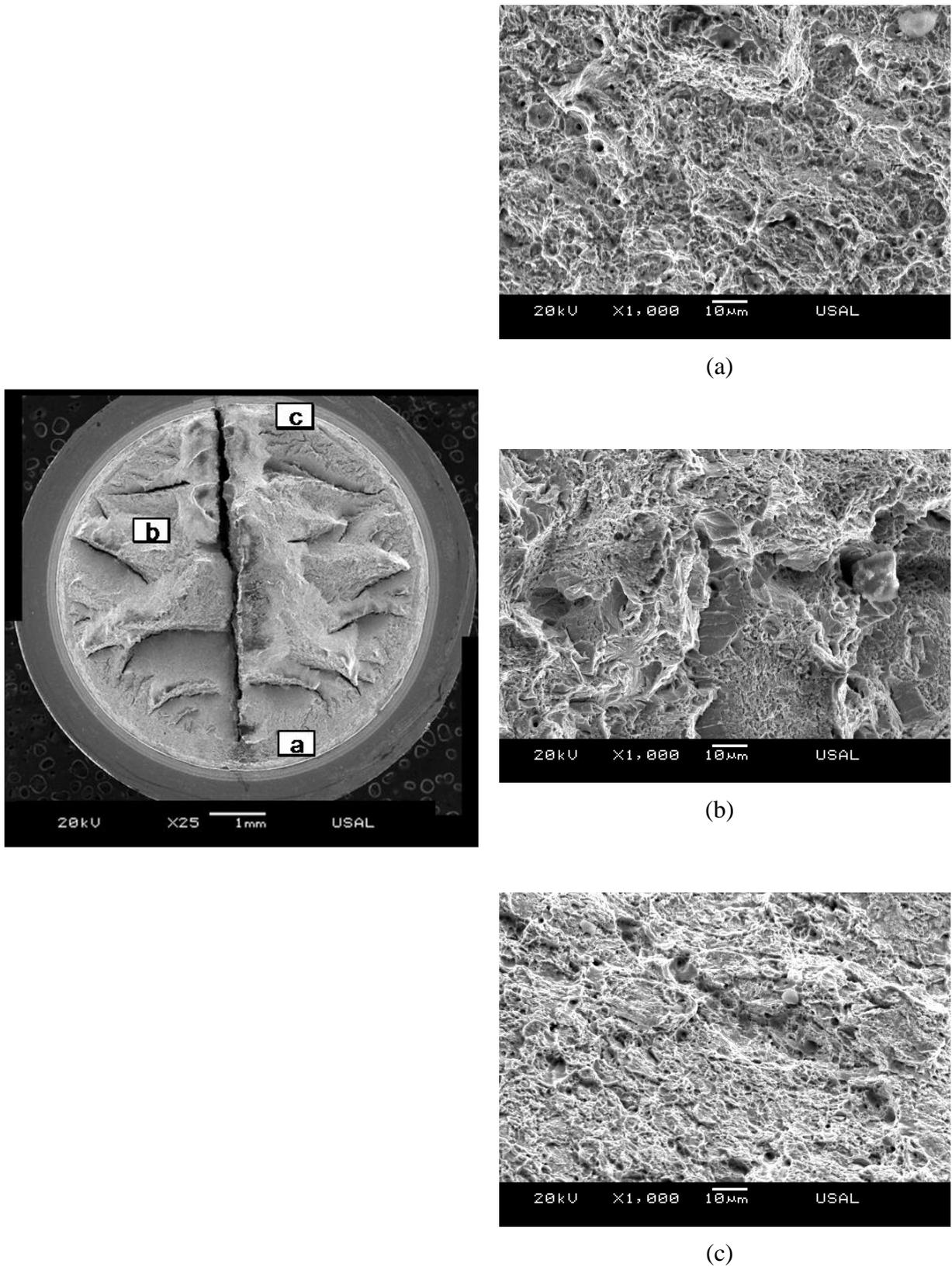


Fig. 3.43. Superficie de fractura de la probeta 4A; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

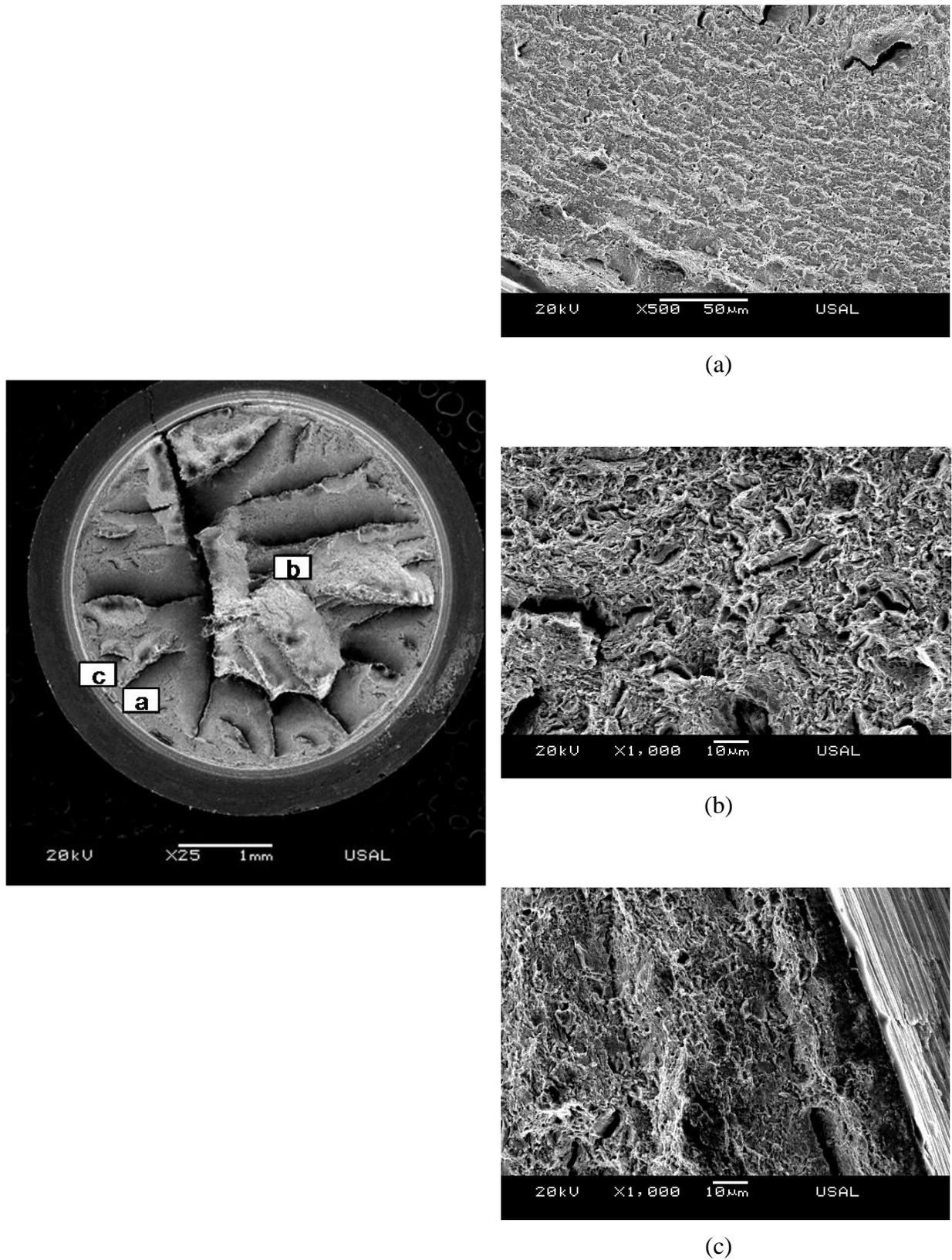


Fig. 3.44. Superficie de fractura de la probeta 7A; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

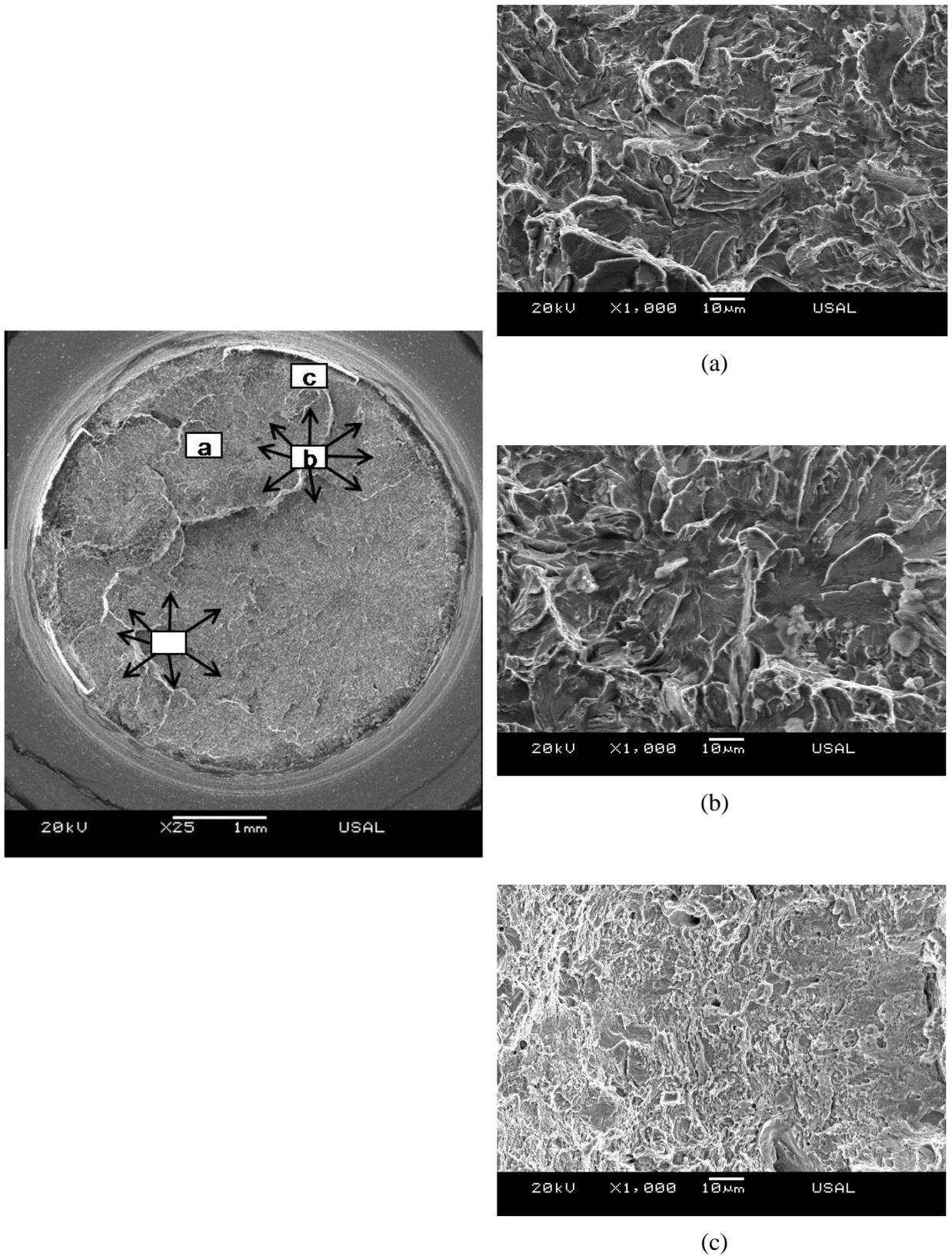


Fig. 3.45. Superficie de fractura de la probeta 0B; (a) zona intermedia, (b) zona de disparo por clivaje y (c) corona exterior.

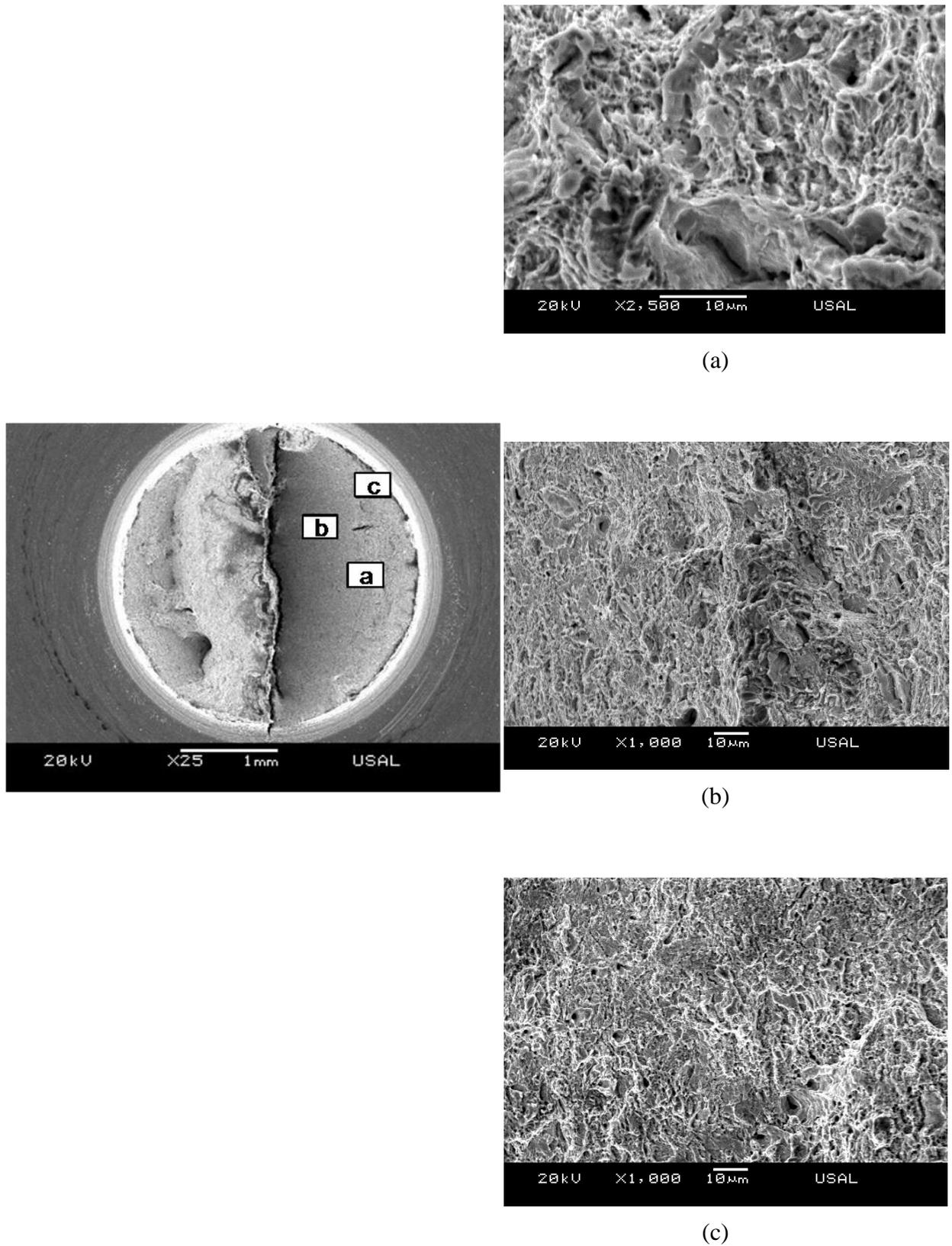


Fig. 3.46. Superficie de fractura de la probeta 4B; (a) ZPF, (b) límite entre Z_{INT} y Zona de proceso de fractura y (c) corona exterior.

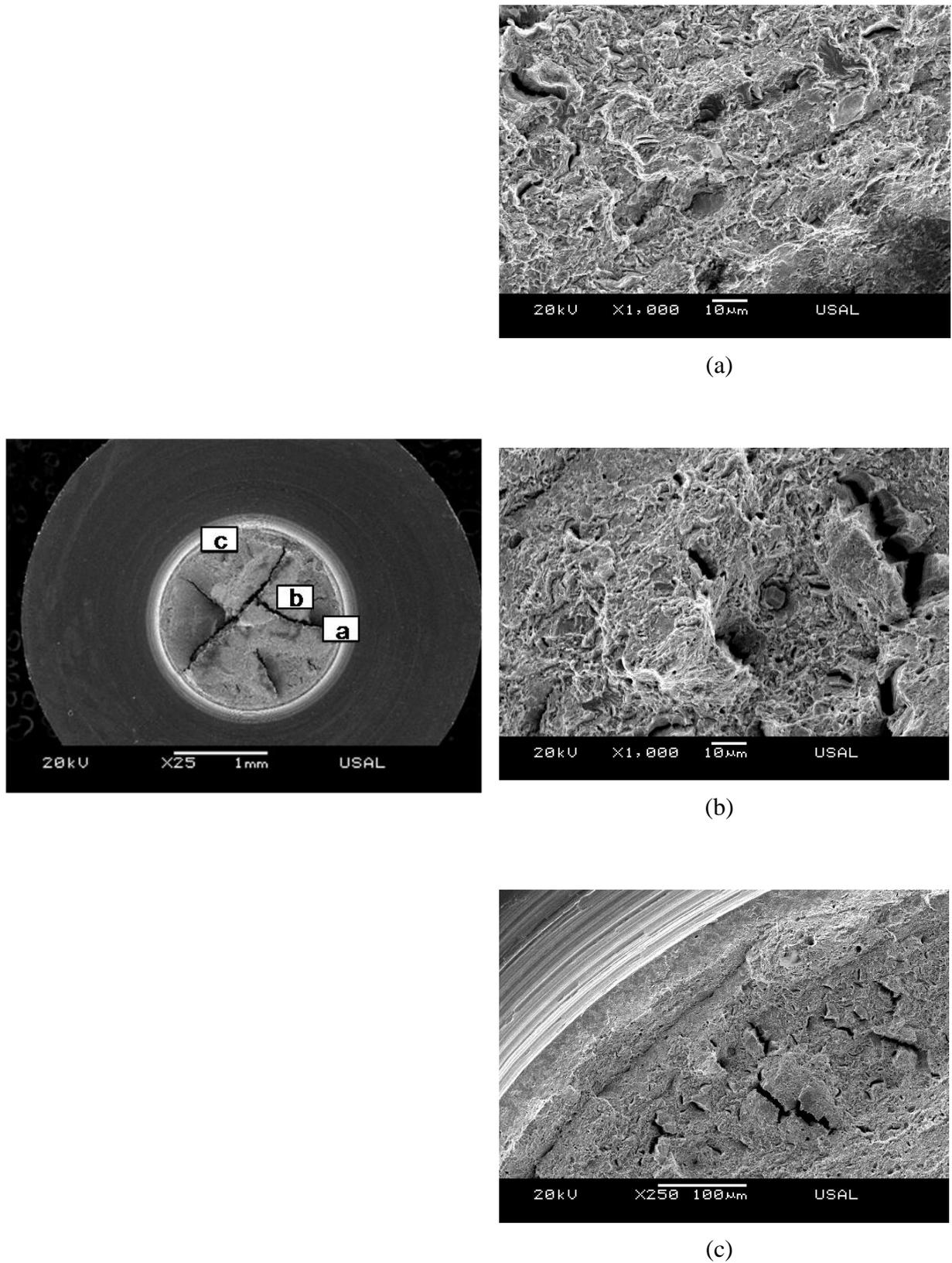


Fig. 3.47. Superficie de fractura de la probeta 7B; (a) zona de proceso de fractura, (b) límite entre CE- Z_{INT} -ZPF (c) corona exterior.

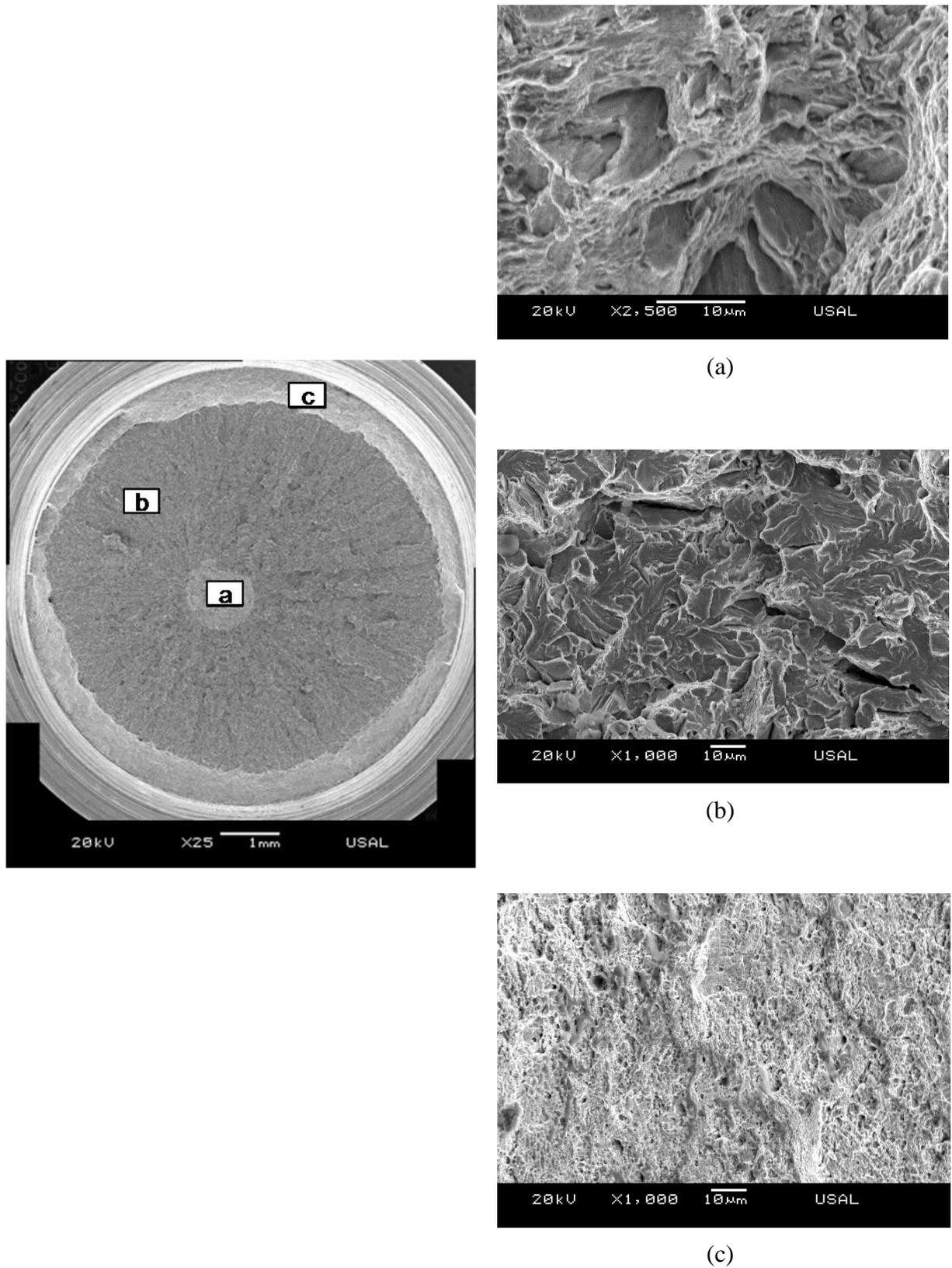


Fig. 3.48. Superficie de fractura de la probeta 0C; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

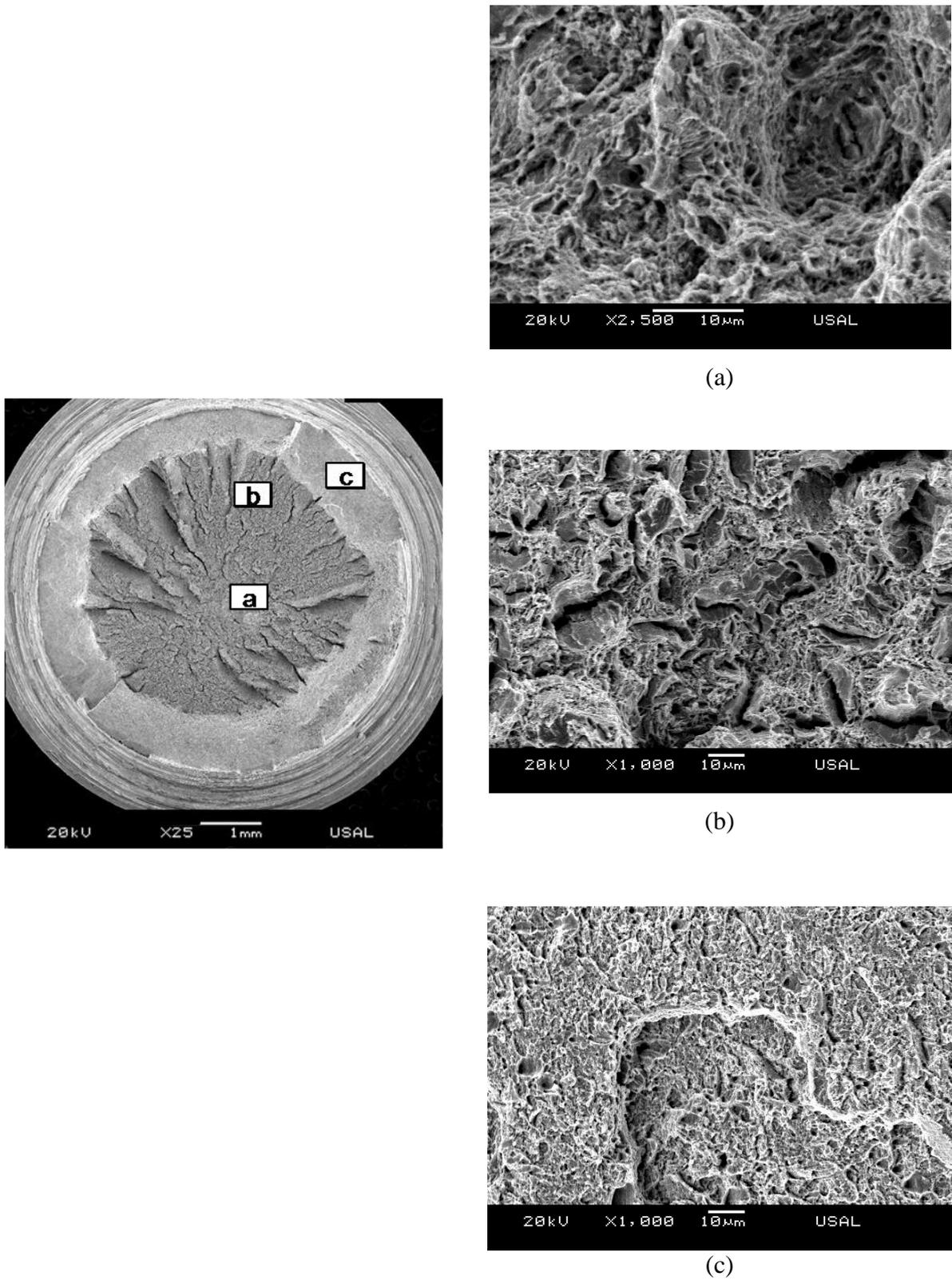


Fig. 3.49. Superficie de fractura de la probeta 4C; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

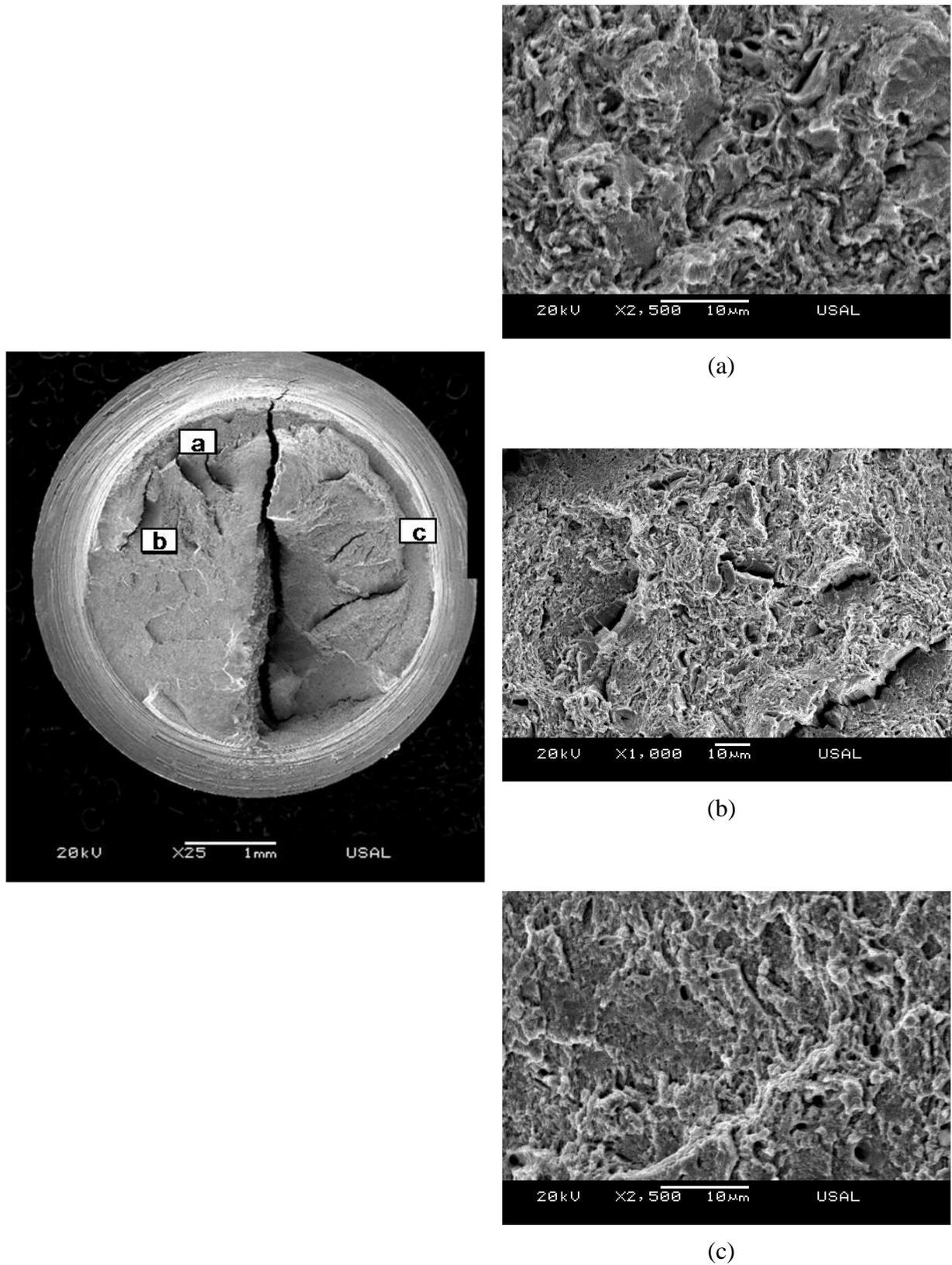


Fig. 3.50. Superficie de fractura de la probeta 7C; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

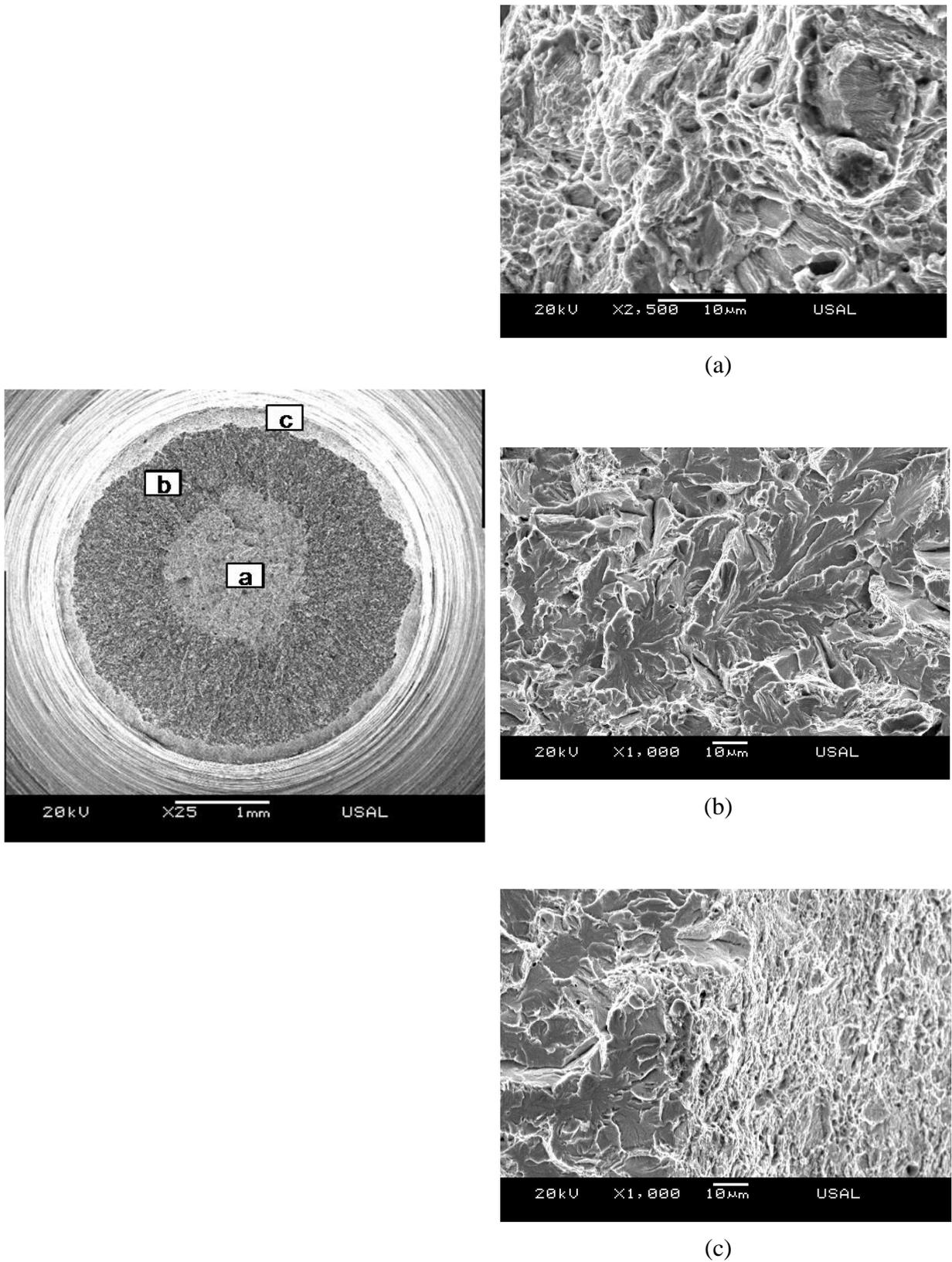


Fig. 3.51. Superficie de fractura de la probeta OD; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

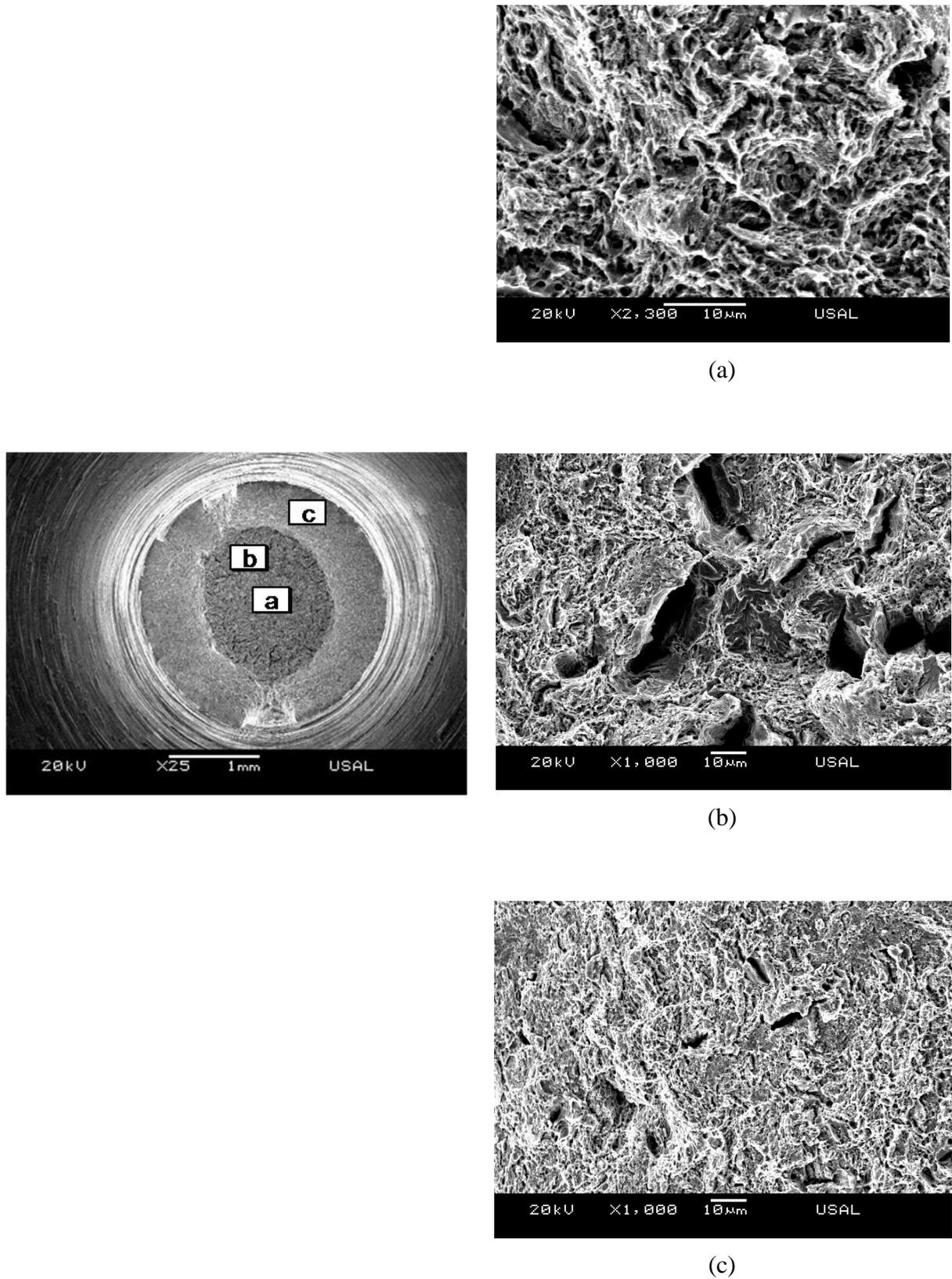
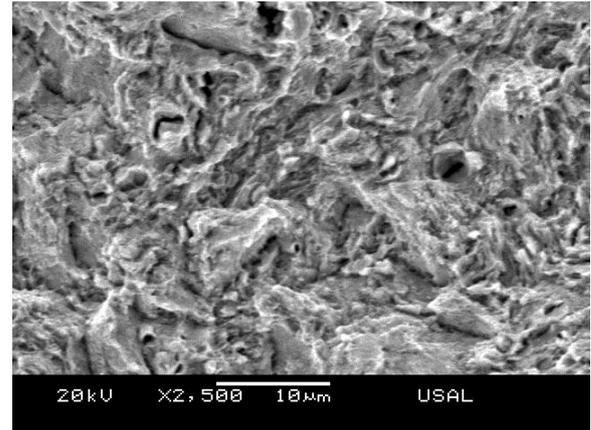
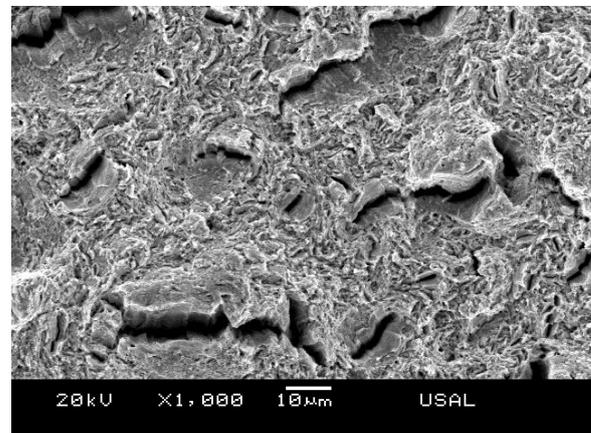
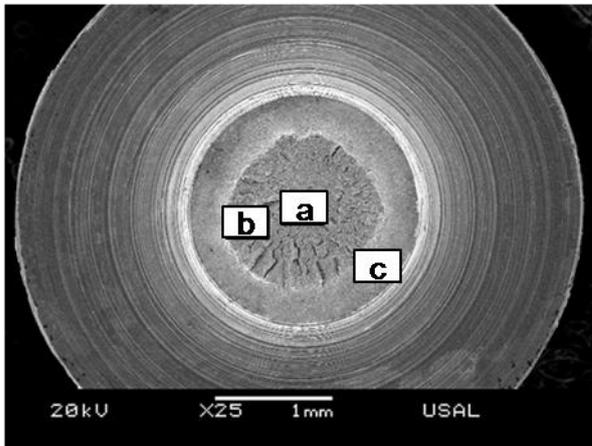


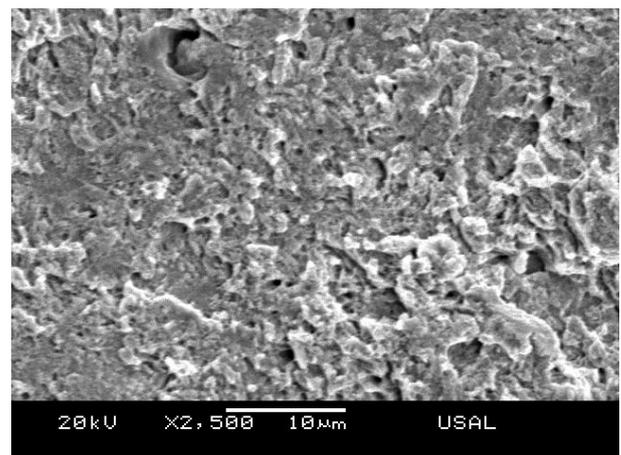
Fig. 3.52. Superficie de fractura de la probeta 4D; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.



(a)



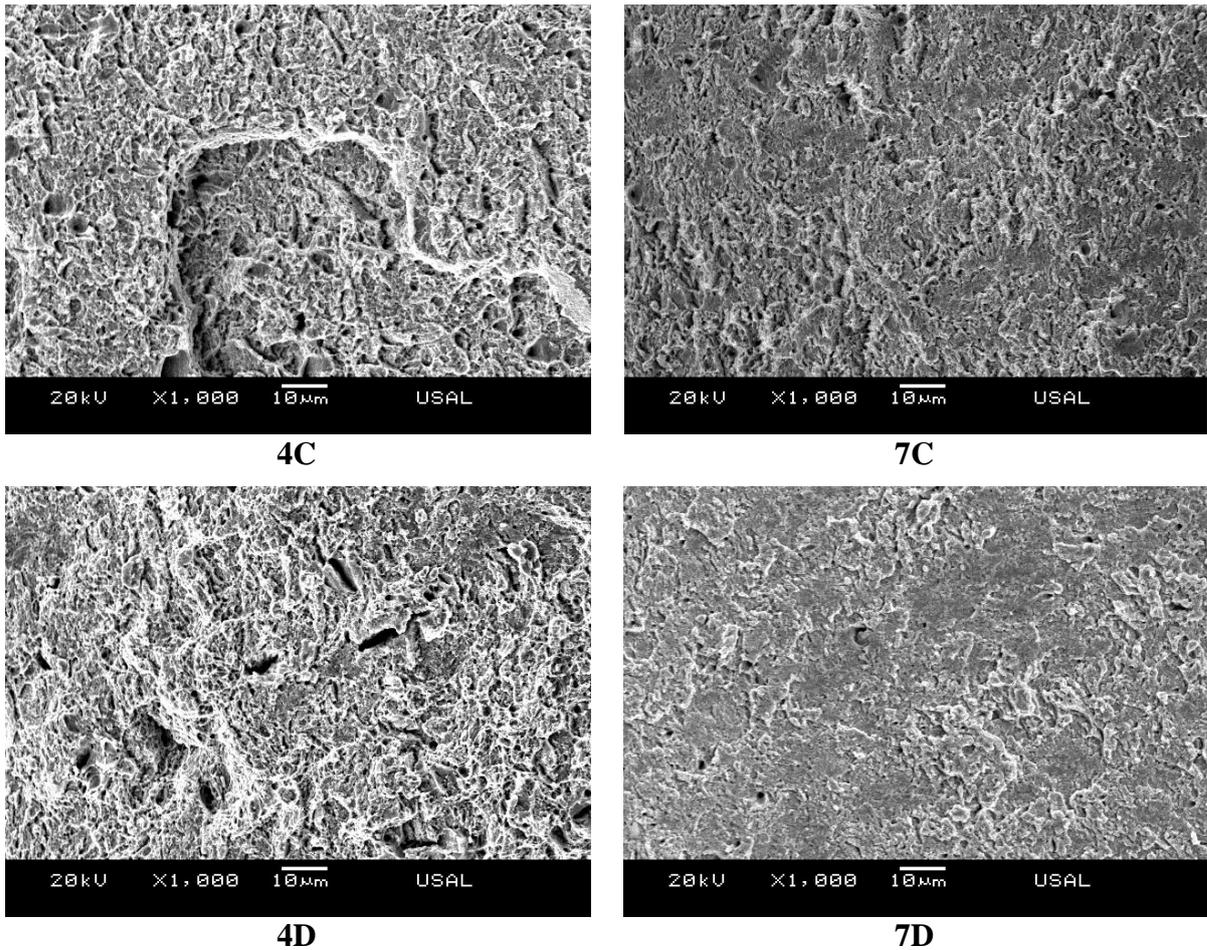
(b)



(c)

Fig. 3.53. Superficie de fractura de la probeta 7D; (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

En las micrografías analizadas de las distintas probetas axisimétricas entalladas se puede observar en la CE una superficie de fractura generada por CMH, los cuales en todas ellas presentan menor tamaño que los que conforman la ZPF. En la siguiente Fig. 3.54 se puede ver cómo a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre disminuye el tamaño de los mismos, siendo en las probetas con entallas de tipo D (entalla con gran radio de curvatura) una reducción más apreciable a simple vista.



Figs.3.54. Micrografías de la CE pertenecientes a las probetas axisimétricas entalladas.

Otra de las observaciones expuestas anteriormente es la disminución de los C a favor del aumento de CMH en la zona intermedia a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre ensayado. Este hecho ocurre de todas las probetas objeto de estudio, Fig. 3.55. Además en la Z_{INT} se pueden observar, en los alambres procedentes de cuarto y del último paso del proceso de trefilado de las probetas con entallas de tipo A, B y C, la existencia de crestas y valles formados por clivajes y en su mayoría por CMH. Los microhuecos de ésta zona se encuentran elongados en las paredes inclinadas de las crestas.

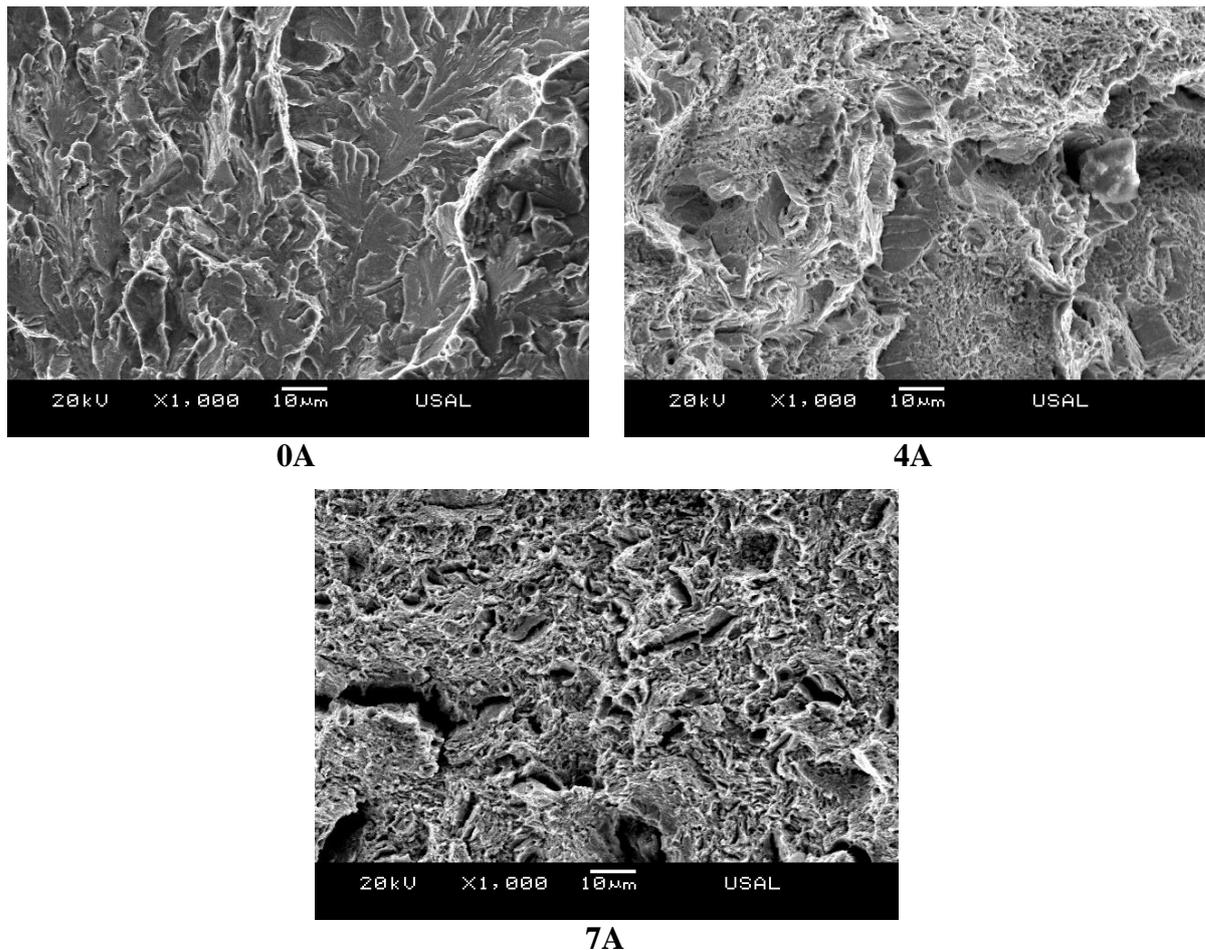


Fig. 3.55. Micrografías pertenecientes a la Z_{INT} de las probetas con entalla de tipo A.

La ZPF está formada por microhuecos de gran tamaño, CMH*, los cuales al igual que los que conforman la CE van disminuyendo con el aumento del grado de trefilado de los alambres a partir de los cuales han sido mecanizadas dichas probetas.

Cabe señalar como un hecho curioso la observación de unas *marcas a modo de estrías* presentes en la ZPF de todas las probetas axisimétricas analizadas procedentes del alambre de pretensado final, estrías las cuales también han sido encontradas en la ZPF de probetas lisas de alambres de pretensado sometidas a ensayos de tracción simple en ambiente agresivo. Como han demostrado AYASO, FERNÁNDEZ-VIÑA y TORIBIO (2010) la presencia de tales marcas *como estrías* pueden atribuirse a la acción del hidrógeno al difundirse éste por el límite del grano austenítico previo, dando lugar a un camino de fractura irregular con la mencionada apariencia. En el caso de las probetas axisimétricas entalladas objeto de estudio no se puede atribuir la presencia de las marcas *como estrías* a la presencia del medio agresivo, pero sí a un avance de la microfisura que se genera en la ZPF a través del límite del grano austenítico previo, y también a través de diversos micro-defectos producidos por el propio proceso del trefilado. La morfología de las *marcas como estrías* es paralela a la superficie de

fractura, en las micrografías pertenecientes a las probetas con entallas de tipo C y D, se puede observar como convergen en la parte central de la misma, Fig. 3.56. Las estrías concéntricas paralelas a la superficie de fractura presentan tamaños similares a simple vista en todos los tipos de probetas entalladas. Para un mejor análisis de este parámetro se ha procedido a realizar las mediciones del espaciado existente entre las mismas. Las medidas obtenidas en la ZPF de las distintas probetas axisimétricas entalladas procedentes del alambre de pretensado final son muy similares, variando entre los 5 y 15 μm .

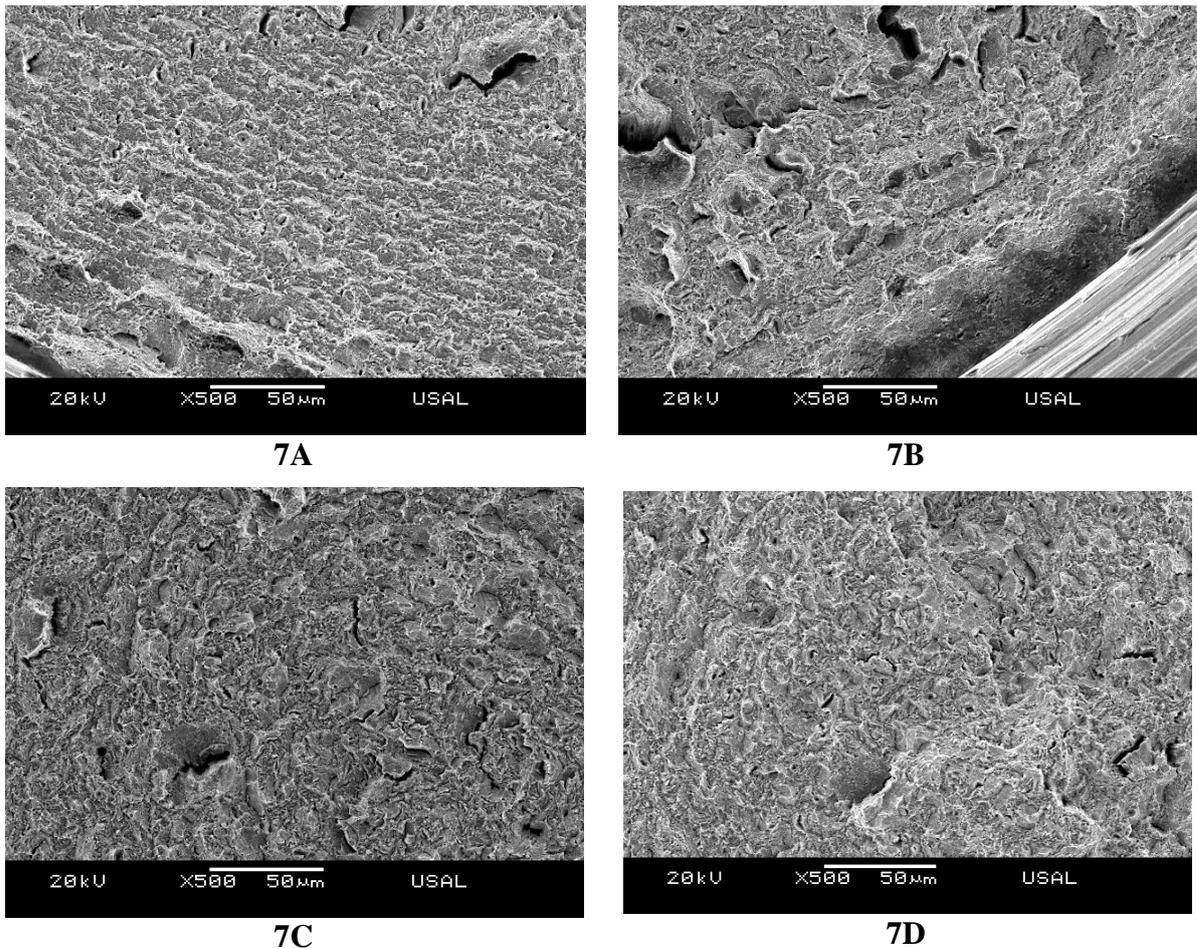


Fig. 3.56. Micrografías con estrías concéntricas en la ZPF de las probetas entalladas procedentes del alambre de pretensado final.

El análisis de las distintas zonas que conforman la superficie de fractura de las distintas probetas también se ha realizado de manera cuantitativa, utilizando para ello el programa de mediciones AnalySIS 3.1. Cabe señalar que en algunas de las probetas no ha sido posible medir ciertas zonas, bien porque no estaban bien delimitadas o por la situación de varias zonas que componían una sola, siendo estos los casos de las probetas con entalla de tipo A procedentes del alambrón inicial y las probetas con entallas de tipo B. Para llevar a cabo el análisis cuantitativo se han realizado las mediciones del área de las distintas zonas de forma

adimensional teniendo en cuenta para ello la relación A/A_S , siendo A el área de la zona medida y A_S el área total de la superficie de fractura analizada, Fig. 3.57.

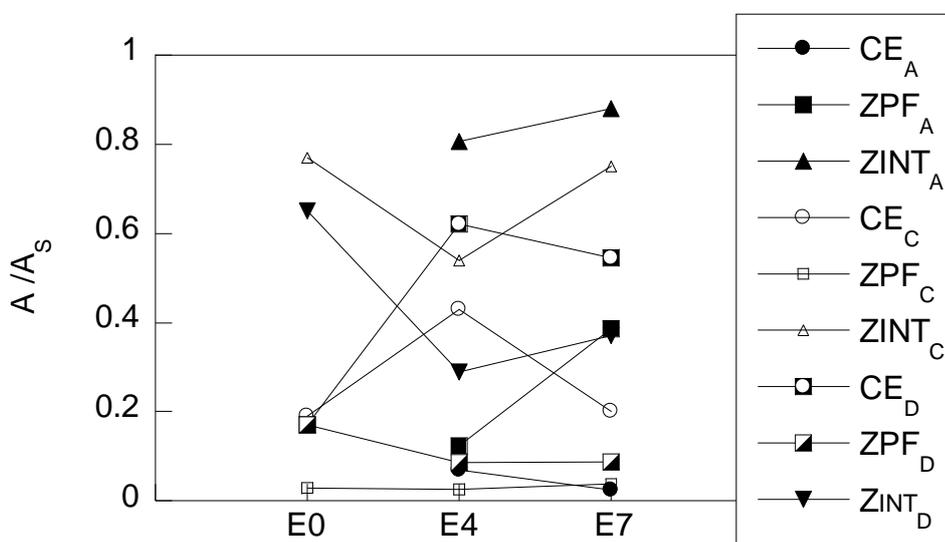


Fig. 3.57. Evolución del área adimensionalizada, de las distintas zonas de las superficies fractográficas para los tres tipos de entallas A, C y D, con el grado de trefilado.

En las probetas axisimétricas entalladas con entalla de tipo A se muestra una disminución del tamaño de la zona de CE y un aumento del tamaño de la Z_{INT} con el aumento del grado de trefilado (hay que tener en cuenta que en las probetas pertenecientes al alambroón inicial con este mismo tipo de entalla no se han podido obtener dichas medidas de las diferentes áreas debido a la dificultad para discernir los límites entre éstas).

En cuanto a las probetas con entallas de tipo C y D, se han obtenido resultados análogos en cuanto a la variación del tamaño de las distintas zonas, produciéndose un aumento del tamaño de la zona de CE y una disminución del tamaño de la Z_{INT} producido de las probetas procedentes del alambroón inicial a las probetas procedentes del alambre del cuarto paso del proceso de trefilado. Sin embargo la variación del tamaño muestra la tendencia contraria de las probetas procedentes del cuarto paso del proceso de trefilado a las procedentes del alambre de pretensado final, es decir, produciéndose una disminución del tamaño de la CE y una disminución del tamaño de la Z_{INT} , análogo al observado en las probetas analizadas con entalla de tipo A. Cabe señalar el mayor aumento y disminución del tamaño de la CE y Z_{INT} respectivamente, producido en las probetas con entallas de tipo C para las probetas procedentes de alambres pertenecientes al cuarto paso del proceso de trefilado y alambre de pretensado final. Por otra parte, las probetas analizadas con entallas tipo A, C y D no muestran variaciones significativas en el tamaño de la ZPF en las distintas probetas procedentes de alambres con diferente grado de trefilado.

4.1. Fractura anisótropa

El acero objeto de estudio presenta dos tipos de fractura: la fractura isótropa, en la cual la superficie de rotura está plenamente contenida en un plano transversal al eje longitudinal (o dirección de trefilado), y la fractura anisótropa en la cual la superficie de fractura presenta irregularidades en la forma de crestas y depresiones locales (AYASO *et al.*, 2005).

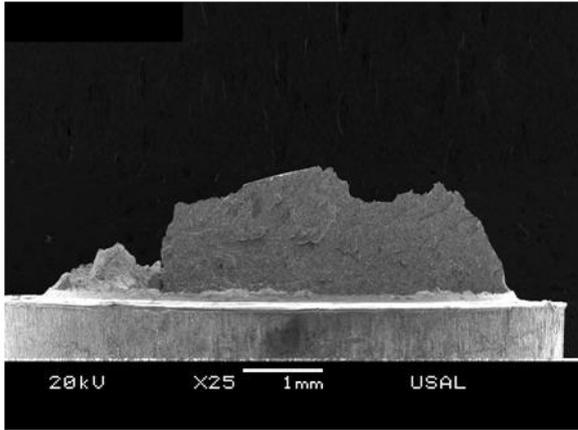
En las probetas axisimétricas entalladas se ha observado una deflexión del camino de fractura en las entallas de tipo A, B y C cuyos alambres proceden del cuarto y último paso del proceso de trefilado. Como se puede observar en las micrografías se han formado paredes totalmente verticales en algunos casos, sobre todo en las probetas axisimétricas pertenecientes al alambre de pretensado comercial.

En la Fig. 3.58 se muestran las probetas tipo de cada uno de los tipos de probetas que presentan esta fractura localmente anisótropa, el resto de las fractografías de perfil de las probetas ensayadas se pueden observar en el anexo III.

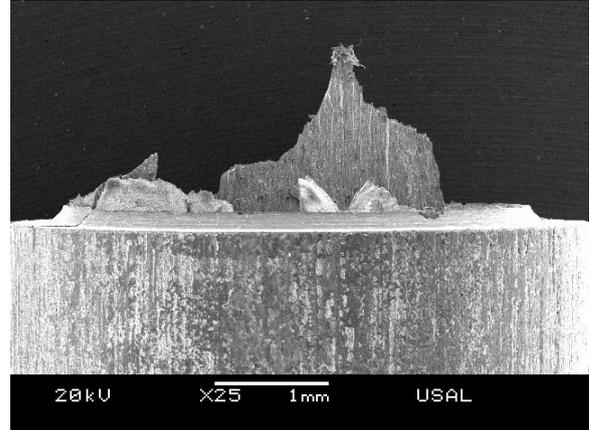
Para la realización del análisis cualitativo de la deflexión del camino de fractura se han realizado las micrografías de las distintas zonas de dichas superficies de fractura, en perfil. En éstas se observan los micro-mecanismos que en ellas imperan tales como; microhuecos en los fondos de la entalla en la zona de proceso de fractura, clivajes elongados en las paredes inclinadas de la zona intermedia y finalmente microhuecos con gran elongación, rasgados, en las paredes con inclinaciones próximas a 45° que conforman la corona exterior de la superficie de fractura (Figs. 3.59-3.64).

En las fractografías pertenecientes a las probetas axisimétricas con entallas de tipo A procedentes de alambres del cuarto paso del proceso de trefilado y alambres de pretensado final (Figs. 3.59-3.60), se observa como las micrografías de las distintas zonas presentan micro-mecanismos semejantes de fractura. En dicho análisis también se observa como en la zona intermedia las paredes verticales están constituidas por clivajes más elongados cuanto mayor es el grado del alambre.

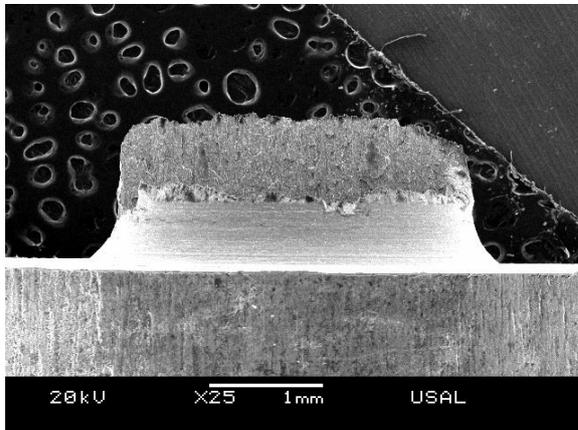
Las probetas axisimétricas con entallas de tipo B pertenecientes al cuarto y último paso del proceso de trefilado (Figs. 3.61-3.62), al igual que las entallas de tipo A presentan distribuciones de micro-mecanismos semejantes en sus distintas zonas. Además en éstas también se puede observar la mayor elongación de los clivajes producida con el aumento del grado de trefilado de los alambres de procedencia de las probetas.



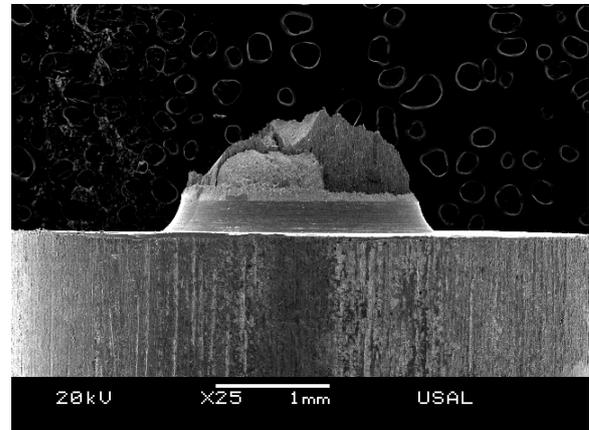
4A



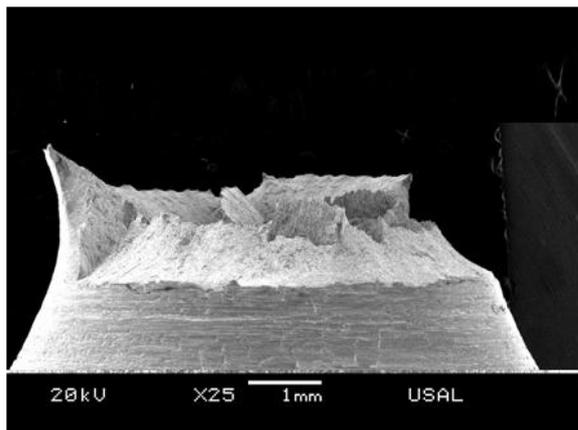
7A



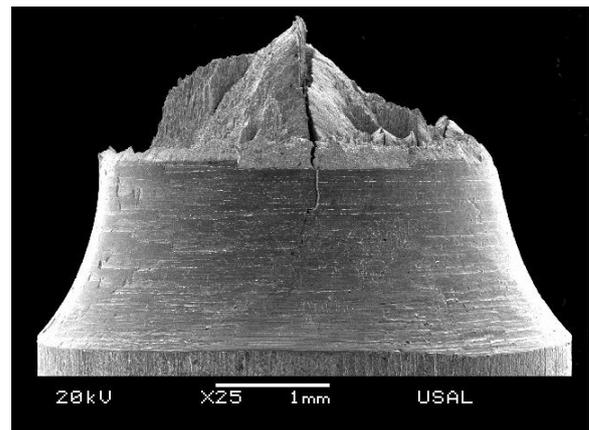
4B



7B



4C



7C

Fig. 3.58. Deflexión del camino de fractura: comportamiento anisótropo en fractura de las probetas axisimétricas entalladas, A, B y C.

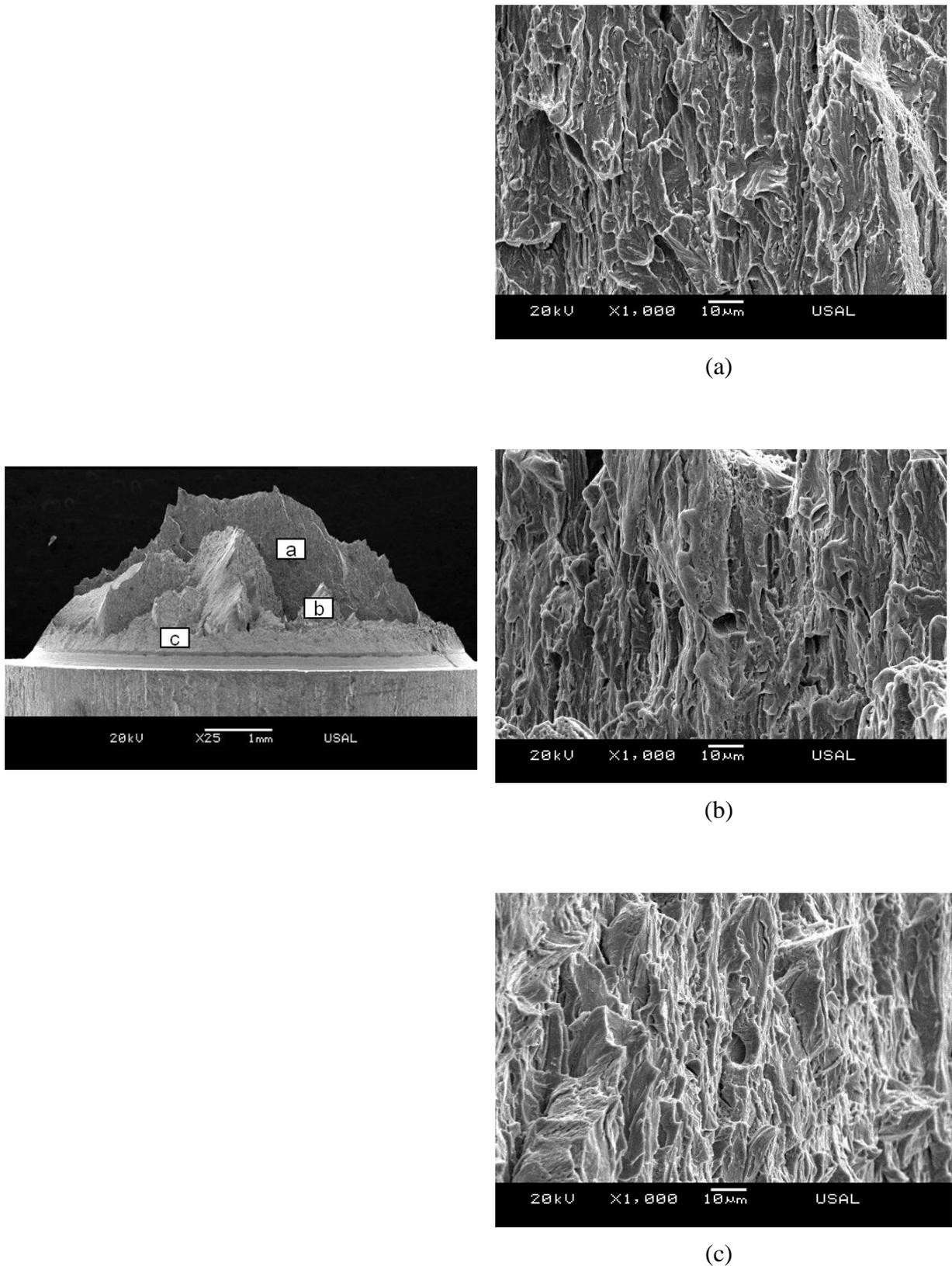


Fig. 3.59. Micro-mecanismos de fractura presentes en la superficie de fractura de las probetas 4A, (a) y (b) clivajes con algún micro-hueco en paredes cuasi-verticales de la zona intermedia y (c) microhuecos elongados.

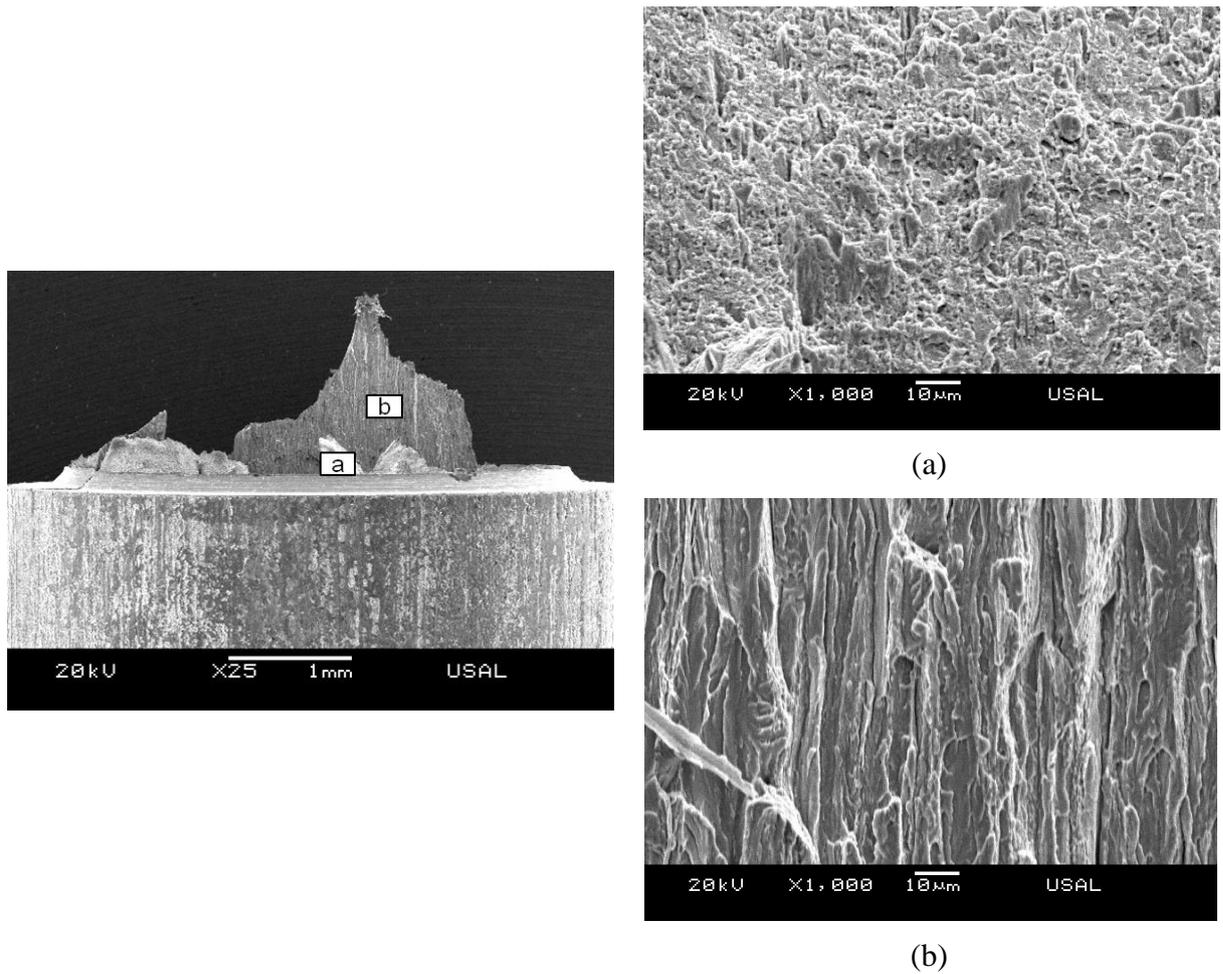


Fig. 3.60. Micro-mecanismos de fractura presentes en la superficie de fractura de las probetas 7A, (a) CMH elongados pertenecientes a la zona de CE y (b) clivajes elongados en las paredes verticales de la zona intermedia.

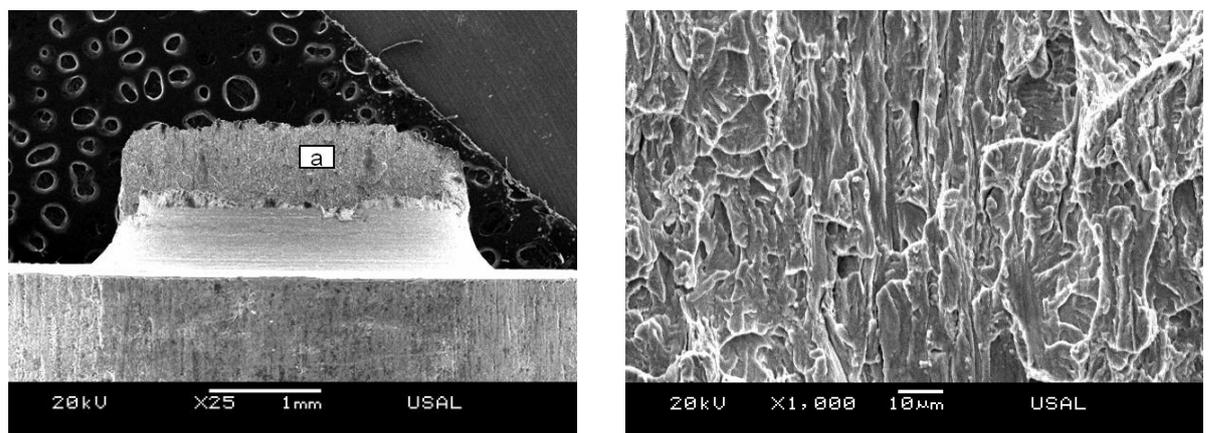
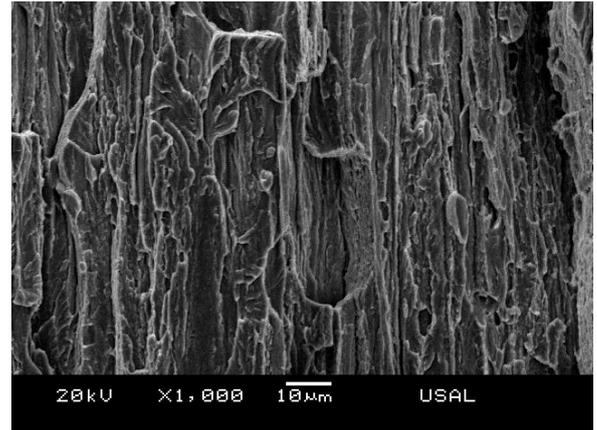
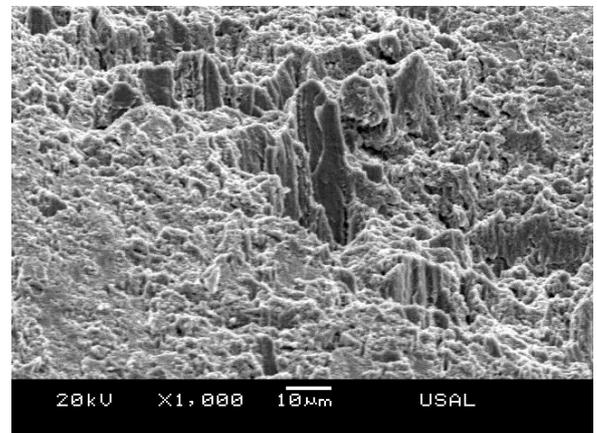
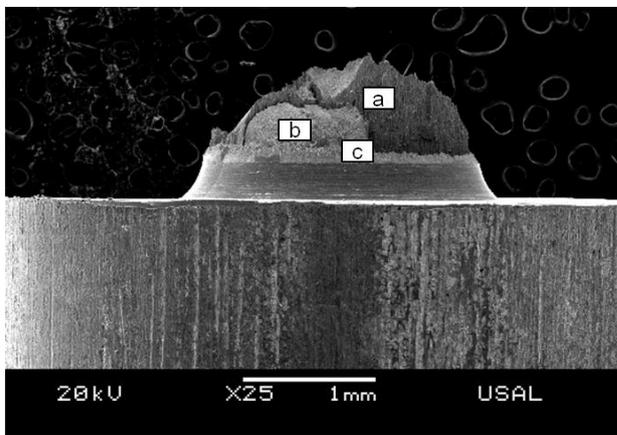


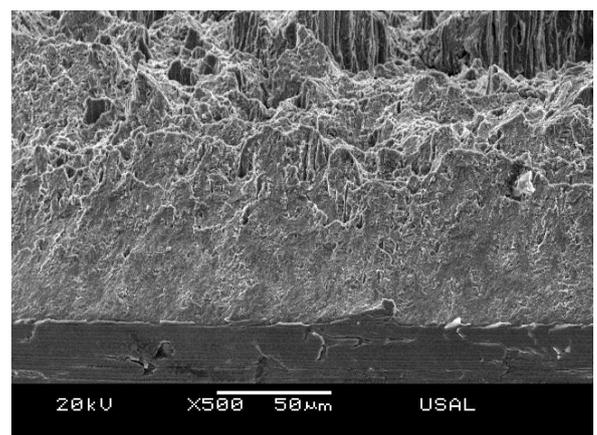
Fig. 3.61. Micro-mecanismos de fractura presentes en la superficie de fractura de las probetas tipo 4B: detalle de los clivajes elongados en pared vertical de la Z_{INT} .



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.62. Micro-mecanismos de fractura presentes en la superficie de fractura de las probetas entalladas axisimétricas 7B, (a) clivajes elongados en paredes cuasi verticales de la Z_{INT} , (b) micro-huecos elongados en las paredes inclinadas de la Z_{INT} y (c) micro-huecos elongados en la CE.

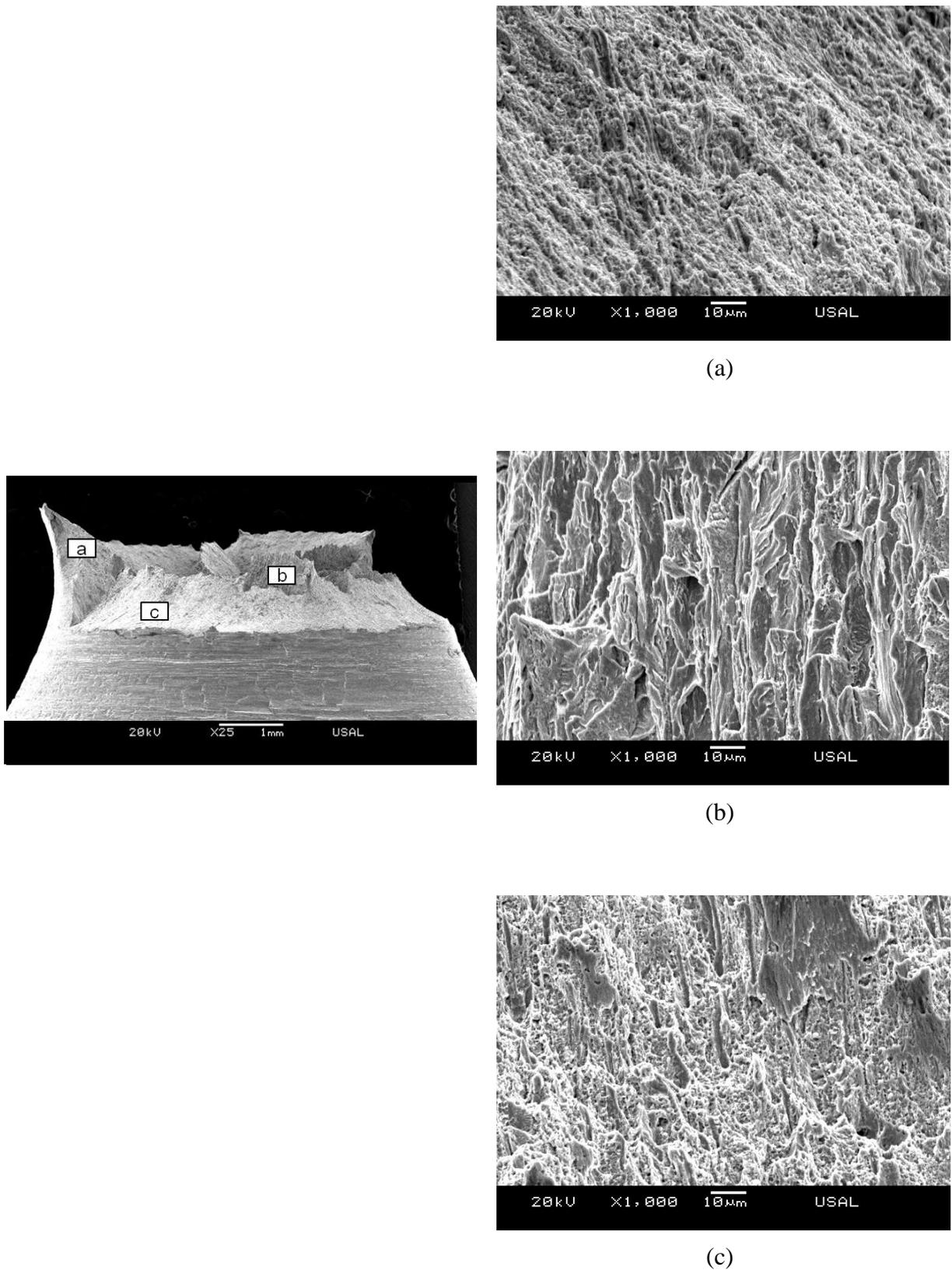


Fig. 3.63. Micro-mecanismos de fractura presentes en la superficie de fractura de la P4C, (a) micro-huecos en las paredes inclinadas de la Z_{INT} , (b) clivajes elongados en las paredes cuasi verticales de la Z_{INT} y (c) micro-huecos elongados en la CE.

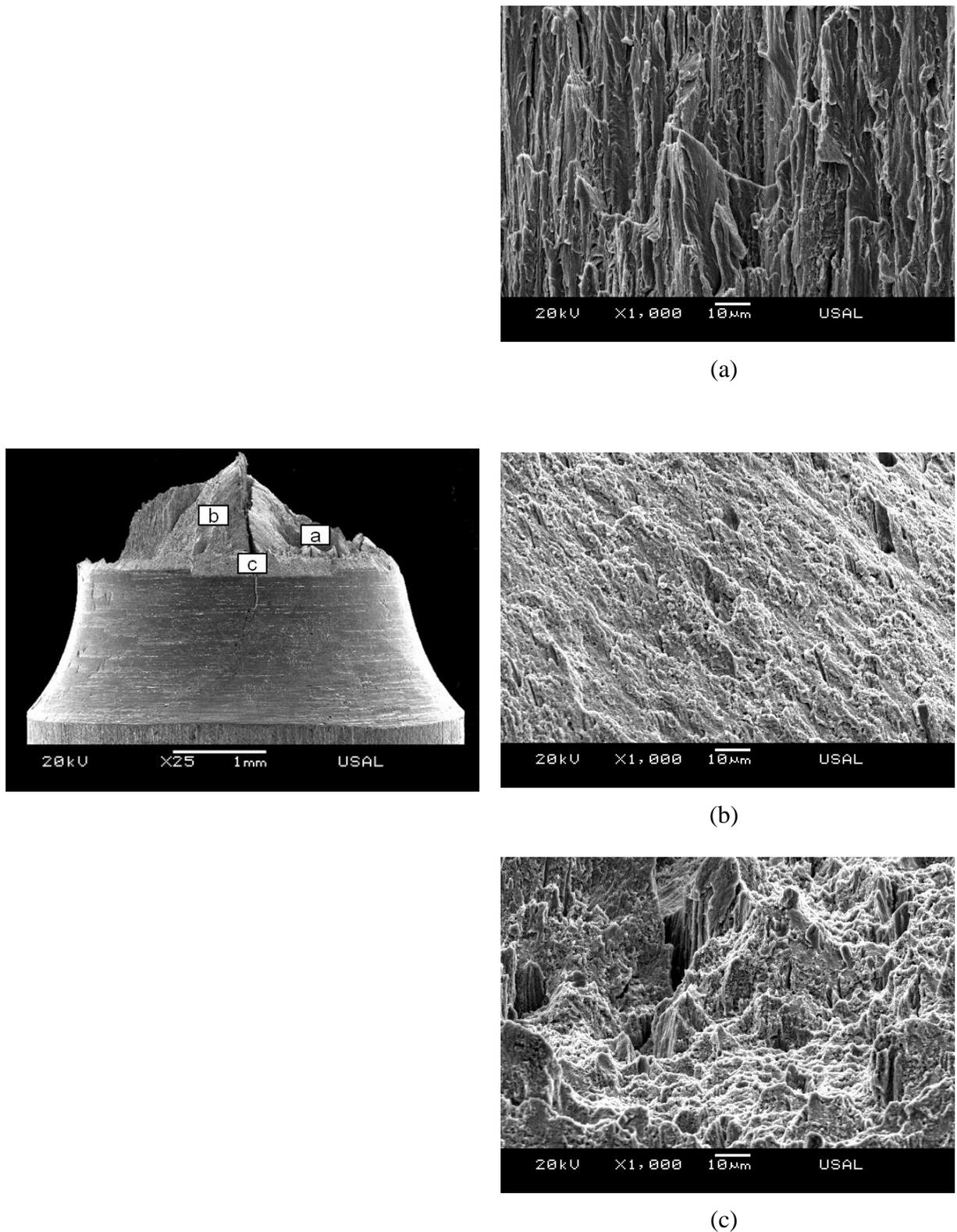


Fig. 3.64. Micro-mecanismos de fractura en la superficie de fractura de las probetas 7C, (a) clivajes elongados en paredes cuasi-verticales de la Z_{INT} (b) micro-huecos en las paredes inclinadas de la Z_{INT} y (c) micro-huecos elongados en la CE.

Las probetas axisimétricas con entallas de tipo C pertenecientes al cuarto y último paso del proceso de trefilado (Figs. 3.63-3.64), al igual que las entallas de tipo A y B presentan distribuciones de micro-mecanismos semejantes en las distintas zonas de la superficie de fractura. Además en éstas también se puede observar la mayor elongación de los clivajes producida con el aumento del grado de trefilado de los alambres de procedencia.

Como se ha comentado en el análisis cualitativo de las micrografías pertenecientes a las distintas zonas de la superficie de fractura, en todas las probetas objeto de estudio que presentan dicha deflexión del camino de fractura se ha podido observar un aumento de la esbeltez de los clivajes presentes en las paredes verticales o cuasi-verticales de la Z_{INT} a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre del cual procede (Fig. 3.65).

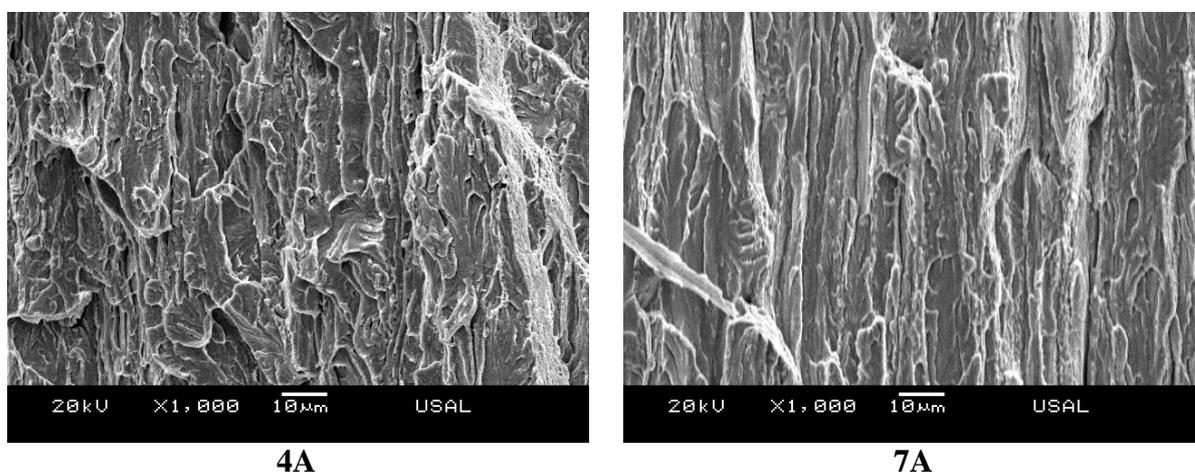


Fig. 3.65. Elongación de los clivajes presentes en las paredes verticales de la Z_{INT} de las probetas con entalla de tipo A.

Además de los cambios de elongación de los clivajes cabe señalar la variación de los micro-mecanismos que componen las paredes inclinadas en dicha zona intermedia, presentando éstas clivajes con micro-huecos en las probetas 4A y microhuecos elongados en las probetas procedentes de alambres de pretensado (Fig. 3.66). Sin embargo en las probetas con entallas de tipo C las paredes inclinadas de dicha zona presentan microhuecos elongados.

Para cuantificar la deflexión del camino de fractura presente en éstas superficies primero se ha medido la distancia entre fondos de entalla b seguida de la altura máxima alcanzada por la fractura anisótropa h , obteniéndose el parámetro adimensional h/b , el cual indica el grado de deflexión que poseen las superficies de fractura analizadas (Fig. 3.22).

Las medidas obtenidas de la deflexión del camino de fractura (h/b) en las probetas pertenecientes a los alambres del cuarto y último paso del proceso de trefilado, para los distintos tipos de entallas analizadas, se muestran en la siguiente Tabla 3.2.

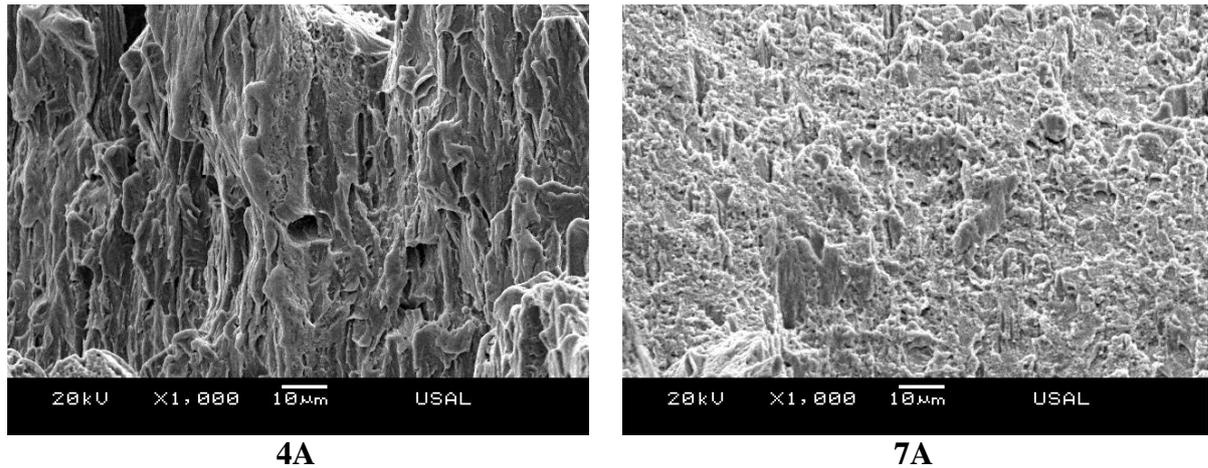


Fig. 3.66. Micro-mecanismos de fractura presentes en las paredes inclinadas de la Z_{INT} de las probetas con entalla de tipo A.

Tabla 3.2. Medida deflexión del camino de fractura (h/b).

Probeta	A4	A7	B4	B7	C4	C7
h/b	0.32	0.35	0.36	0.61	0.24	0.41

Con el análisis cuantitativo de la deflexión del camino de fractura se puede concluir que las probetas con mayor anisotropía son las poseen entallas de tipo B, las cuales tienen un radio muy pequeño de curvatura y una gran profundidad.

En las probetas con entallas de tipo A y C se ha obtenido un comportamiento localmente anisótropo menos pronunciado siendo éste en las probetas procedentes del alambre de pretensado similar al obtenido en las probetas con entalla de tipo B pertenecientes al alambre del cuarto paso del proceso de trefilado.

Las probetas con entalla de tipo A (menor radio de curvatura) presentan medidas de la deflexiones del camino de fractura similares a las de las probetas con entalla de tipo C, sin embargo este hecho no refleja la realidad puesto que en sólo una de las probetas 4C se pudo observar la fractura localmente anisótropa.

Las mediciones de las deflexiones de los caminos de fractura para las probetas pertenecientes al alambre de pretensado, 7A y 7C, han sido similares mostrándose incluso algo superiores en las probetas 7C. Hecho que no ocurría en las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, anteriormente analizadas, en las cuales las probetas con menor radio de curvatura siempre mostraban deflexiones del camino de fractura claramente superiores en comparación con las probetas con entallas de mayor radio de curvatura.

4.2. Análisis micrográfico de probetas de ensayos interrumpidos

Una vez realizados los ensayos bajo sollicitación de tracción de las probetas axisimétricas entalladas y analizadas las superficies de fractura de las mismas, así como su comportamiento localmente anisótropo, se han realizado ensayos bajo sollicitación de tracción de las probetas que han presentado dicho comportamiento anisótropo cuyo objetivo es no llegar a la fractura total de la probeta para poder analizar los micro-daños presentes en la micro-estructura.

Para poder realizar los ensayos bajo sollicitación de tracción de las distintas probetas axisimétricas entalladas sin llegar a la rotura e intentando que presenten el mayor daño previo a la fractura total se han establecido criterios de parada de los ensayos: en los casos de las probetas con entallas tipo A y B basados en las máximas cargas alcanzadas en los ensayos previos; en el caso de los ensayos interrumpidos para las probetas de tipo C el criterio se ha basado en el descenso de carga que estas experimentan antes de la fractura por total separación de superficies.

Una vez obtenidas las probetas axisimétricas entalladas sometidas a ensayos interrumpidos, se ha procedido a realizar cortes transversales al eje longitudinal del alambre, obteniéndose muestras de aproximadamente 1 cm de altura que contienen en su sección media la entalla objeto de estudio. Las muestras obtenidas han sido sometida a sucesivos pulidos de 0,5 mm de desbaste y han sido convenientemente atacadas con una solución de Nital al 3% para poder ser analizadas en el MEB. A continuación se muestran los micro-defectos característicos obtenidos en el análisis de los sucesivos pulidos.

Uno de los micro-defectos encontrados y analizado en el capítulo de introducción de la presente Tesis son las pseudocolonias y las curvaturas y roturas de sus láminas así como su posterior efecto de unión, denominado de cremallera (Fig. 3.67).

En las micrografías analizadas cercanas a las entallas de las distintas probetas, A, B y C, se han podido observar multitud de pseudocolonias perlíticas curvadas y fragmentadas, sin embargo un hecho a señalar es las mayores curvaturas y fracturas que éstas muestran en comparación con las observadas en el estudio micrográfico analizado previamente en los alambres de procedencia, los cuales no habían sido mecanizados ni ensayados, mostrado en el apartado 4.2.5 de la presente Tesis.

Además de las grandes curvaturas y roturas de presentes en las pseudocolonias también se observan grandes fracturas por curvatura en el resto de las colonias como respuesta a la reorganización micro-estructural sufrida no solo durante el propio proceso de trefilado sino también durante el propio ensayo bajo sollicitación de tracción al que han sido sometidas.

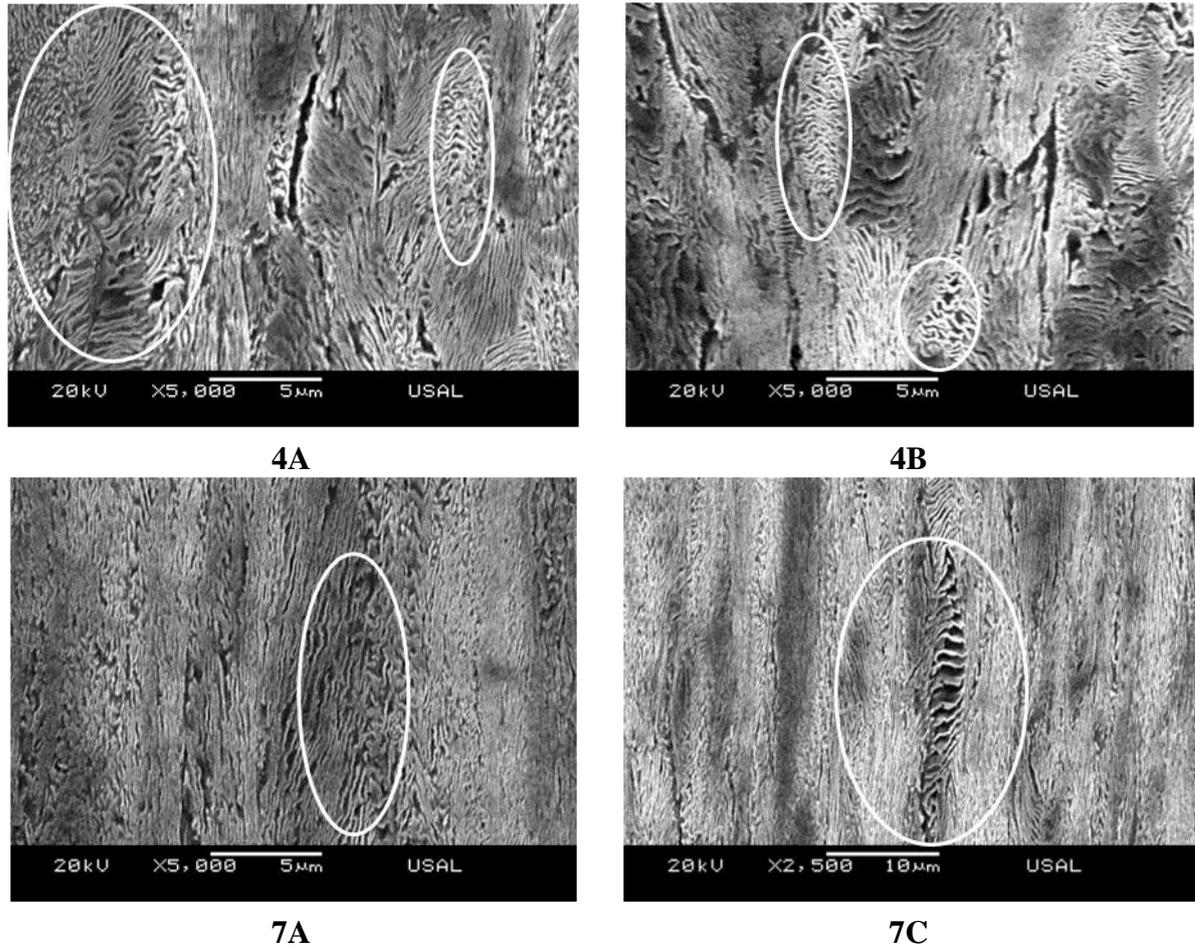


Fig. 3.67. Pseudocolonias con láminas curvadas y fragmentadas presentes en la microestructura de los ensayos interrumpidos.

Otro hecho a señalar es la mejor observación de las pseudocolonias en las probetas procedentes del cuarto paso, puesto que en las micrografías pertenecientes al alambre de pretensado éste ha evolucionado a otros como desgarros intracoloniales (Fig. 3.68).

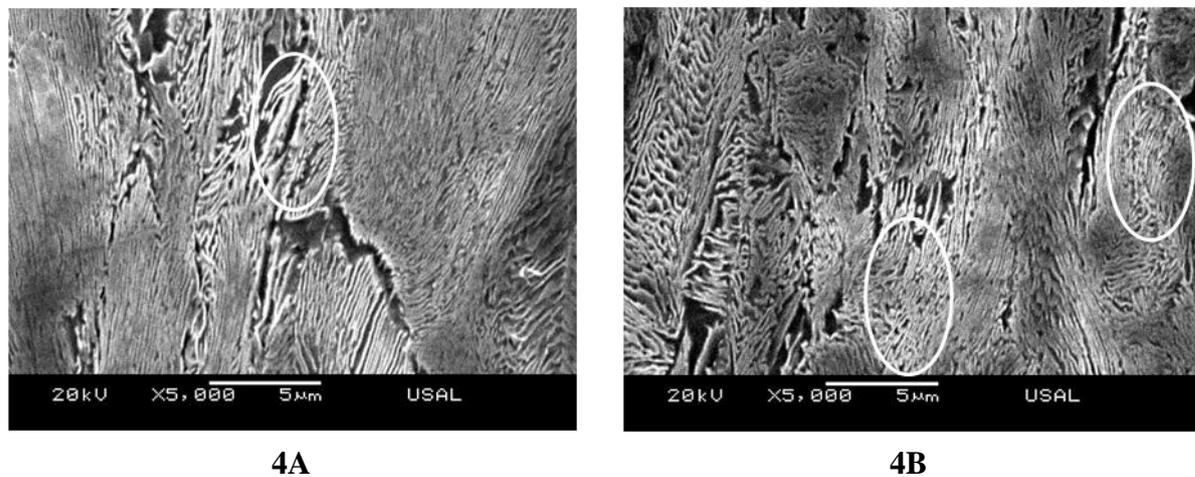


Fig. 3.68. Micro-defecto de rotura por curvaturas en láminas de cementita.

Otro de los defectos encontrados en el análisis micrográfico de los sucesivos pulidos es la microdescolonización, producida en el límite entre colonias por acomodamiento de éstas (Fig. 3.69). La microdescolonización se ha podido observar sobre todo en probetas axisimétricas procedentes de alambre de pretensado final.

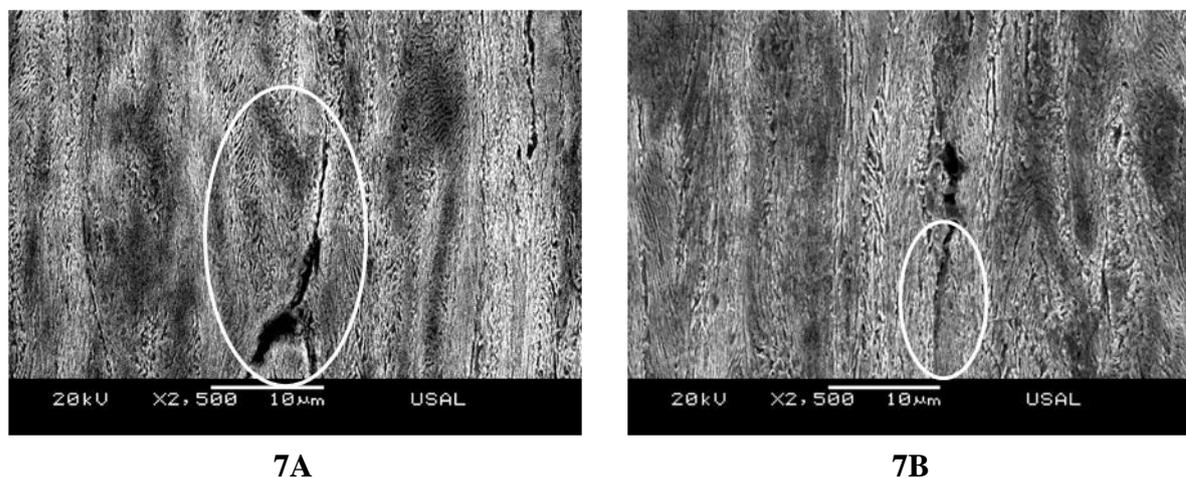


Fig. 3.69. Microdescolonizaciones.

Uno de los objetivos de mayor interés en la presente Tesis es el análisis de los micro-defectos generados por las distintas inclusiones presentes en este tipo de acero. En las siguientes Figs. 3.70-3.71 se muestran algunos de éstos próximos a las entalladas de dichas probetas. Por una parte se muestran los microdaños generados por inclusiones de tipo mezcla, las cuales aparecen bastante deformadas, Fig. 3.70, como se observa en la micrografía perteneciente a la probeta 7B. Las inclusiones de tipo mezcla son aquellas que presentan dos tipos de inclusiones situadas normalmente una de tipo duro en la parte central y otra de tipo blando rodeándola. Como se puede observar en las micrografías siguientes de las probetas 7A y 7B la inclusión dura de la parte de las inclusiones tipo mezcla aparece desunida de la matriz en la dirección longitudinal del alambre y apelmazada por la matriz circundante en la opuesta mientras la inclusión de tipo blando se muestra elongada y adelgazada en la dirección longitudinal. En las colonias de perlita que rodean a la inclusión de tipo duro se ha observado en la dirección transversal del alambre una disminución del espaciado interlaminar

Los micro-defectos intra-coloniales que se han analizado se presentan con orientaciones próximas a los 45° (garras de leopardo), aunque también se han encontrado algunos de estos micro-defectos prácticamente horizontales en conjunto (Fig. 3.71). Una de las progresiones de daño más observadas es la unión entre piel de leopardo, garras, pseudocolonias con láminas fragmentadas y microdescolonizaciones, como el desgarro intercolonial presente en la siguiente Fig. 3.71 (b).

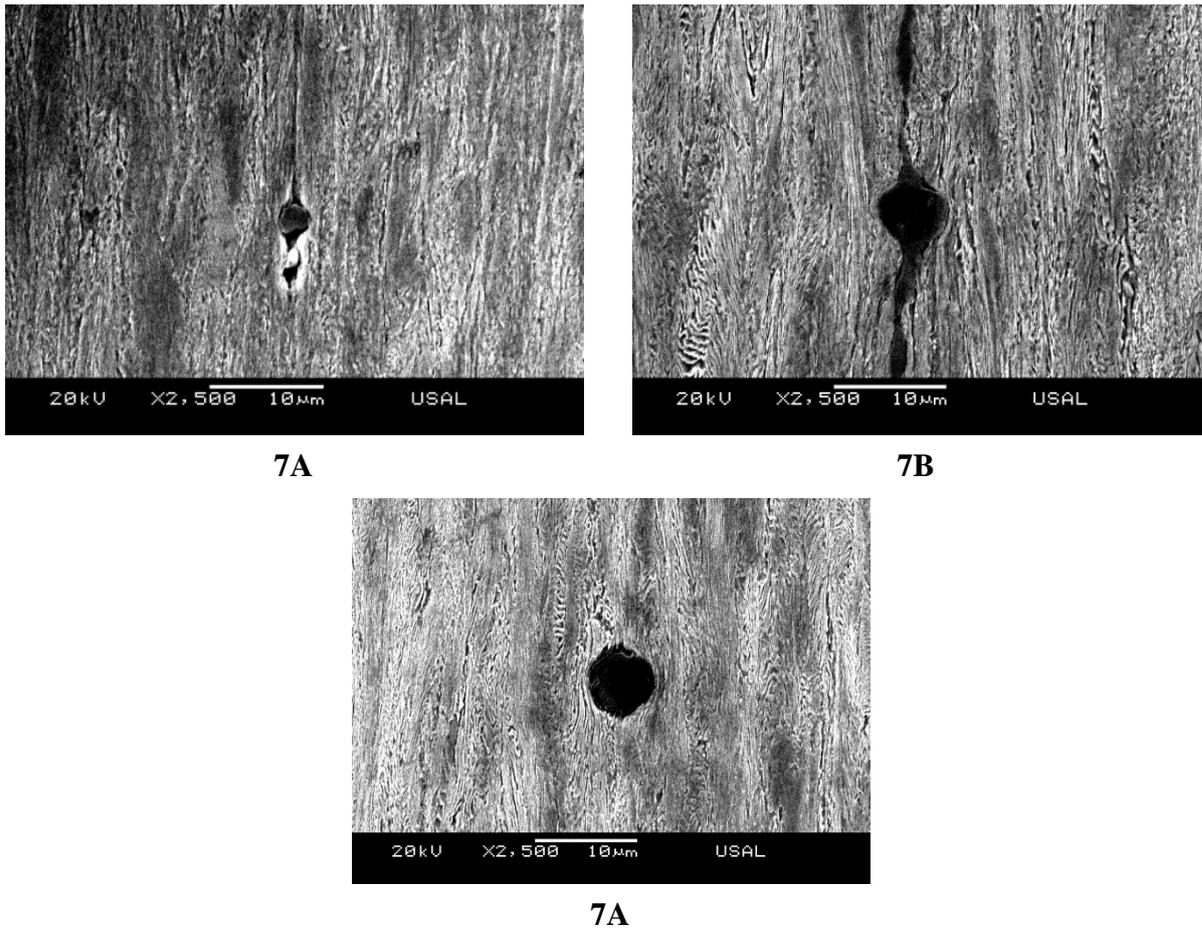


Fig. 3.70. Inclusiones de tipo mezcla (arriba) y de tipo duro (abajo).

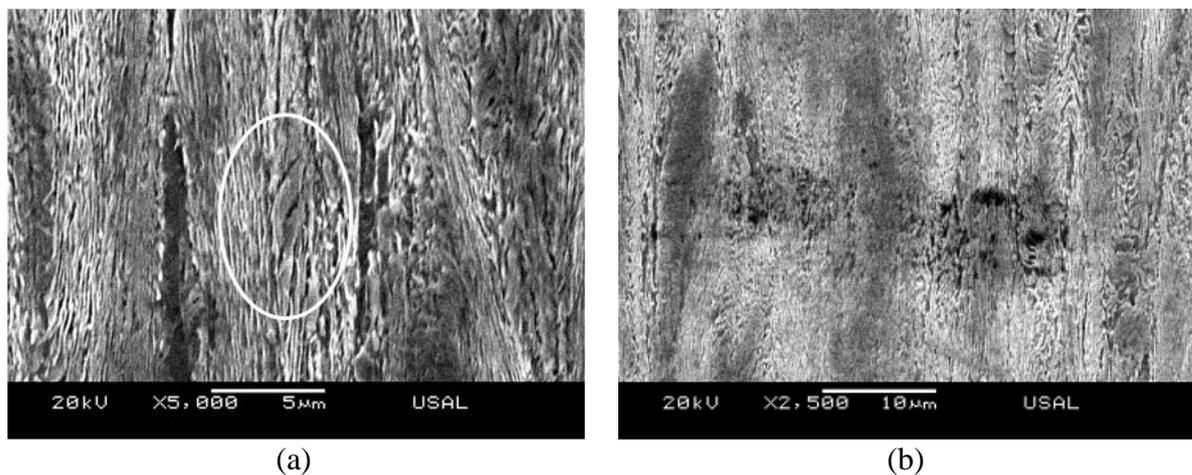


Fig. 3.71. Microdefectos en la probeta 7A: (a) garra de leopardo y (b) desgarró intercolonial. Otro de los micro-defectos encontrados en las probetas analizadas dentro de la sección neta, entre entallas, ha sido los desgarró inter-coloniales, presentes en todas las probetas analizadas (Fig. 3.72). Los desgarró inter-coloniales en las probetas axisimétricas procedentes del alambre de pretensado comercial se presentan con mayores zonas verticales debido a que las colonias que lo conforman son mucho más elongadas.

Los desgarros intercoloniales, como se ha comentado en el apartado 4.3 del presente capítulo se producen entre los límites de colonias y casi siempre son precedidos por micro-descolonizaciones. En las siguientes micrografías, Fig. 3.72, se puede observar como muchas de las veces estos se unen a desgarros intra-coloniales producidos previamente por garras de leopardo o rotura por curvatura.

Además de la posible unión entre los dos tipos de desgarros existentes, inter y intra-colonial también se ha observado posibles evoluciones de estos a través de los micro-defectos producidos por inclusiones, puesto que éstas salvo casos excepcionales se sitúan en los bordes de colonias perlíticas.

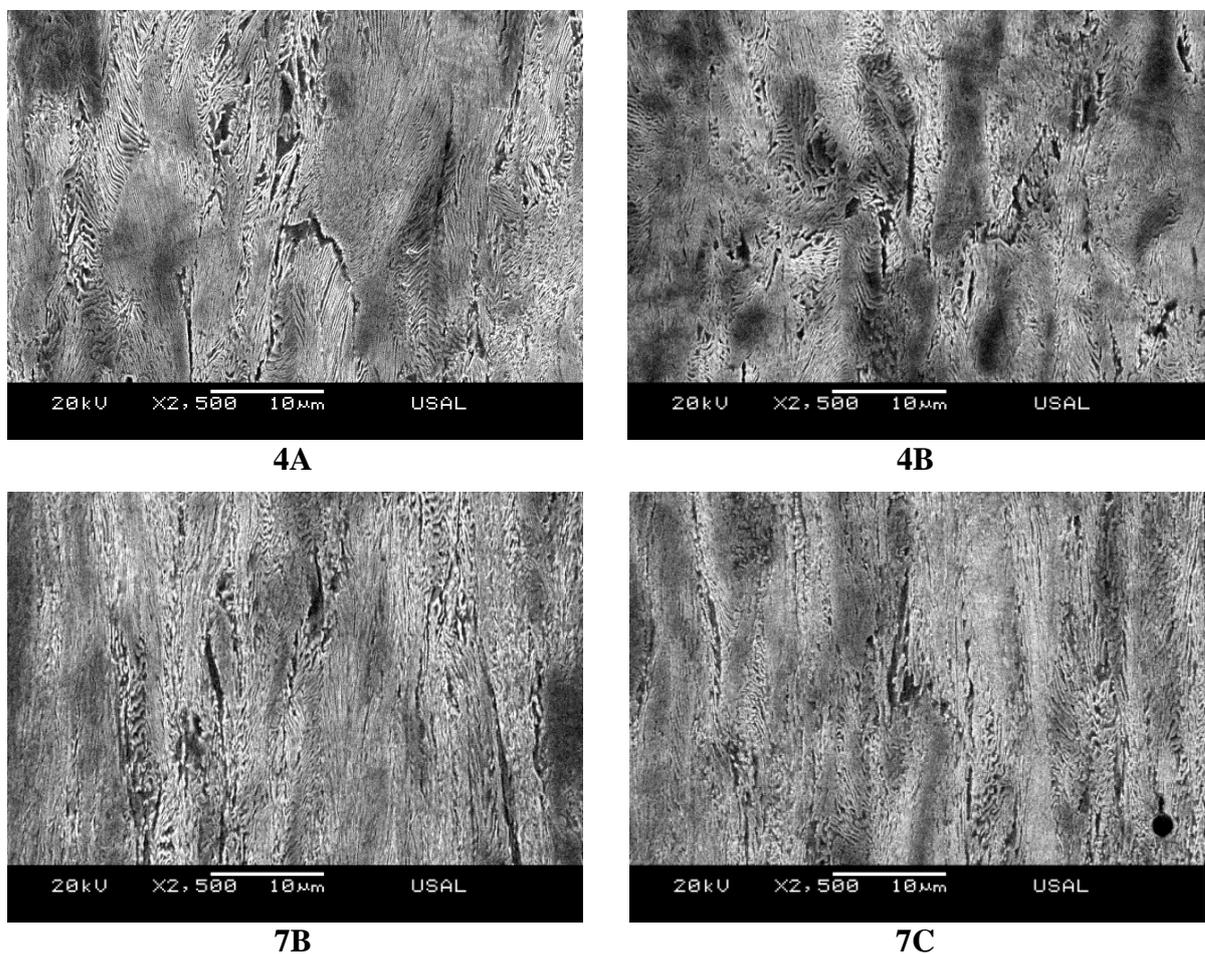


Fig. 3.72. Desgarros intercoloniales.

En algunas de las probetas analizadas se ha observado el comienzo de la fractura del material en forma de micro-fisuras que parten de una de las entallas analizadas y en algunos casos de ambas. Éste ha sido el caso de la probeta axisimétrica con entalla de tipo 7A procedente del alambre de pretensado. En la Fig. 3.73 se puede observar una de las micro-fisuras encontradas, ésta parte del centro del fondo de entalla con un ángulo próximo a 45°. En ésta

figura se puede observar a más aumentos la evolución de la micro-fisura a través de colonias con láminas orientadas y pseudocolonias sin apenas variar el ángulo de entrada de la misma.

En la evolución micro-estructural de la micro-fisura observada se aprecian pequeñas variaciones del camino de fractura, a 45° , las cuales parecen coincidir con bordes entre colonias y pseudocolonias. Aunque sea imperceptible a simple vista también se puede analizar micro-daño que aún no forma parte de la micro-fisura y que se encuentra en las inmediaciones de ésta el cual está formado por pseudocolonias muy fragmentadas.

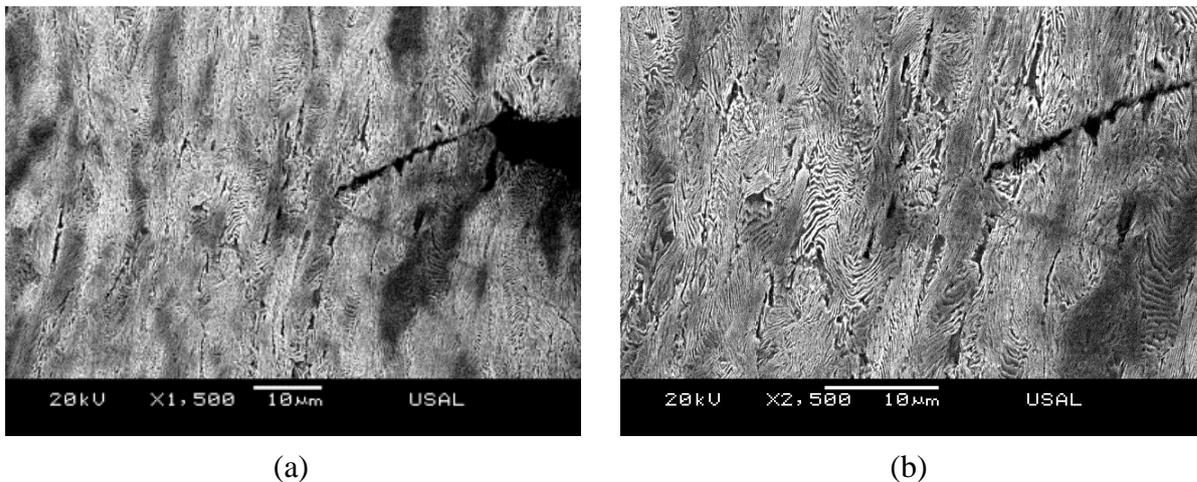


Fig. 3.73. Micro-fisura: (a) en el fondo de entalla de la probeta axisimétricas de ensayos interrumpidos 4A y (b) micrografía ampliada de la punta de la micro-fisura.

En el caso de la probeta 7A se han obtenido varias micrografías de la misma micro-fisura en pulidos consecutivos (Fig. 3.74). La micro-fisura encontrada también parte en este caso del centro del fondo de entalla, sin embargo se ha podido observar como a medida que avanza a través de la microestructura su inclinación va siendo más próxima a los 45° . En esta micro-fisura se ha podido analizar en detalle la progresión de ésta a través de la microestructura perlítica. En las micrografías de la micro-fisura se ha podido observar como ésta progresa con una determinada dirección la cual parece no estar influida de forma general por los microdefectos presentes en dicha zona. También en dicha progresión del camino fractura de la micro-fisura se ha observado la influencia, pequeñas deflexiones, de micro-daños como en el caso de la Fig. 3.74 (a) pseudocolonias e inclusiones ó en el caso de la Fig. 3.74 (b) microdescolonizaciones.

En las micrografías correspondientes a las probetas 7B y 7C procedentes de los ensayos interrumpidos se muestran micro-fisuras que parten de la zona central del fondo de entalla, dentro de la superficie neta Fig. 3.75.

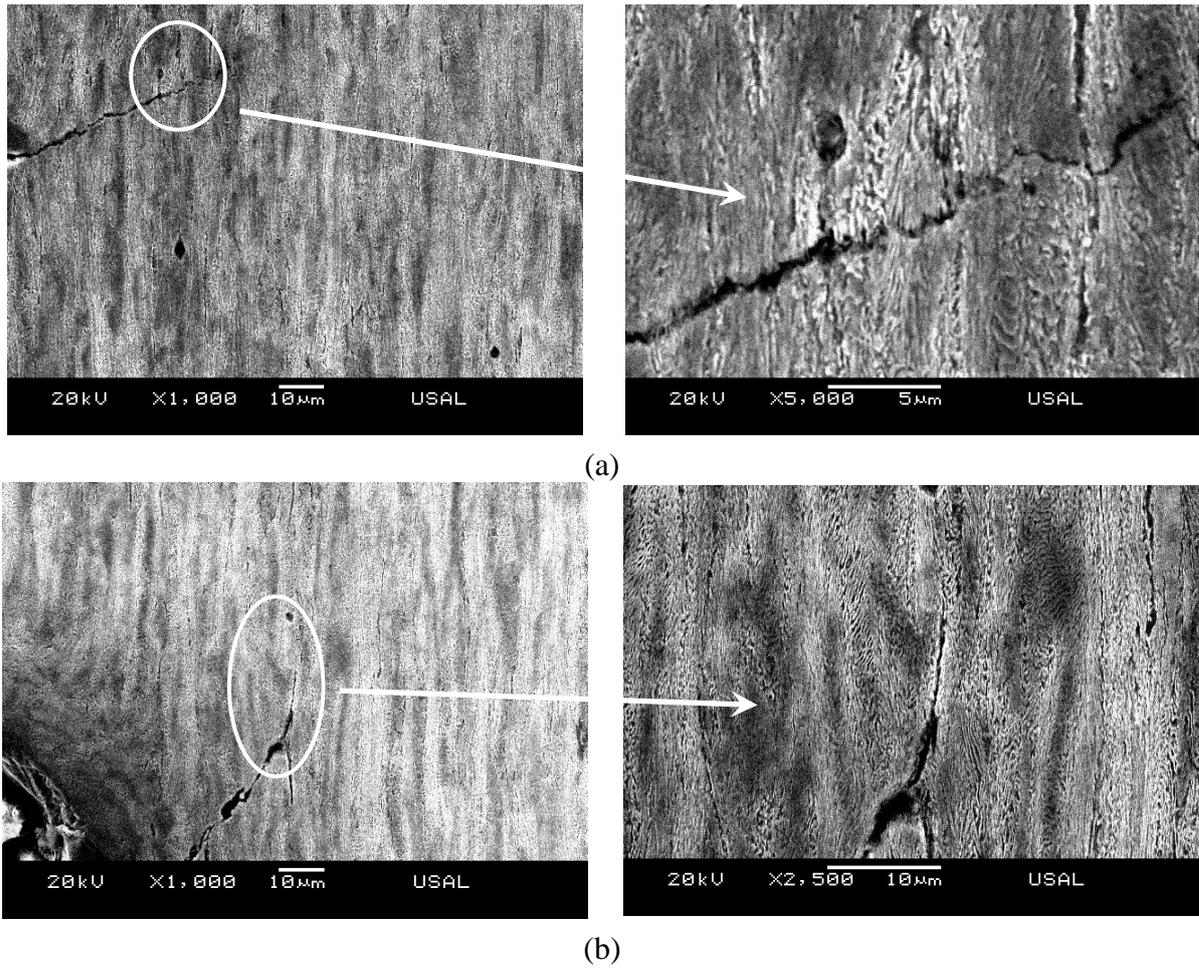


Fig. 3.74. Micro-fisura en la probeta 7A: (a) fondo de entalla y (b) micrografía ampliada del avance de la micro-fisura.

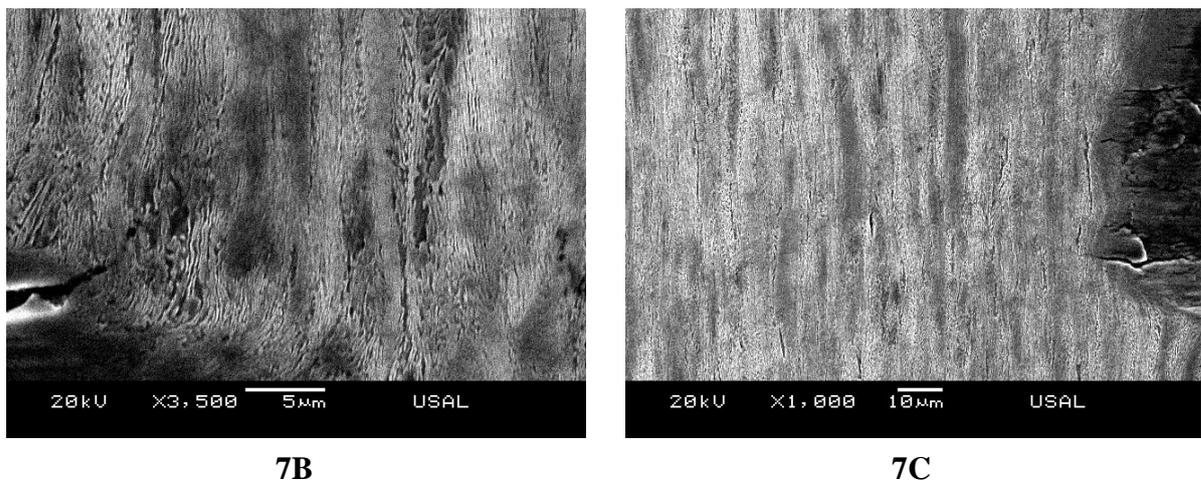


Fig. 3.75. Micro-fisuras en los fondos de las entallas de las probetas entalladas 7B y 7C: ensayos interrumpidos.

En la micrografía perteneciente al fondo de entalla de la probeta 7B se observa el comienzo de fractura, en el cual la microfisura se sitúa en el centro del fondo de entalla y progresa a través de colonias cuyas láminas están orientadas en la dirección del proceso de trefilado siguiendo una dirección próxima a los 45° a través de las mismas. En la micrografía de la probeta 7C se muestra el fondo de la entalla en el cual se observa multitud de micro-fisuras que poseen direcciones próximas a la horizontalidad

5. PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS SOMETIDAS A FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS

Tras la realización de los ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos se han realizado cortes transversales al eje longitudinal de la probeta, logrando muestras de aproximadamente 1cm de altura las cuales incluyen las superficies de fractura obtenidas. Dichas muestras han sido recubiertas por un material aislante, aislarco, preservándolas del daño que pudiesen sufrir por el ambiente hasta su análisis microscópico mediante MEB. Para llevar a cabo el análisis fractográfico se han sometido a una limpieza previa, para quitar la capa aislante impuesta, sumergiendo las muestras en acetona e introduciéndolas en una máquina de ultrasonidos.

Las fractografías obtenidas de las distintas probetas analizadas se muestran en el intervalo de Figs. 3.76-3.77. En estas fractografías ya se observa a simple vista grandes diferencias en la morfología de las superficies de fractura de las probetas con entallas de tipo A (entallas agudas, pequeño radio de curvatura), apenas deformadas, y las superficies de las probetas con entallas de tipo C (entallas romas, gran radio de curvatura), cuya morfología muestra una gran reducción de sección en la entalla compensada por un aumento de la superficie en la zona más alejada de la misma.

En este tipo de probetas prismáticas ensayadas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos las superficies de fractura muestran, al igual que sucedía en las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, tres zonas caracterizadas por distintos micro-mecanismos de fractura; corona exterior CE, zona intermedia Z_{INT} y zona de proceso de fractura ZPF.

En las fractografías obtenidas de las distintas superficies de fractura se muestra un posible aumento de la zona de CE, la cual parece volver a reducir su tamaño en las probetas mecanizadas a partir del último paso de trefilado para ambos tipos de entalla analizados.

En la superficie de fractura de las probetas prismáticas con entalla de tipo A mecanizadas a partir del alambroón inicial no se ha observado una zona de CE a simple vista, sin embargo en las de tipo C procedentes del mismo alambre ésta es fácilmente reconocible en las zonas próximas a la entalla.

En cuanto a la morfología de la superficie de fractura, ésta a simple vista parece mucho más deformada para las probetas con entalla de tipo C procedentes del alambre del tercer y cuarto paso del proceso.

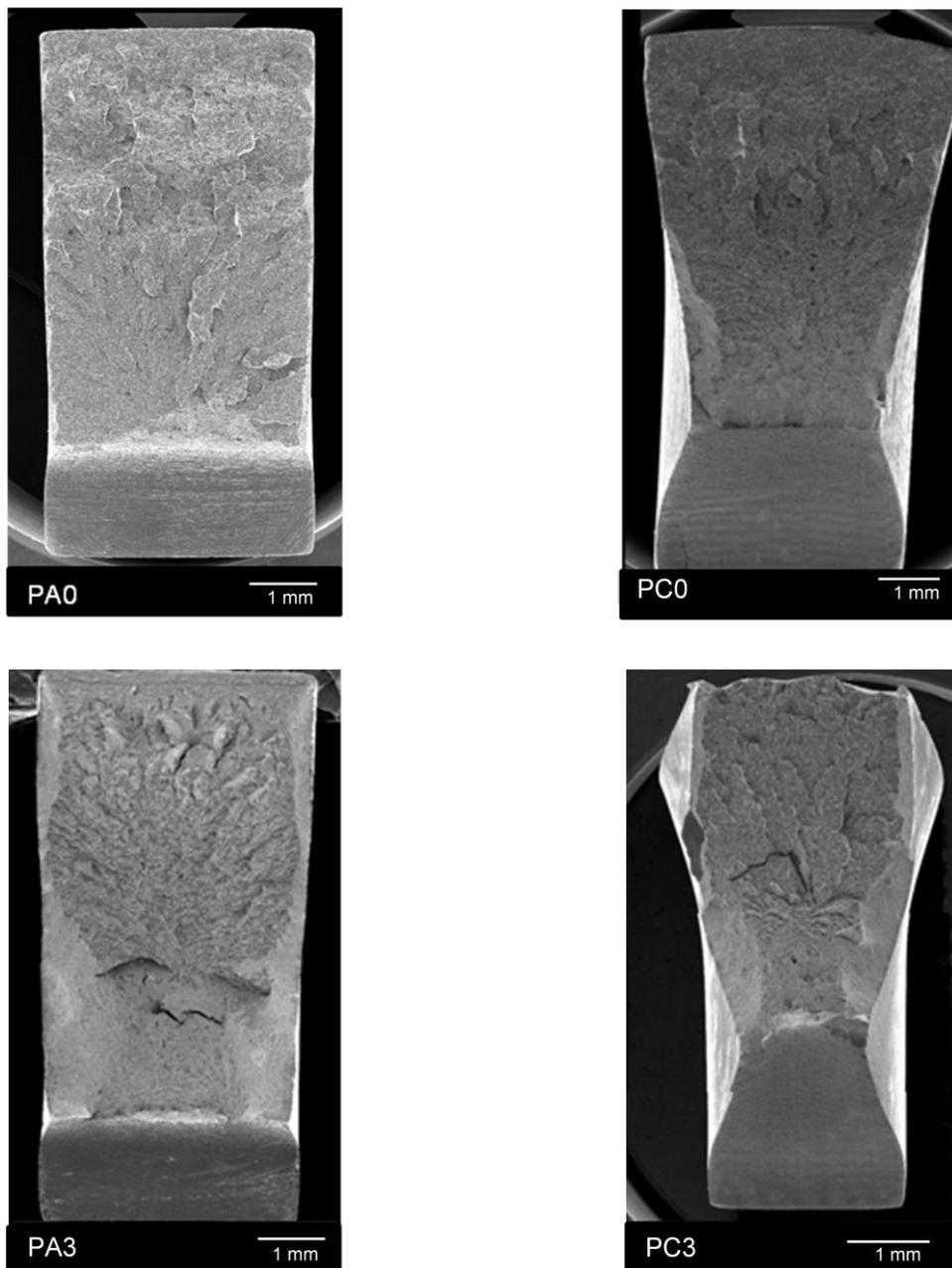


Fig. 3.76. Superficies de fractura de las probetas PA0, PC0, PA3 y PC3.

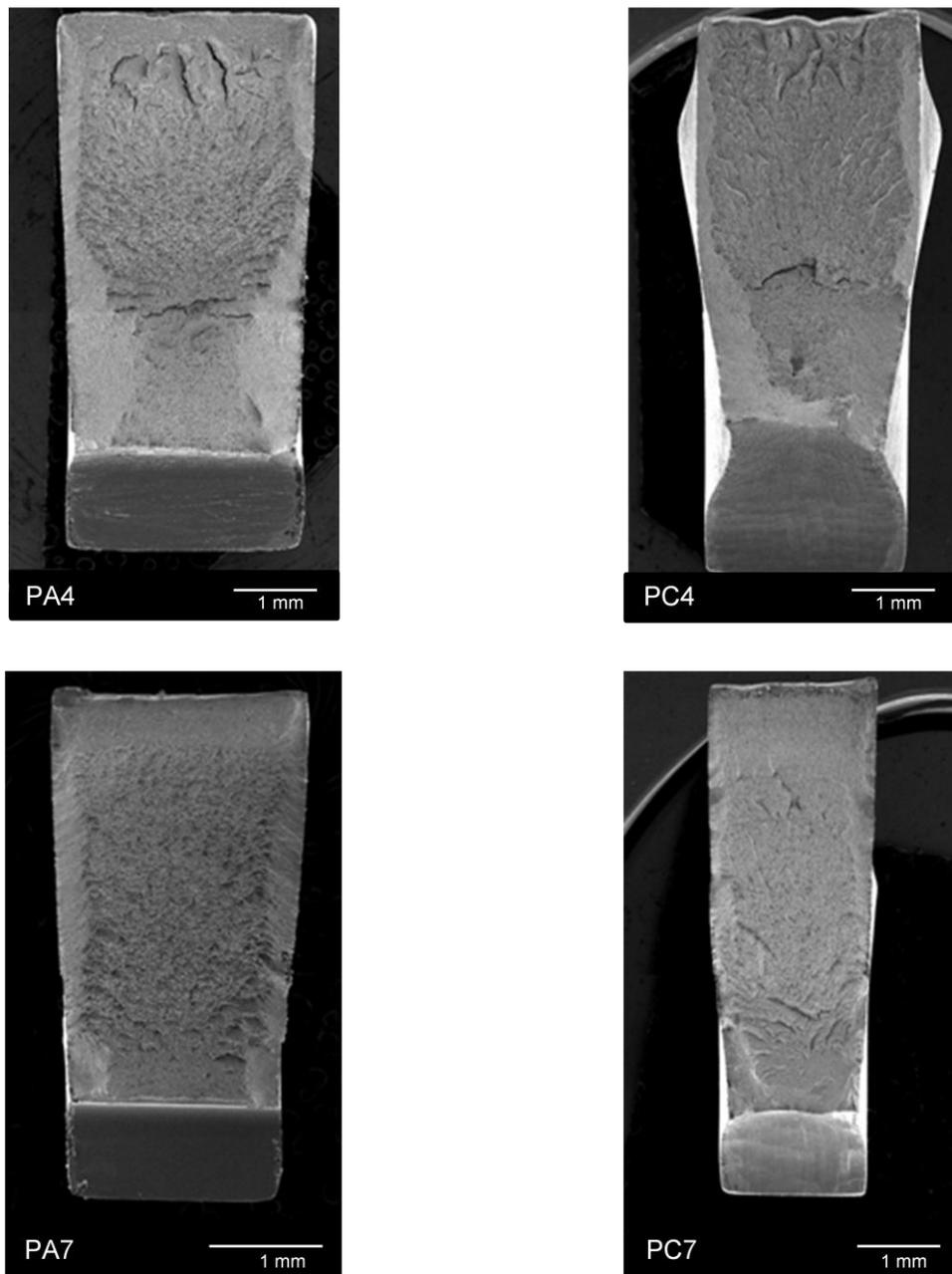


Fig. 3.77. Superficies de fractura de las probetas PA4, PC4, PA7 y PC7.

A continuación se muestran, en las Figs. 3.78-3.86, las distintas fractografías representativas de cada tipo de probeta entallada analizada, adjuntando las micrografías correspondientes a cada zona. La probeta PA0, procedente del alambión inicial, Fig. 3.78, muestra en su superficie de fractura una Z_{INT} formada por clivajes, C, y una ZPF en la cual se distinguen microhuecos de gran tamaño, CMH*. En las superficies de fractura de las probetas PA3, PA4 y PA7 se ha observado una zona de CE formada por CMH. La corona exterior muestra una gran anchura en las proximidades de la entalla, ésta es máxima cuando se termina la ZPF, es decir, cercana a $\frac{1}{4}$ de la misma. La CE sufre una disminución de espesor cuanto más lejos esté

del fondo de la entalla, aunque el espesor de ésta es más uniforme en los laterales de la superficie de fractura cuanto mayor es el grado de trefilado.

La Z_{INT} analizada de las probetas estudiadas está formada por micromecanismos de clivaje, C, los cuales a medida que se avanza en el grado de trefilado del alambre van desapareciendo a favor de microhuecos, CMH.

En cuanto a las ZPF analizadas en las probetas PA, se ha observado situada en la zona central de la entalla mostrando una mayor anchura en la zona más próxima a ésta. Las ZPF presentan CMH*. La dirección de los clivajes de la Z_{INT} muestra como la fractura diverge desde la ZPF hacia los bordes de la probeta, formándose una fractura con forma de abanico la cual parte desde la zona central de la entalla.

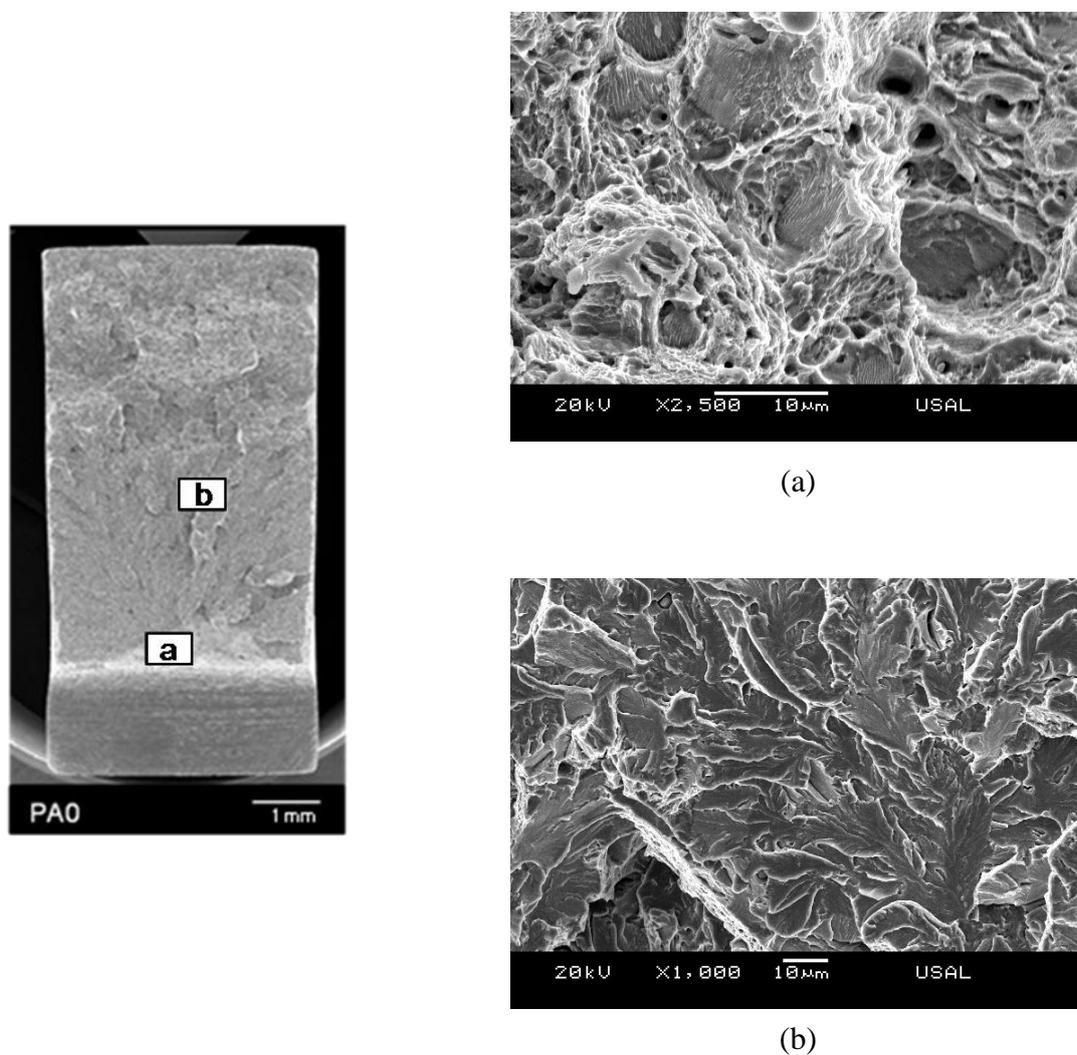


Fig. 3.78. Superficie de fractura de la probeta PA0: (a) ZPF, (b) Z_{INT} .

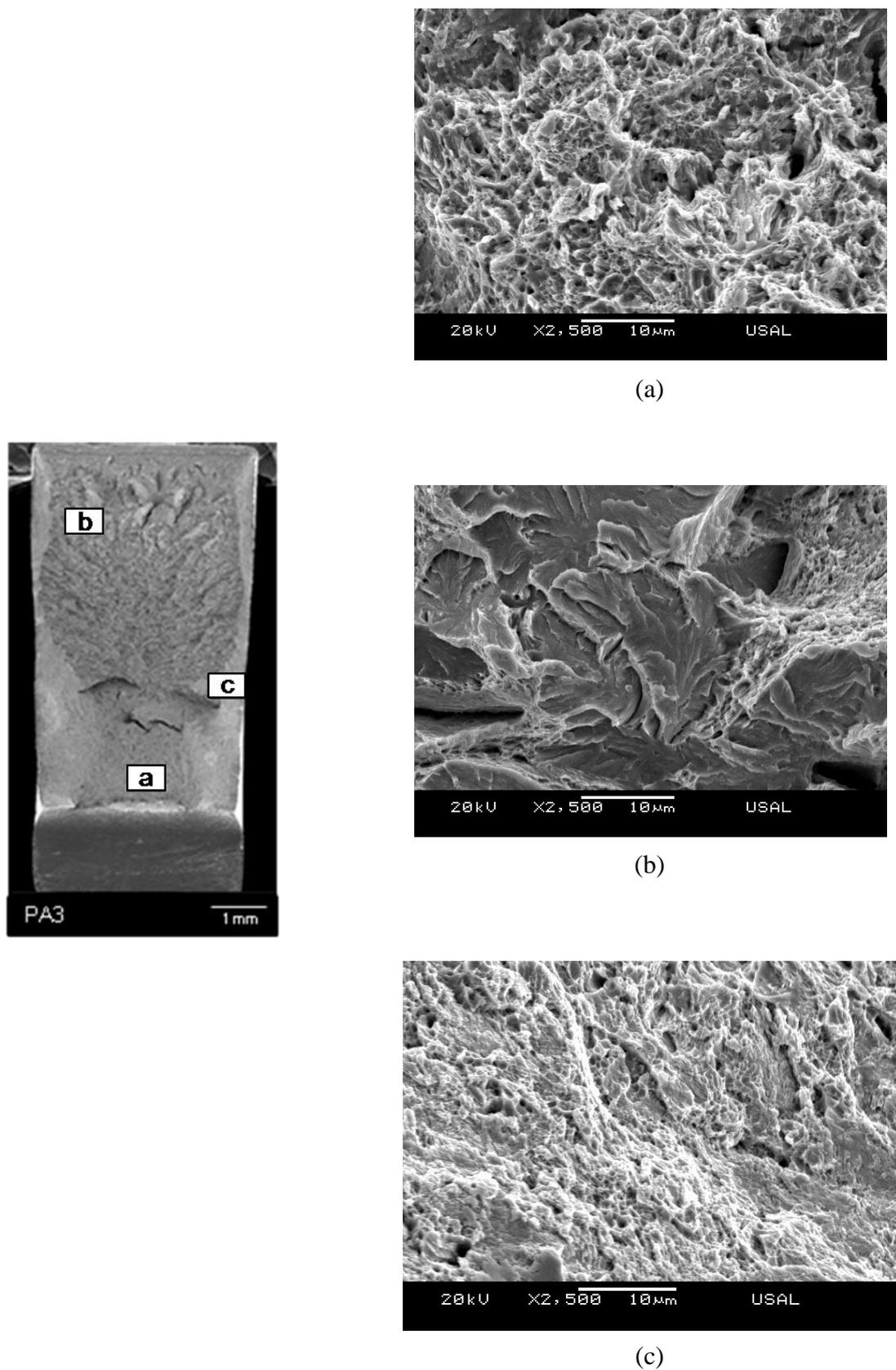


Fig. 3.79. Superficie de fractura de la probeta PA3: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

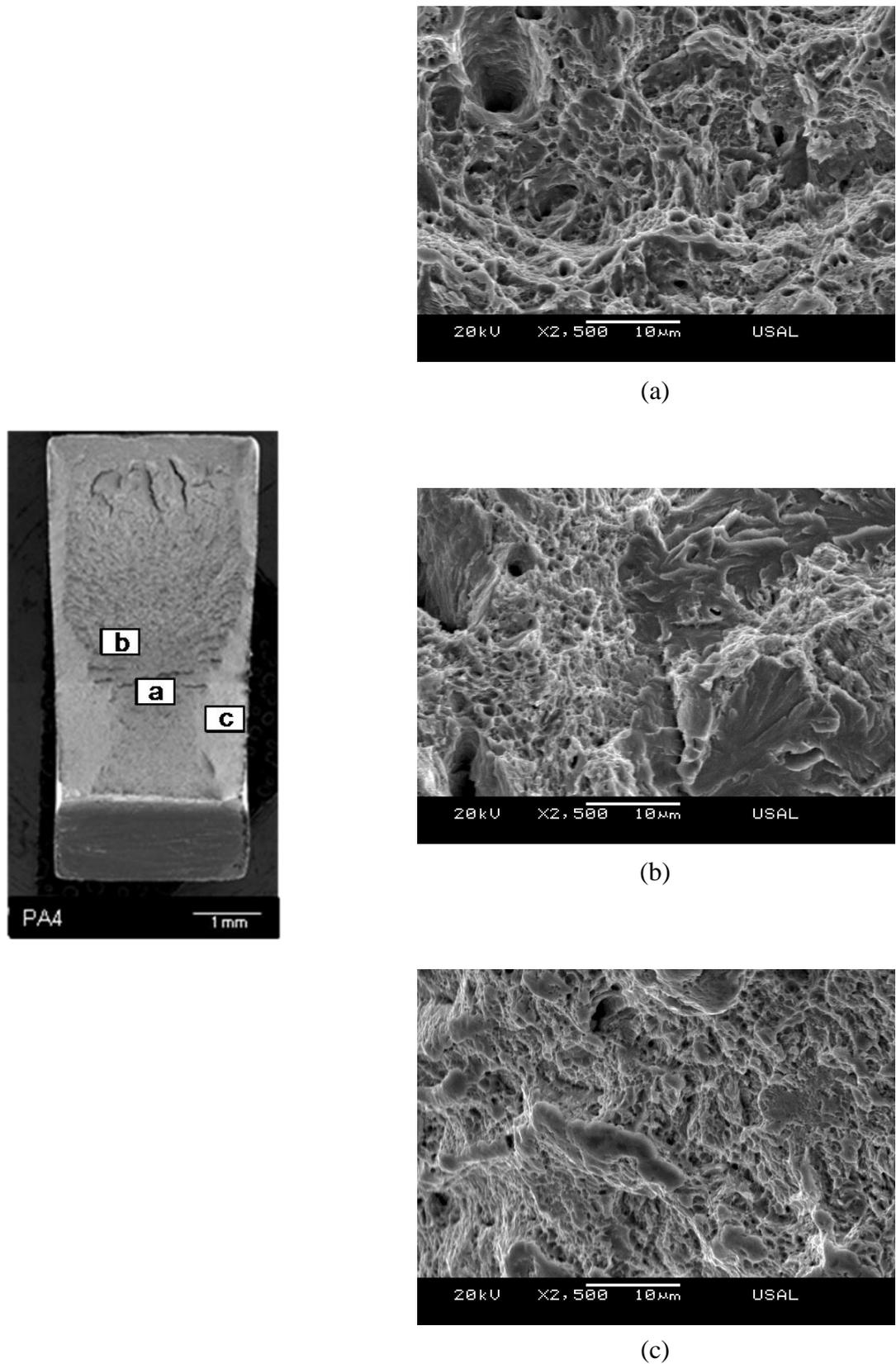


Fig. 3.80. Superficie de fractura de la probeta PA4: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

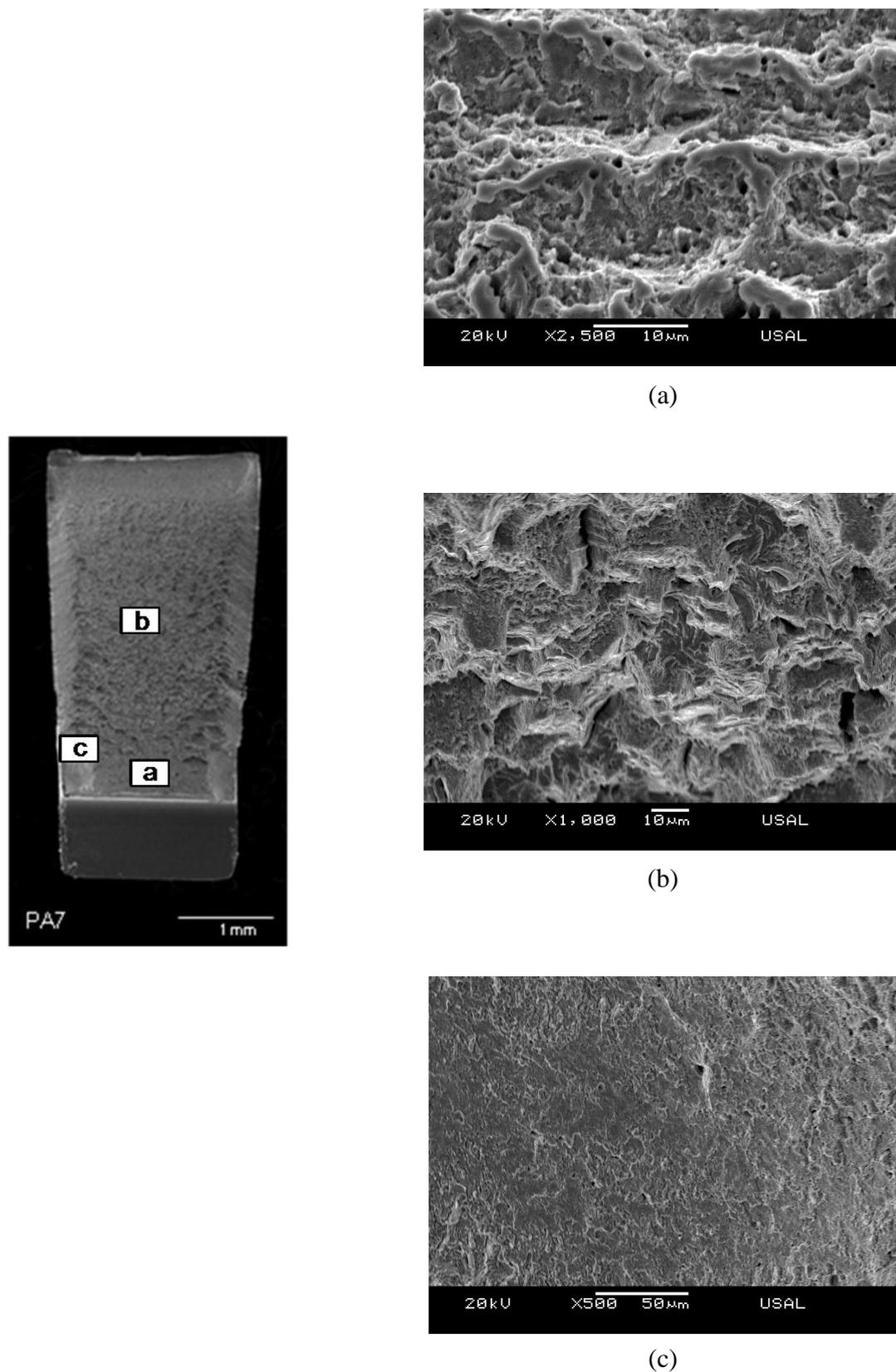


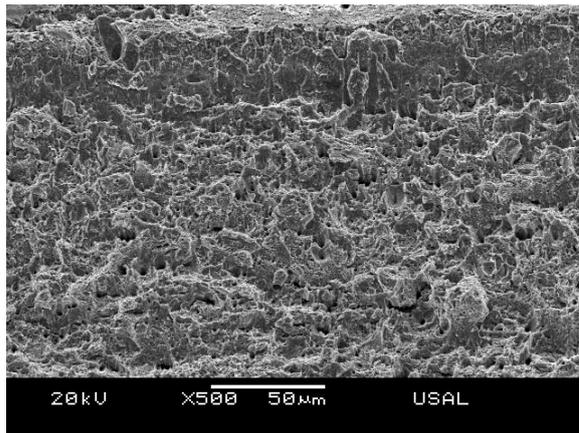
Fig. 3.81. Superficie de fractura de la probeta PA7: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

Cabe señalar la observación de una CE situada en la parte superior de la superficie de fractura, zona más alejada y opuesta al fondo de entalla, la cual está formada por CMH distintos a los encontrados en la CE situada en los laterales de la superficie de fractura y a los presentes en la ZPF, Fig. 3.82. Dicha zona, CE de la parte superior, se ha observado sólo en la superficie de fractura de las probetas PA3, PA4 y PA7. En las micrografías se puede ver la gran diferencia existente entre los CMH que conforman la CE y los CMH que componen la CE superior, los primeros son semejantes a los analizados en las zonas de CE de las probetas tanto axisimétricas como prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. Éstos presentan un tamaño mucho mayor y su disposición y morfología no son tan homogéneas como sucedía en los microhuecos de la CE lateral. La morfología de los CMH que componen la CE superior muestra pequeñas crestas y valles los cuales a medida que avanza el grado de trefilado del alambre parecen disponerse formando estrías similares a las encontradas en la ZPF de las probetas axisimétricas procedentes del alambre de pretensado final.

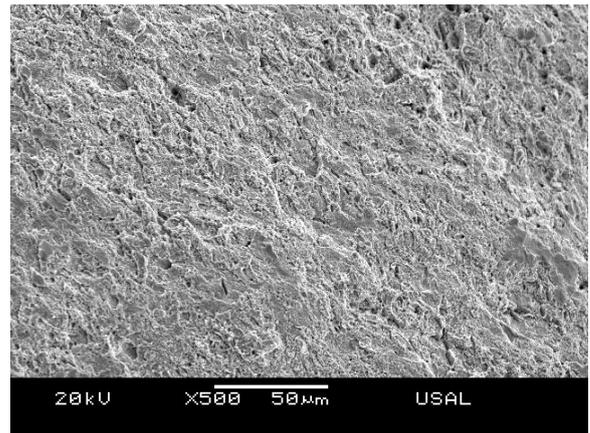
Otro hecho observable en ambos tipos de CE observada es la disminución de los microhuecos a medida que aumenta el grado de trefilado de los alambres de procedencia, además de una mayor homogeneidad en tamaño y disposición de los mismos.

En las superficies de fractura de las probetas prismáticas con entallas de tipo C, gran radio de curvatura, se ha observado una zona de CE presente en todas ellas. La CE está compuesta por el micro-mecanismo de fractura de CMH. La máxima anchura de la CE coincide con la máxima reducción de espesor de la probeta y ésta, al igual que sucedía con las probetas con entalla de tipo A, salvo en las mecanizadas a partir del alambrón inicial, se sitúa en los laterales de la superficie. La CE superior presente en las probetas de con entalla de tipo C es casi imperceptible, con lo cual no se han podido obtener micrografías en las cuales se muestre el micro-mecanismo de fractura que debería imperar en la misma, CMH.

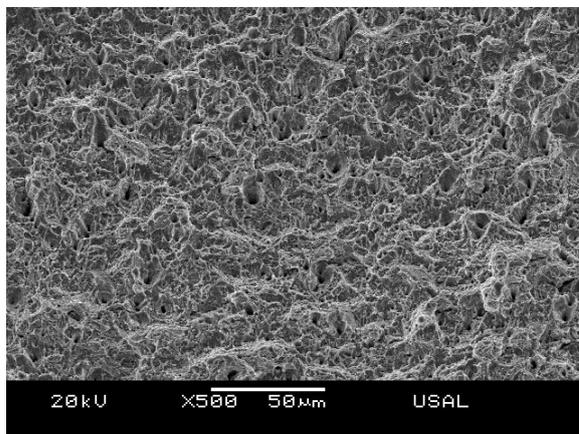
La localización de la ZPF en las superficies de estas probetas, aunque próxima también a la entalla, difiere de la presentada por las probetas con entallas de tipo A (entalla con menor radio de curvatura), puesto que en todas ellas se ha analizado la CE entre la entalla y la ZPF. La ZPF está formada, al igual que sucedía en todas las entallas hasta ahora analizadas en la presente Tesis, por CMH*.



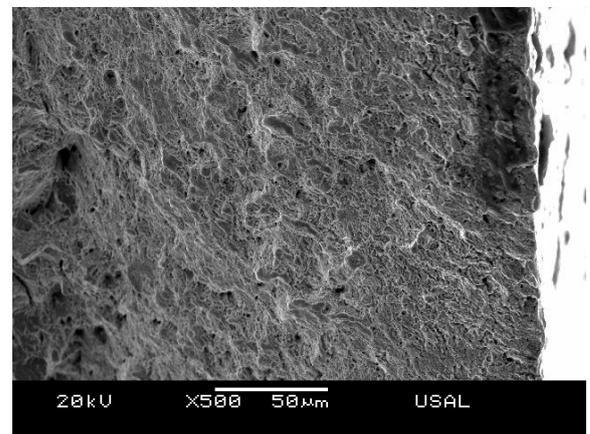
(a)



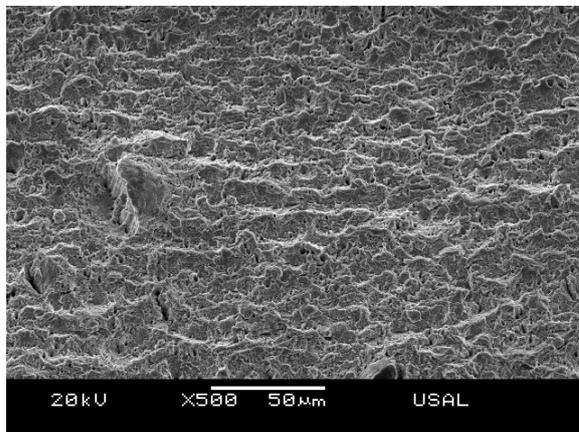
(b)



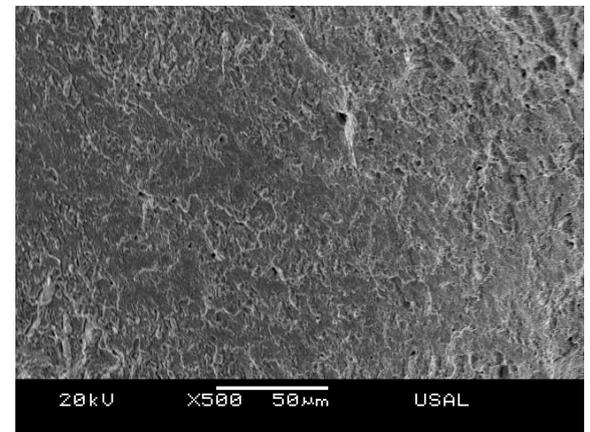
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig.3.82. Micrografías de las probetas PA3, PA4 y PA7 de la CE; (a), (c) y (e) situada en la parte superior y (b), (d) y (f) en los laterales de la superficie de fractura.

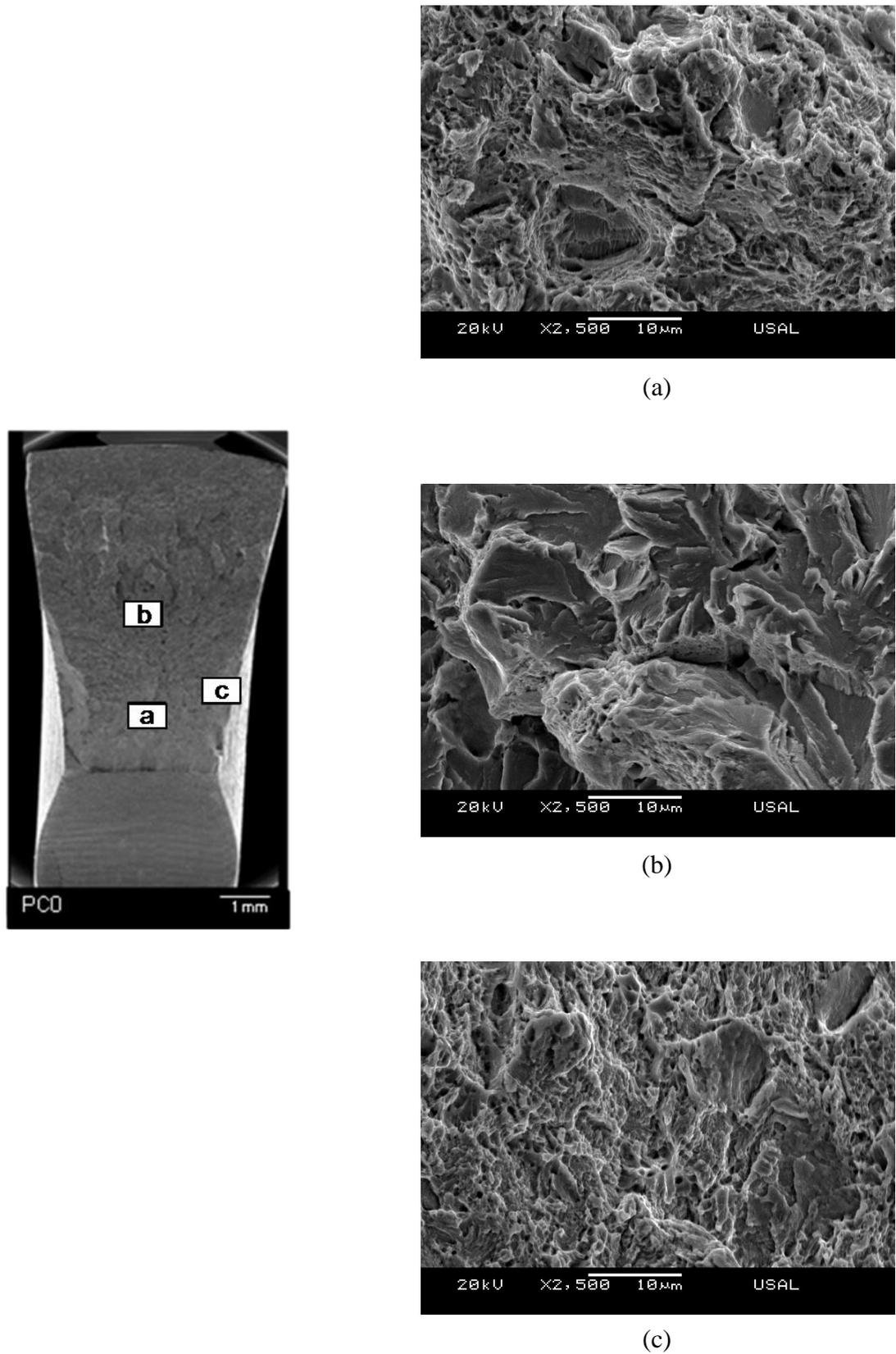


Fig. 3.83. Superficie de fractura de la probeta PC0: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

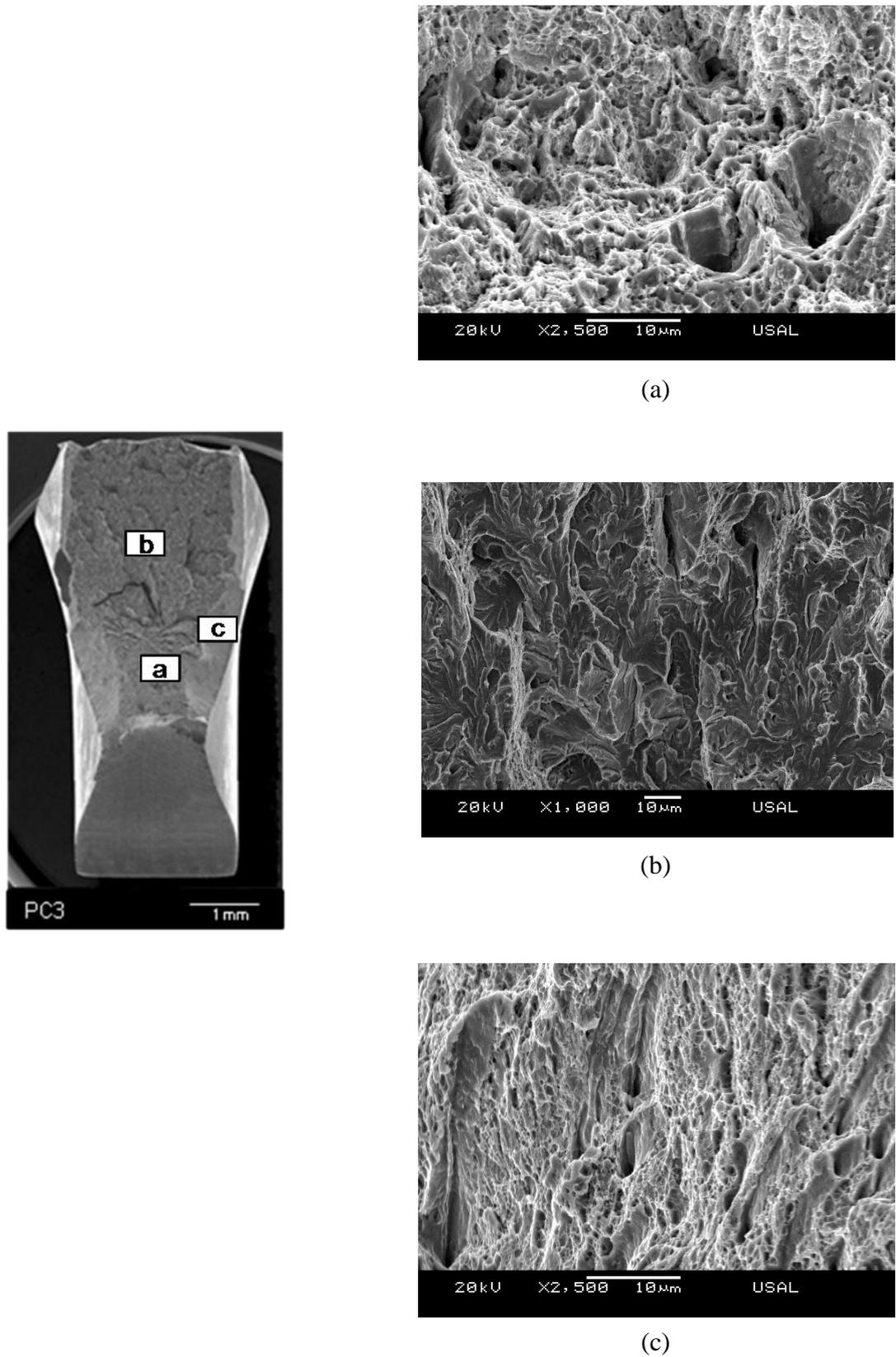


Fig. 3.84. Superficie de fractura de la probeta PC3: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

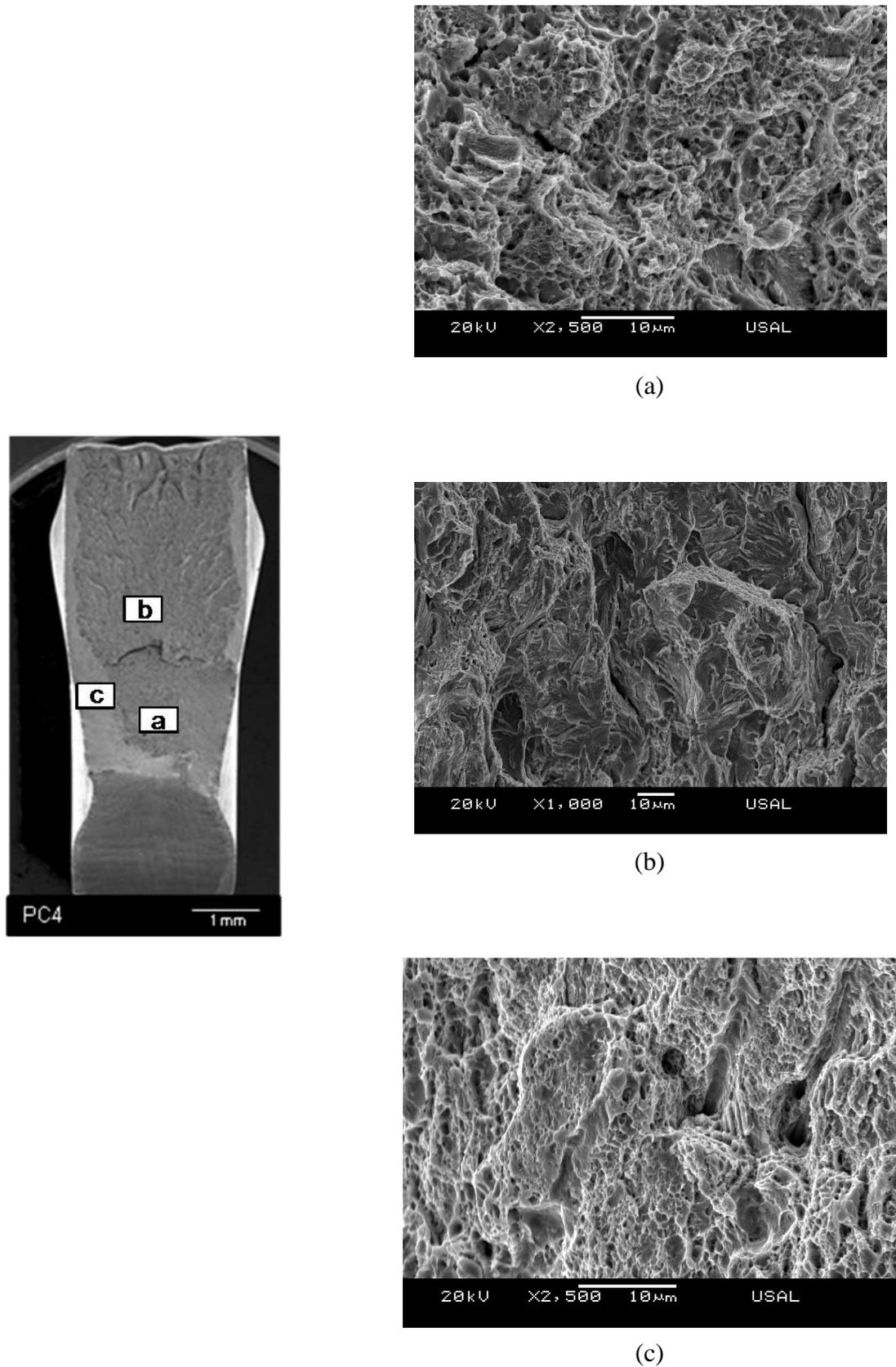


Fig. 3.85. Superficie de fractura de la probeta PC4: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

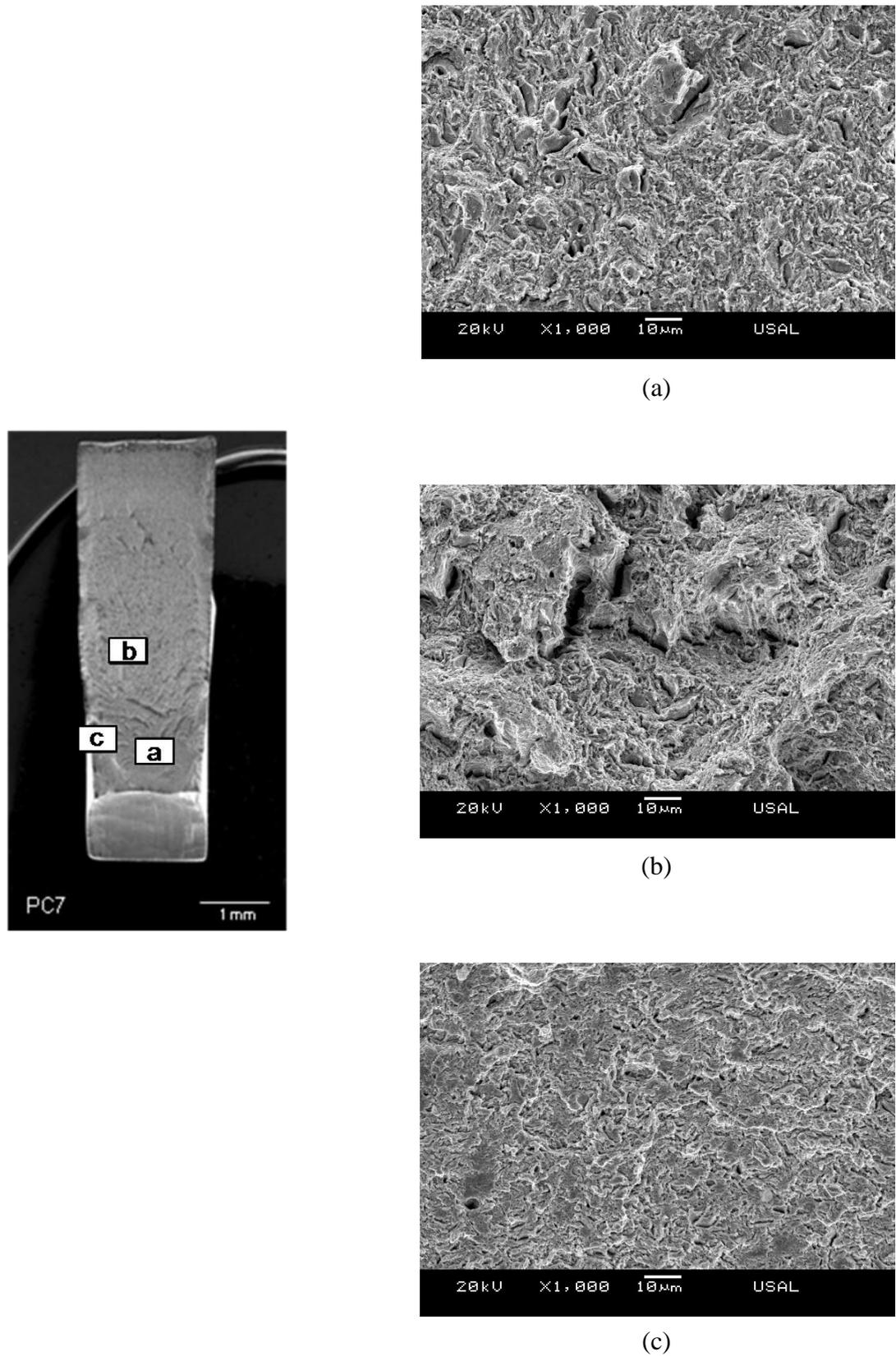


Fig. 3.86. Superficie de fractura de la probeta PC7: (a) zona de proceso de fractura, (b) zona intermedia y (c) corona exterior.

En las superficies de fractura analizadas de las probetas tipo PC se muestra una Z_{INT} formada por clivaje (C) el cual va desapareciendo en favor de la presencia de una superficie de fractura por CMH cuanto mayor es el grado de trefilado al que pertenecen las mismas. A partir del estudio de la presencia de clivajes en la zona intermedia, se puede observar una disminución de la proporción de los mismos con respecto al observado en la superficie de fractura de las PA pertenecientes a alambres con igual grado de trefilado, aunque en las micrográficas dado que son sólo de algunas zonas pueda parecer una tendencia contraria, Fig. 3.87.

Como resumen del análisis en todas las probetas analizadas se pueden diferenciar las siguientes zonas: una CE que está formada por CMH, una ZPF constituida por microhuecos especiales de gran tamaño, CMH*, y la Z_{INT} formada por C y que disminuye con el grado de trefilado en favor de la presencia de CMH. La zona de CE se muestra, en las probetas de tipo PC, entre la entalla y la ZPF de las mismas, pero en ambas entallas, PA y PC, se ha observado una disminución del tamaño de los microhuecos a medida que aumenta el grado de trefilado al igual que sucede con los CMH* que componen la ZPF, como se observa en la Fig. 3.88.

En las superficies de fractura, tanto para las probetas PA como para las probetas PC, la ZPF se encuentra cercana a la entalla, la dirección de los clivajes presentes en la zona intermedia, evidencian el comienzo de la fractura en la zona central de la entalla y la progresión de ésta hacia los bordes de la superficie en forma radial.

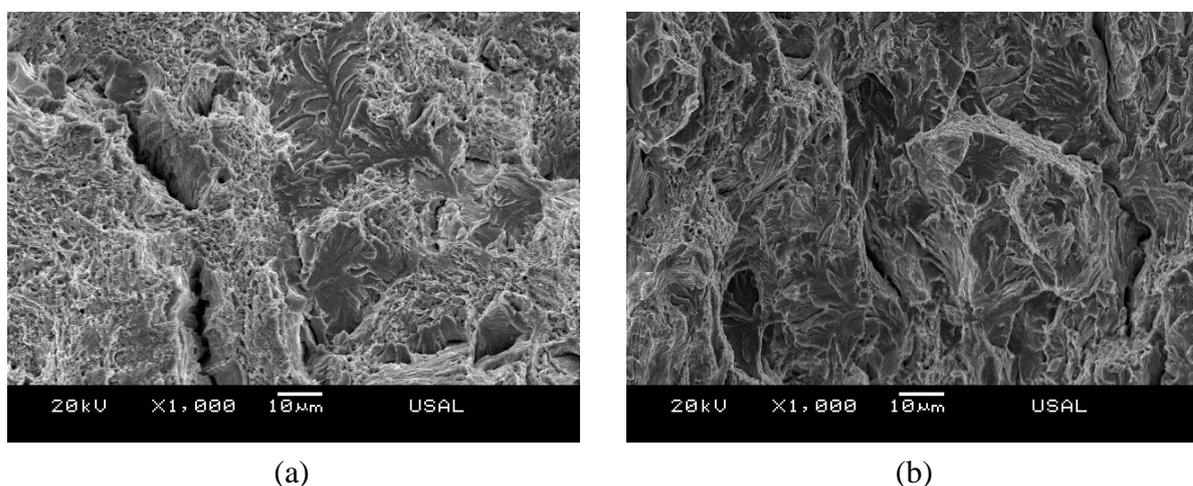


Fig. 3.87. Micrográficas pertenecientes a la Z_{INT} de las probetas: (a) PA4 y (b) PC4.

Para establecer una comparación cuantitativa entre ambos tipos de probetas analizadas, PA y PC, y para cada paso del proceso de trefilado a partir del cual han sido mecanizadas, se han medido las áreas de las diferentes zonas de la superficie de fractura de forma adimensional, teniendo en cuenta para ello la relación A/A_S , siendo A el área de cada zona medida y A_S el área de la superficie de fractura de la probeta. Los resultados de las mediciones de las distintas

zonas de la superficie de fractura de todas las probetas ensayadas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos se recogen en la Fig. 3.89.

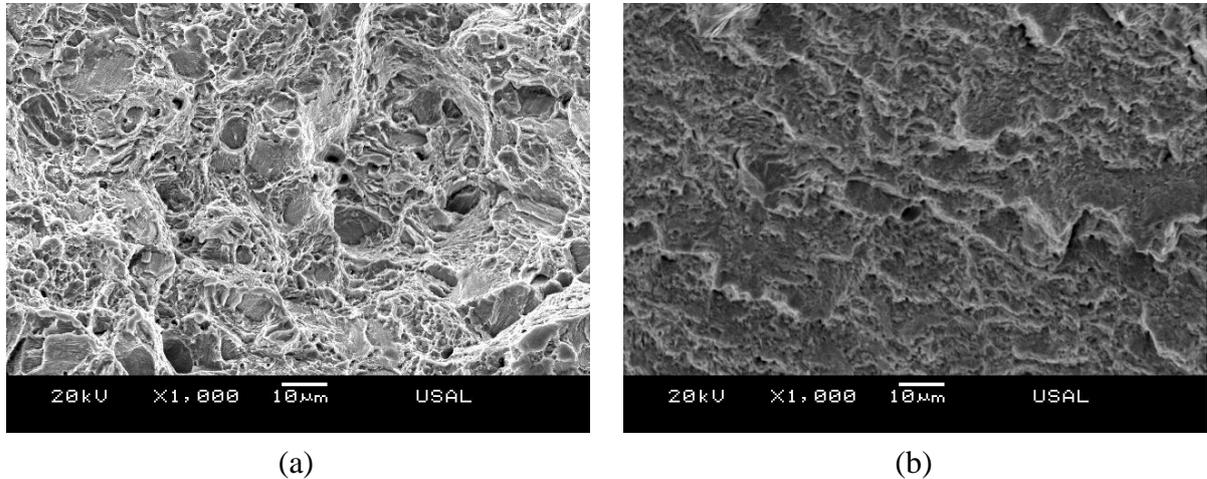


Fig. 3.88. Zona de proceso de fractura formada por CMH*: (a) PA0, (b) PA7.

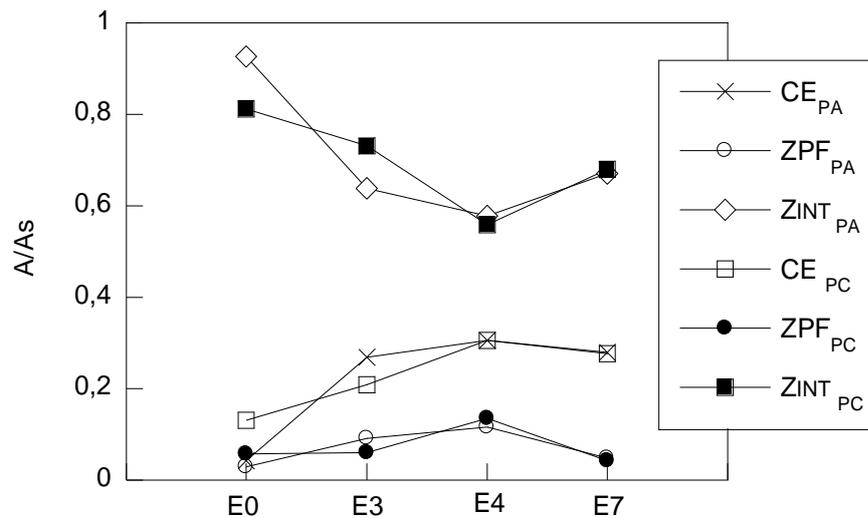


Fig. 3.89. Evolución de A/A_5 de las distintas zonas de las superficies fractográficas, ZPF, Z_{INT} y CE de las probetas PA y PC.

En ambos tipos de entallas se observa un comportamiento análogo en cuanto a la tendencia decreciente de la Z_{INT} y la tendencia creciente del área de la CE a medida que avanza el grado de trefilado. La excepción a ésta tendencia en ambas entallas es el alambre de pretensado lo cual puede deberse al tratamiento termo-mecánico posterior (Stelmor) al cual ha sido sometido. Cabe señalar la pequeña variación, aunque creciente, del área de la ZPF. Las diferentes tendencias encontradas son similares en ambos tipos de probetas entalladas, PA y PC, para cada zona medida y paso de trefilado del alambre de procedencia.

5.1. Fractura anisótropa

Como en el estudio de las probetas anteriormente estudiadas en las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos, también se ha observado la fractura localmente anisótropa, en la cual la superficie de fractura presenta irregularidades en la forma de marcadas crestas y depresiones. En las entallas analizadas se producen fracturas localmente anisótropas en los últimos pasos del proceso de trefilado, como se observa en la Fig. 3.90, siendo este efecto observable en el cuarto y último paso del proceso de trefilado en las probetas de tipo PA. Sin embargo, en las probetas con entalla de tipo C se muestra este comportamiento localmente anisótropo únicamente en el alambre perteneciente al último paso del proceso de trefilado (en el cuarto paso de dicho proceso se produce una deflexión del camino de fractura despreciable).

Para llevar a cabo el estudio de la fractura localmente anisótropa se han realizado micrografías de las distintas zonas que componen el perfil de dichas probetas. En las siguientes Figs. 3.91-3.95, se muestra las fractografías de las diferentes probetas entalladas, así como los micro-mecanismos de fractura que imperan en las distintas zonas del perfil.

En la fractografía del perfil de la probeta prismática entallada PA3, Fig. 3.91, se muestran las micrografías obtenidas en la zona de la corona externa (CE), compuesta por microhuecos elongados, de la ZPF, en la cual se pueden observar microhuecos más abruptos y de mayor tamaño, y la zona intermedia (Z_{INT}), la cual presenta clivajes elongados.

En la siguiente Fig. 3.92 se muestra la fractografía y micrografías correspondientes de la probeta PA4, la cual ya muestra un cierto grado de deflexión del camino de fractura. En ésta se observan clivajes en casi todo el perfil, bastante elongados, aunque también se distingue algún micro-hueco en la zona próxima a la entalla, Fig. 3.92 (a).

En el análisis micrográfico del perfil de la probeta PA7, procedente del alambre de pretensado, se pueden observar microhuecos con crestas y valles, Fig. 3.93 (a), pertenecientes a la zona de proceso de fractura. En las Fig. 3.93 (b) se muestran las micrografías pertenecientes a las Z_{INT} compuesta por clivajes elongados en la dirección longitudinal del alambre. Cabe señalar la inclusión presente entre clivajes en la Fig. 3.93 (c), dicha inclusión es del tipo *duro* y permanece inalterada e incrustada en la superficie de fractura.

Por último se ha podido observar en el perfil la zona de corona exterior superior, anteriormente analizada en planta, compuesta por microhuecos muy elongados y con inclinaciones muy distintas a las encontradas en casos anteriores.

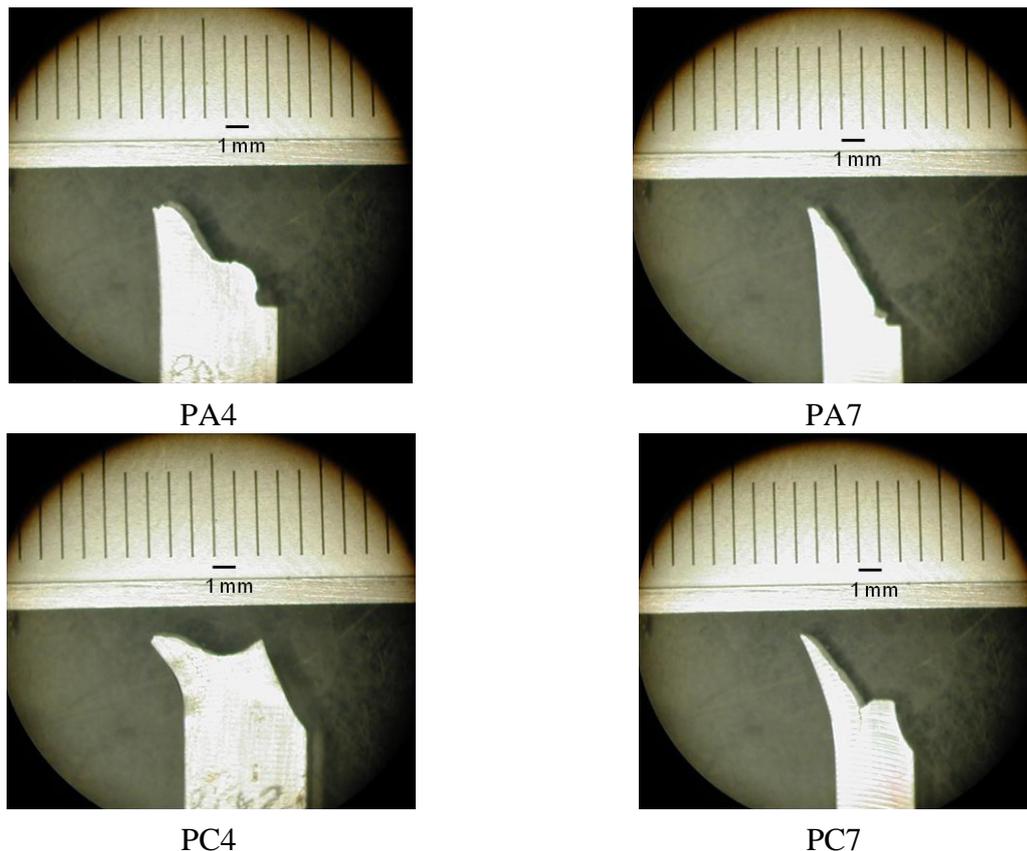


Fig. 3.90. Comportamiento anisótropo en fractura de las probetas entalladas, PA y PC.

La probeta prismática PC4 no presenta una deflexión significativa en el camino de fractura, en ésta se han podido observar clivajes pertenecientes a la Z_{INT} sin mucha elongación, Figs. 3.94 (a) y (b), y microhuecos elongados presentes en la zona de corona exterior, Fig. 3.94(c).

En las probetas de tipo PC, durante el análisis micrográfico de las distintas zonas de la superficie de fractura en planta se había observado una casi imperceptible CE superior en la cual no se habían podido realizar micrografías de los mecanismos de fractura que en ella imperan. Sin embargo en las micrografías de perfil sí se muestran microhuecos elongados similares a los presentes en dicha zona las probetas con entalla de tipo A analizadas.

Dentro del análisis fractográfico del perfil de la probeta PC7, se han observado microhuecos elongados pertenecientes a la ZPF, Fig. 3.95 (a), clivajes con microhuecos situados en la zona inferior de la Z_{INT} , Fig. 3.95 (b), y microhuecos con gran elongación en la zona superior de la superficie de fractura los cuales también corresponden a la zona de corona exterior superior. Cabe señalar también la mayor elongación que presentan los micro-mecanismos de fractura con el aumento del grado de trefilado del alambre de procedencia. Dicha orientación es más acusada en las probetas mecanizadas a partir de los alambres pertenecientes al último paso del proceso de trefilado (Fig. 3.96).

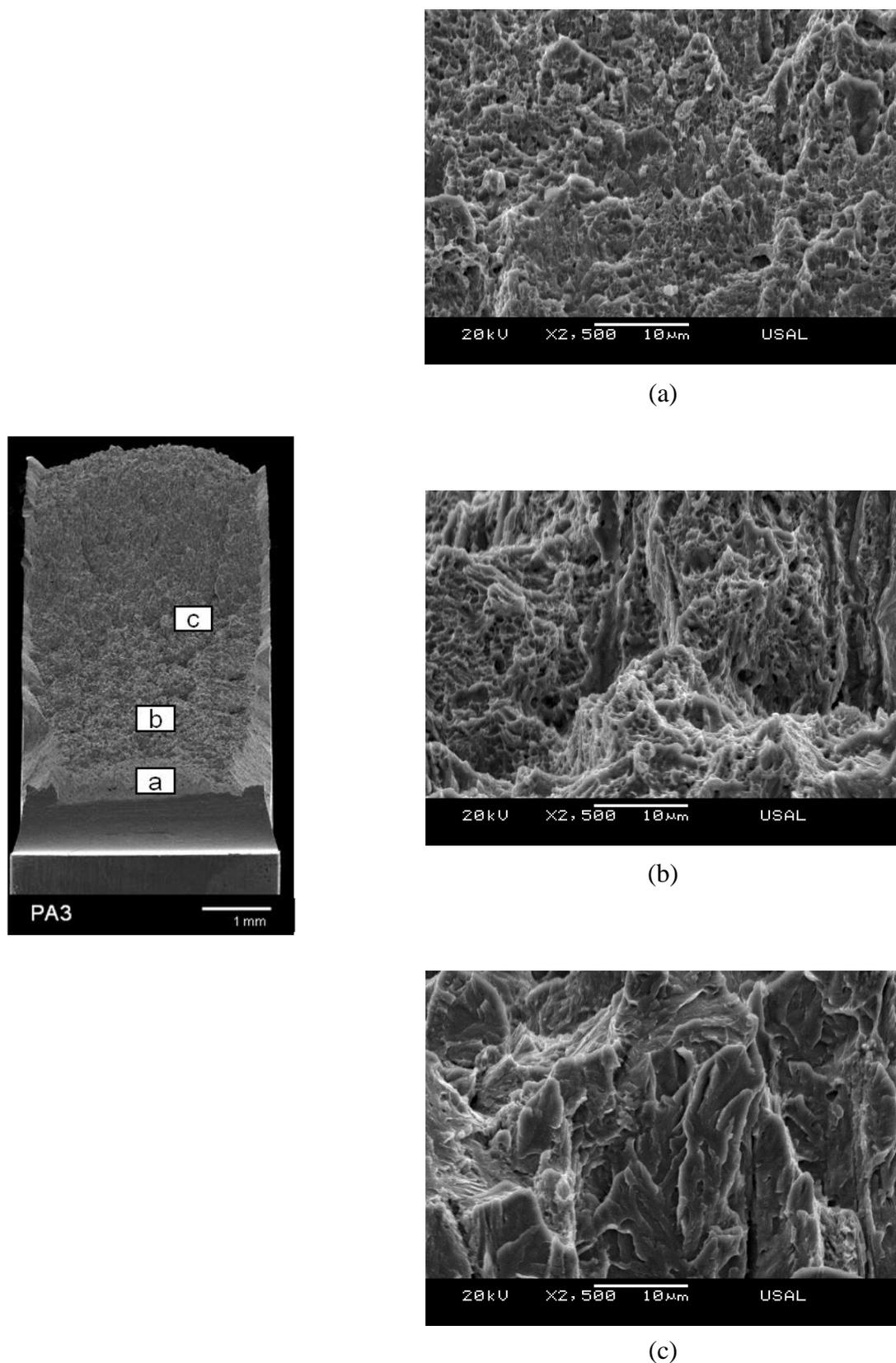


Fig. 3.91. Fractografía de perfil de la probeta PA3. (a) CE, (b) ZPF y (c) Z_{INT}.

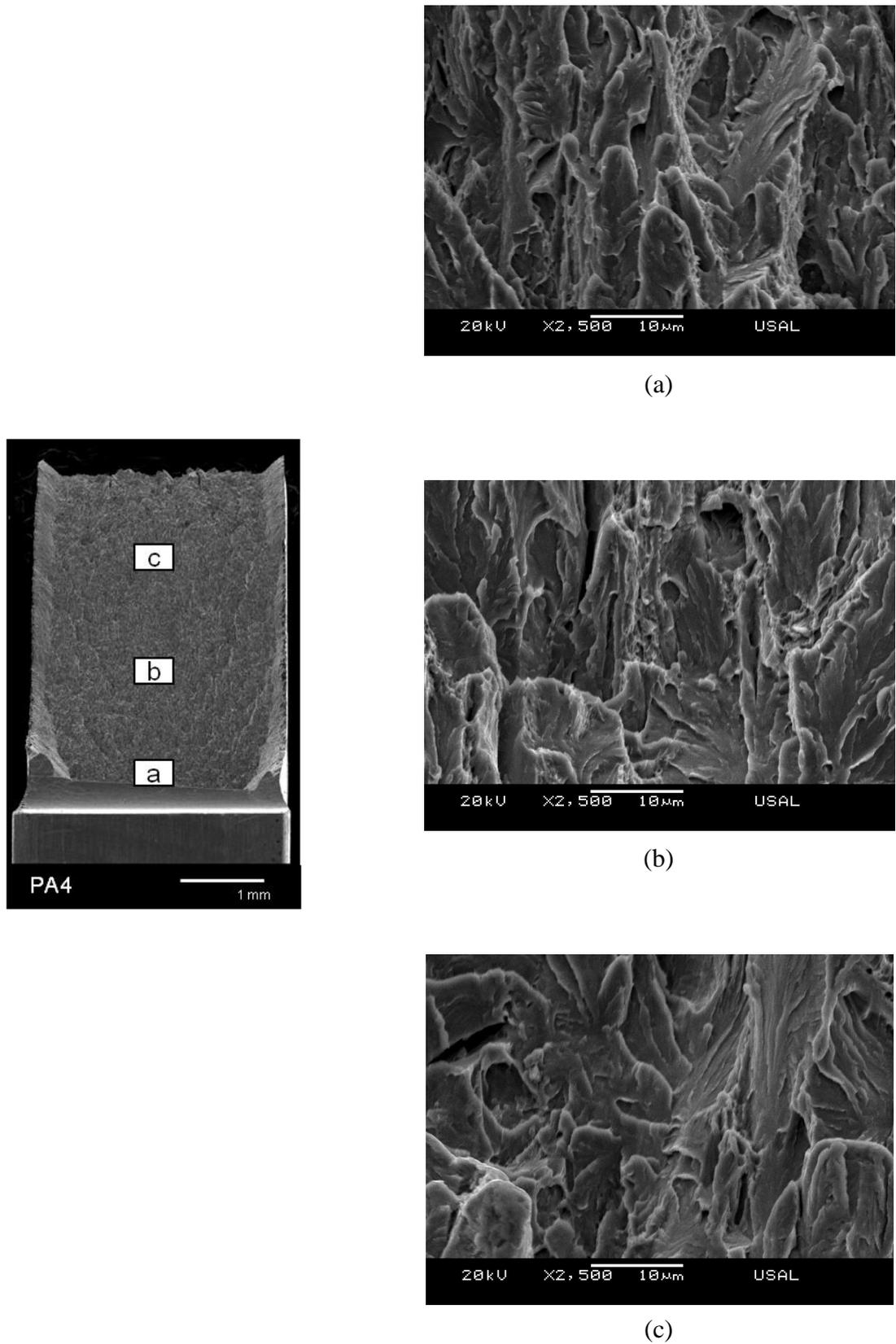
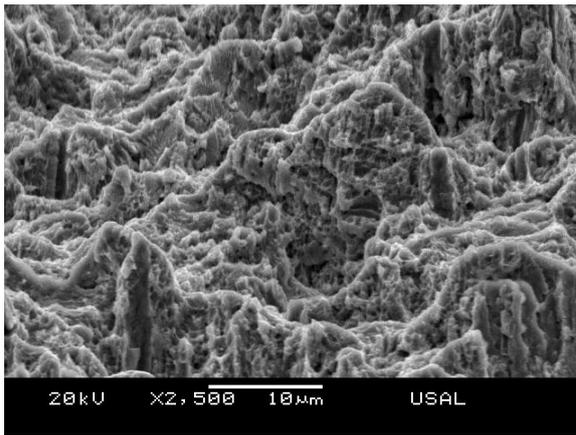
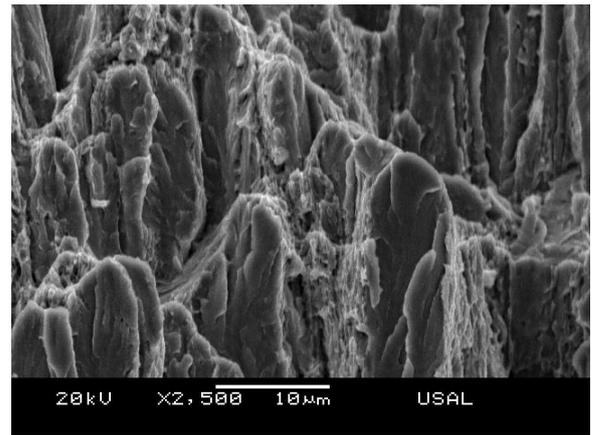


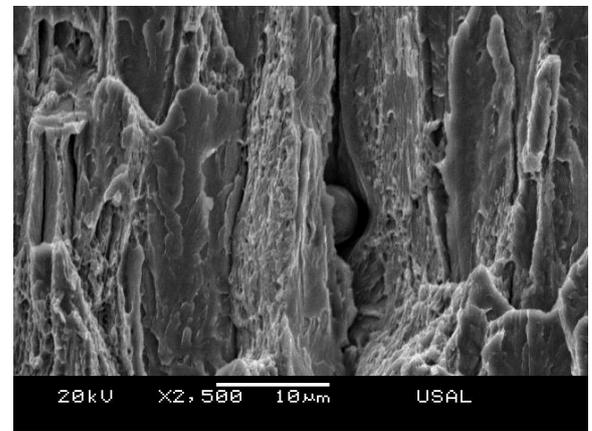
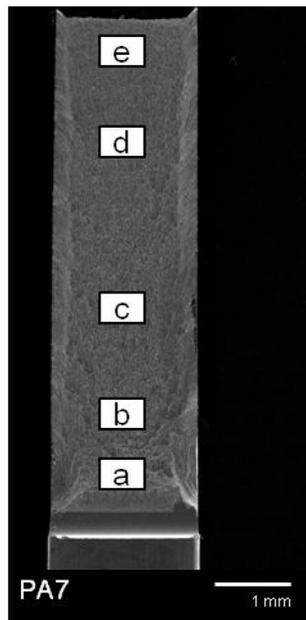
Fig. 3.92. Fractografía de perfil de la probeta PA4 en las cuales se muestran los clivajes presentes en la Z_{INT} .



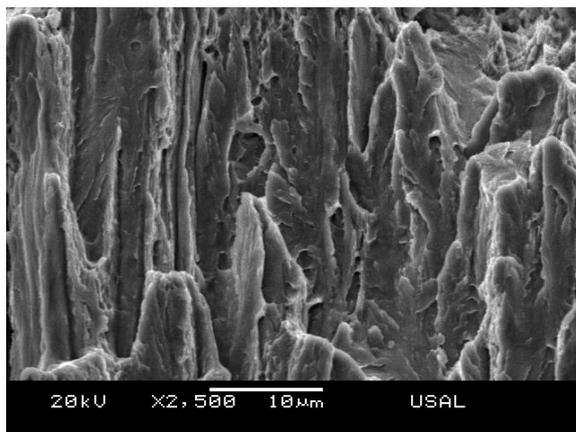
(a)



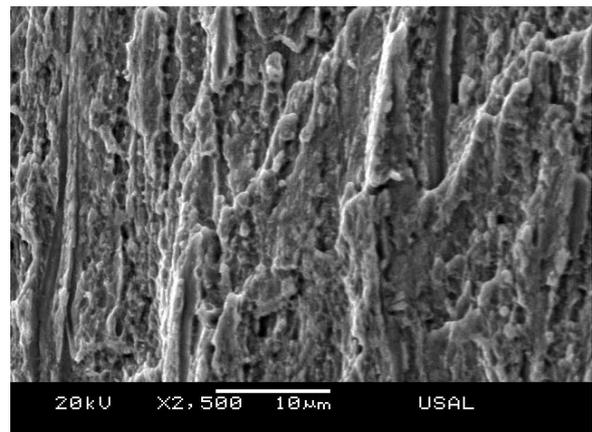
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3.93. Fractografía de perfil de la probeta PA7; (a) microhuecos en la ZPF, (b), (c) y (d) clivajes en la ZINT y (e) microhuecos en la CE.

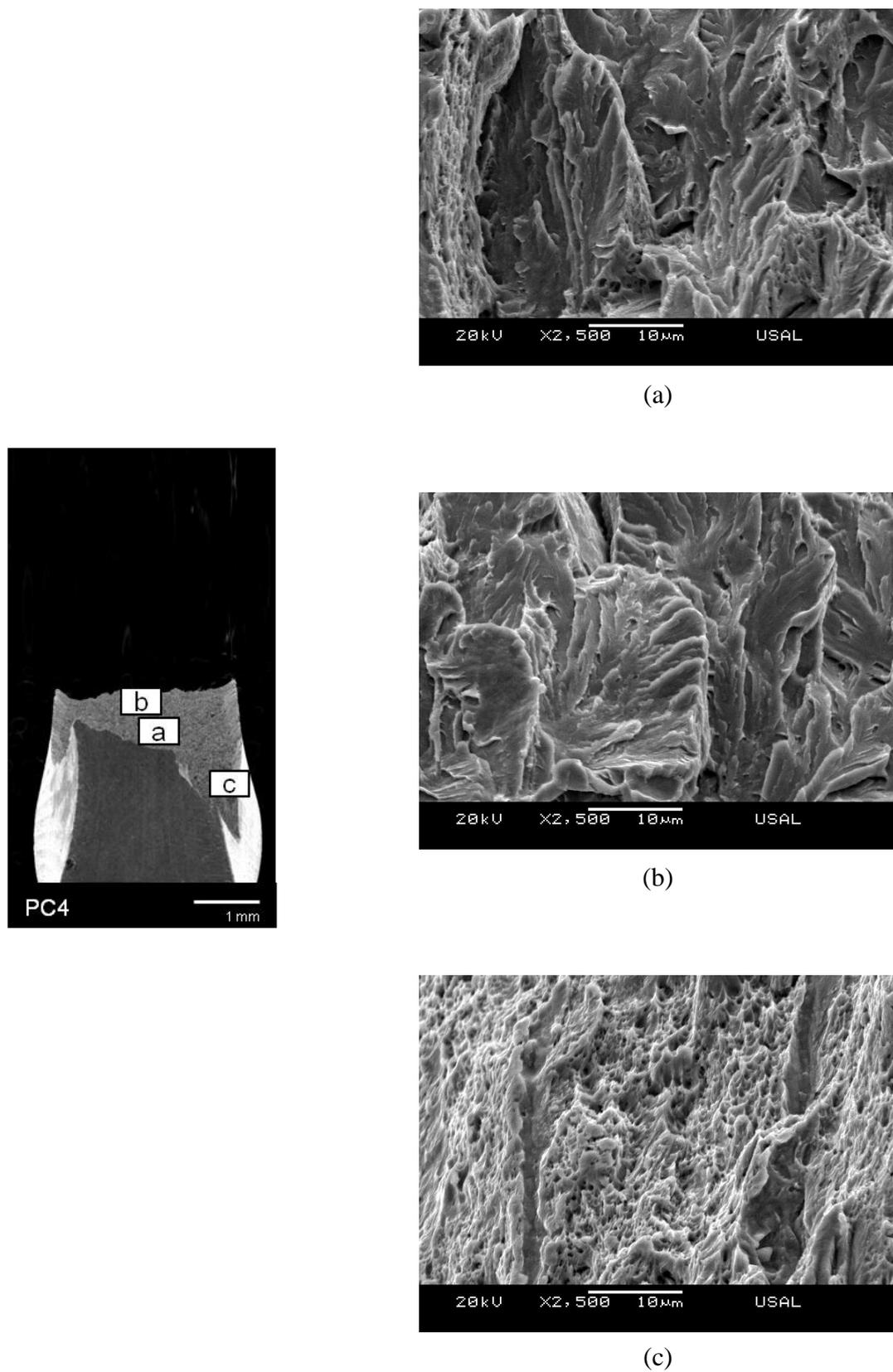


Fig. 3.94. Fractografía de perfil de la probeta PC4; (a) y (b) clivajes en la Z_{INT} y (c) microhuecos presentes en la CE.

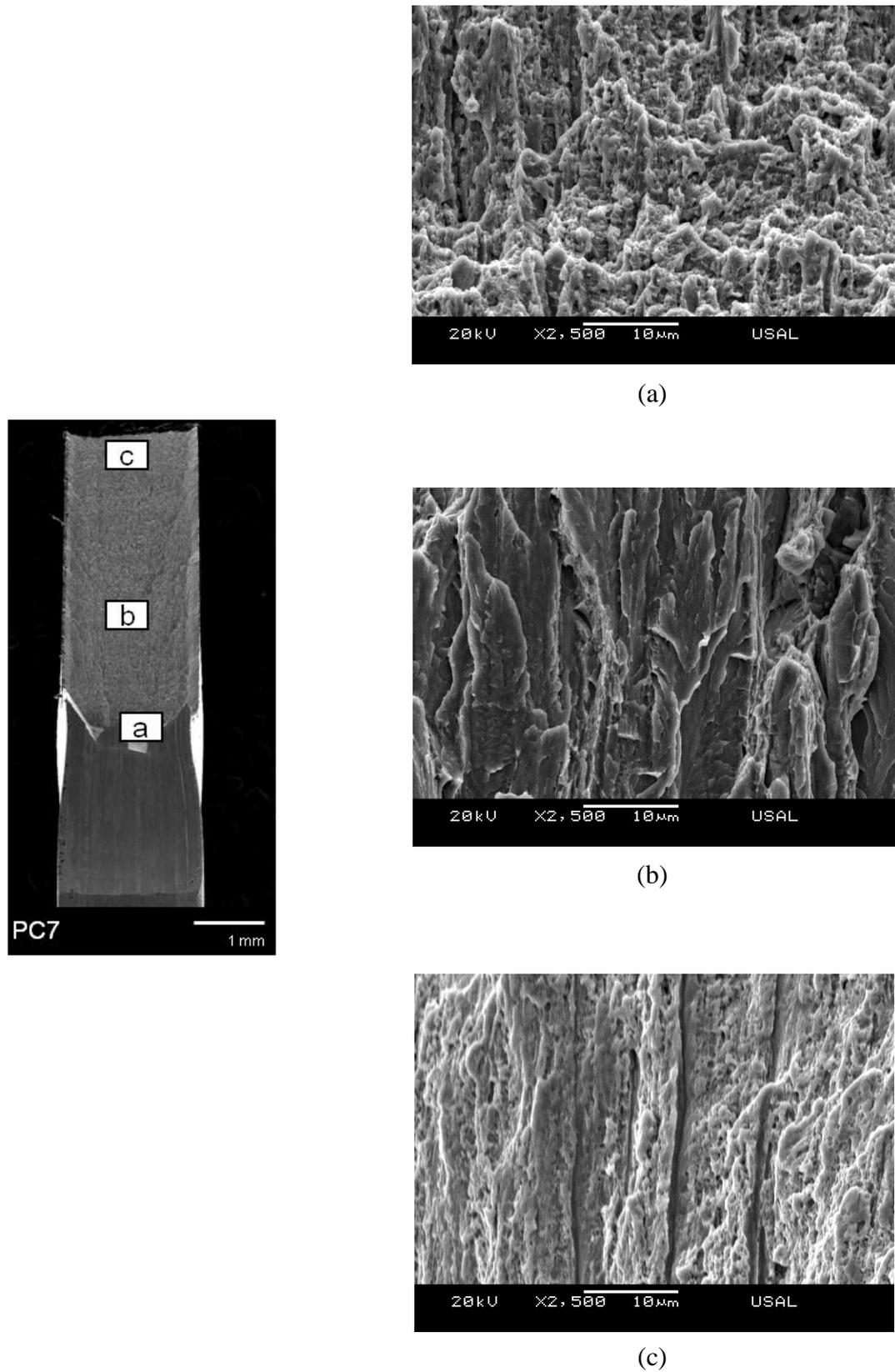


Fig. 3.95. Fractografía de perfil de la probeta PC7. (a) Micro-huecos presentes en la ZPF, (b) clivajes en la Z_{INT} y (c) micro-huecos en la CE.

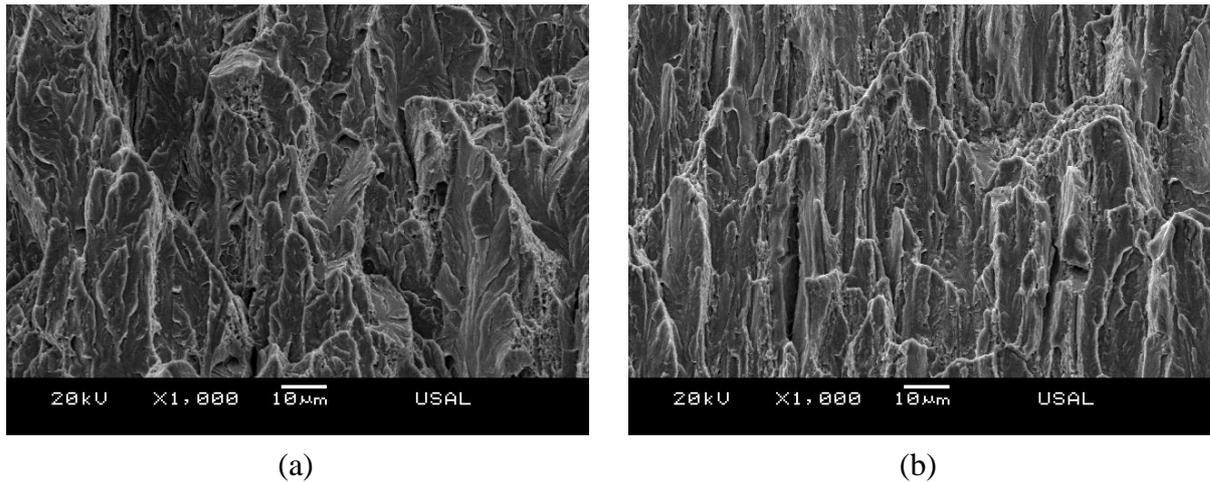


Fig. 3.96. Clivajes en las superficies de fractura de las paredes verticales de las probetas (a) PA4 y (b) PA7.

Para la realización del estudio de la deflexión del camino de fractura, de forma cuantitativa, se ha realizado primero la medida del ligamento resistente, b , seguida de la de la altura máxima, h , siendo ésta la vertical desde el centro de entalla hasta el punto más alto de la superficie de fractura (Fig. 3.97). De esta forma se obtiene el parámetro adimensional b/h , Tabla 3.3.

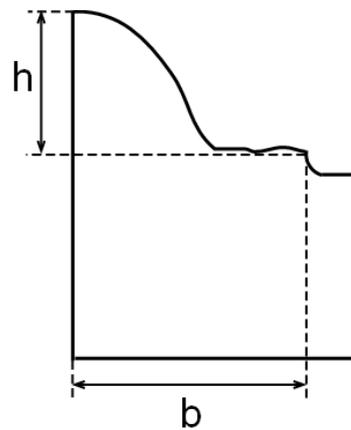


Fig. 3.97. Esquema de la medida de la deflexión del camino de fractura.

Tabla 3.3. Medidas de la deflexión del camino de fractura.

Probeta	PA3	PA4	PA7	PC3	PC4	PC7
h/b	0.67	0.77	2.25	0.20	0.36	1.38

Con el análisis cuantitativo de la deflexión del camino de fractura se puede concluir que las entallas que producen un mayor comportamiento anisótropo en fractura son las probetas PA, las cuales tienen un radio muy pequeño de curvatura. Las probetas con este tipo de entalla pertenecientes a los alambres del tercer y cuarto paso de trefilado (probetas PA3 y PA4)

poseen mayor fractura anisótropa, aproximadamente el doble, que las procedentes del alambre del cuarto paso de trefilado con entalla de tipo C (probeta PC4), Fig. 3.91-3.92 y 3.94.

En las probetas con entallas de tipo C, gran radio de curvatura, correspondientes al alambre del cuarto paso del proceso de trefilado (probeta PC4) se ha obtenido un comportamiento anisótropo en fractura mínimo, sin embargo en las probetas con este tipo de entalla mecanizadas a partir del alambre de pretensado final (probeta PC7) dicho comportamiento anisótropo en fractura es aproximadamente la mitad del mostrado en las probetas PA7, Figs. 3.93 y 3.96. La entalla tipo A (pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad) potencia el comportamiento anisótropo en fractura del material ensayado.

5.2. Análisis micrográfico de probetas de ensayos interrumpidos

Una vez realizados los ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos de las probetas prismáticas entalladas y analizadas las superficies de fractura de las mismas, así como su comportamiento localmente anisótropo, se han realizado más ensayos con el resto de las probetas mecanizadas bajo este tipo de sollicitación sin llegar a la fractura por separación total de superficies con el objetivo de analizar el micro-daño previo a fractura que se produce al nivel micro-estructura del material.

Para poder realizar los ensayos bajo sollicitación de flexión de las distintas probetas prismáticas entalladas sin llegar a la rotura e intentar que presenten el mayor daño posible previo se han establecido criterios de parada de ensayo, en el caso de las probetas PA basados en las cargas máximas alcanzadas en los ensayos previos y en el caso de las probetas PC el criterio se ha basado en el descenso de carga que éstas experimentan antes de la fractura final.

Una vez obtenidas las probetas prismáticas entalladas de los ensayos interrumpidos se ha procedido a realizar cortes transversales al eje longitudinal del alambre, obteniéndose muestras de aproximadamente 1 cm de altura que contienen en su sección media la entalla objeto de estudio. Las muestras obtenidas han sido embutidas, en resina de tipo fenólica, y posteriormente han sido sometidas a sucesivos pulidos de 0,1-0,2 mm de desbaste. Una vez pulidas se han atacado convenientemente con una solución de Nital al 3% para poder ser analizadas en el MEB. Los sucesivos pulidos, ataques y análisis microscópicos se han realizado hasta alcanzar la sección media de la probeta. A continuación se muestran los micro-defectos característicos obtenidos en el análisis microscópico de los sucesivos pulidos.

Uno de los micro-defectos encontrados y analizado en el capítulo de introducción de la presente Tesis son las pseudocolonias y las curvaturas y roturas de sus láminas así como su posterior efecto de unión, denominado de cremallera (Fig. 3.98).

En las micrografías analizadas cercanas a las entallas de las distintas probetas, PA y PC, se han podido observar multitud de pseudocolonias curvadas y fragmentadas, sin embargo un hecho a señalar es las mayores curvaturas y fracturas que éstas muestran en comparación con las observadas previamente en el estudio micrográfico de los alambres de procedencia, los cuales no habían sido mecanizados ni ensayados (Capítulo 2), al igual que sucedía en las probetas axisimétricas y prismáticas ensayadas bajo sollicitación de tracción.

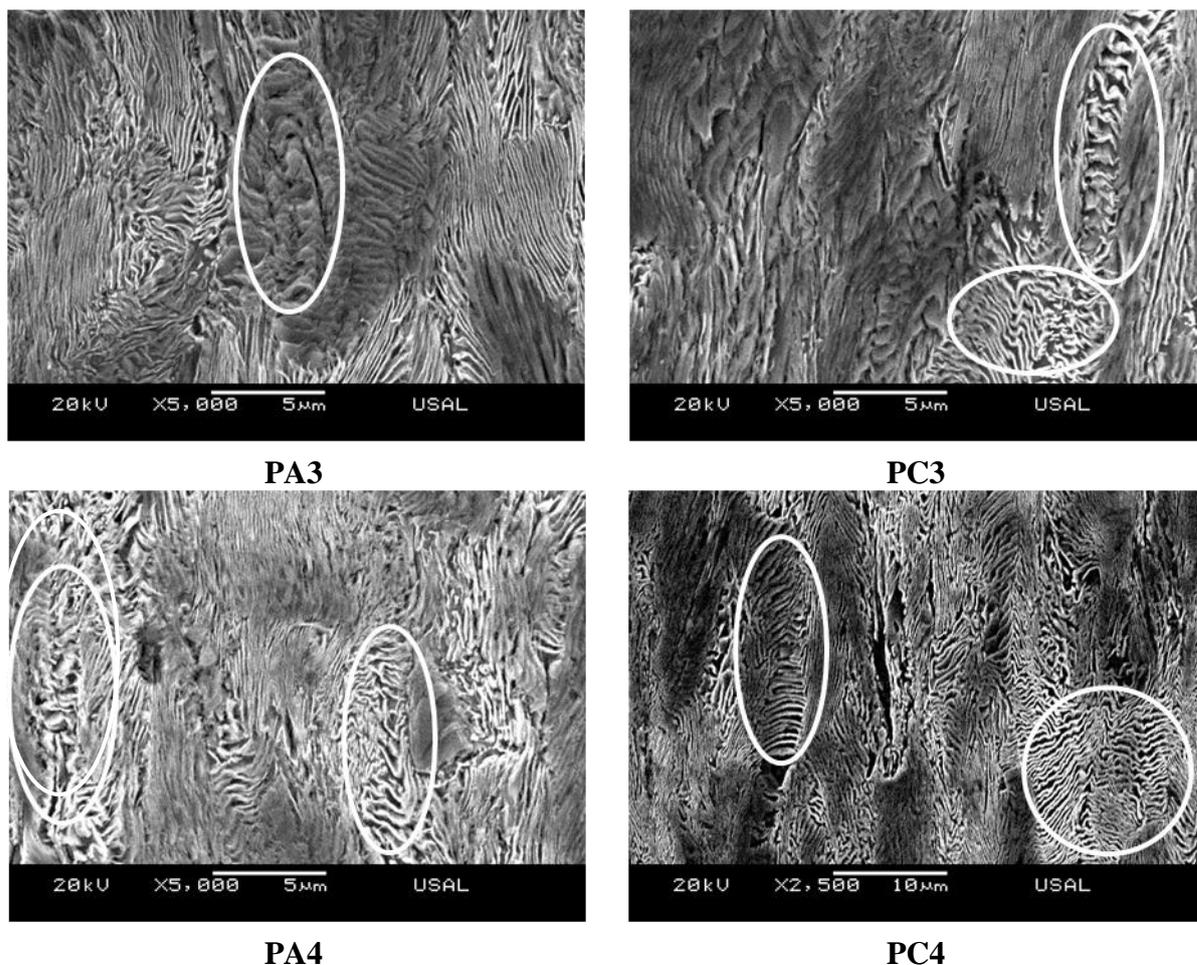


Fig. 3.98. Micrografías con micro-daños en las pseudocolonias.

Los micro-daños en las curvaturas y fracturas de las pseudocolonias son más fácilmente observables en las probetas procedentes del tercer y cuarto paso del proceso de trefilado, debido al gran constreñimiento que éstas experimentan en el alambre de pretensado final.

Otro de los micro-defectos presentes en los dos tipos de probetas prismáticas entalladas ensayadas bajo sollicitación de flexión es la rotura de las láminas por curvatura de las mismas, Fig. 3.99. La reorganización microestructural producida durante el trefilado, así como la deformación y constreñimiento producidos durante los ensayos mecánicos los cuales potencian dicha reorganización, hacen que las láminas de las colonias se curven con el fin de

adaptarse. Cuando la rotura de las láminas se produce, y prosigue el constreñimiento, se pueden llegar a crear dos tipos de colonias de una misma, una orientada próxima hacia la dirección longitudinal del alambre y otra que puede llegar a convertirse en una pseudocolonia, con láminas cuasi-perpendiculares a esta dirección, Fig. 3.100.

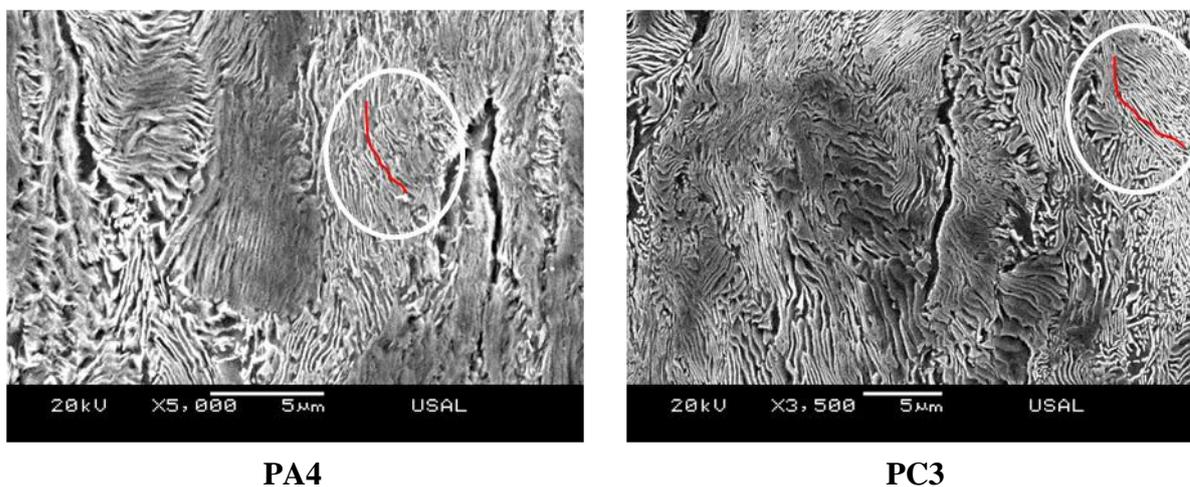


Fig. 3.99. Rotura de láminas por curvatura en colonias de perlita.

Los micro-daños por descolonizaciones (Fig. 3.100) se producen por separación gradual entre colonias, comienzan con microhuecos y evolucionan a desgarros inter-coloniales, como se ha podido ver en el análisis de micro-defecto de éste mismo capítulo. Estas micro-descolonizaciones, al igual que sucedía con las roturas por curvaturas en colonias y pseudocolonias, son fácilmente observables en los alambres de los primeros pasos del proceso de trefilado, tercer y cuarto paso, aunque se presenta en todas las probetas analizadas.

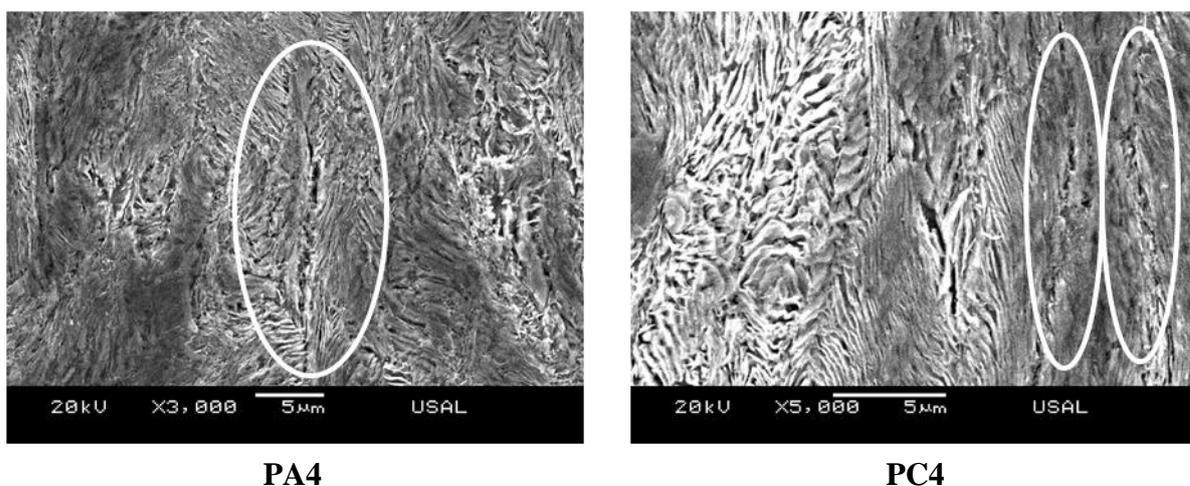


Fig. 3.100. Micro-daño por micro-descolonizaciones.

Los micro-defectos observados en las micrografías presentes dentro de las colonias orientadas más observados son los denominados desgarros intracoloniales, los cuales en su conjunto forman dan lugar a desgarros intercoloniales. De forma minoritaria también se han analizado piel y garras de leopardo, precursores o no de los mismos, Fig. 3.101.

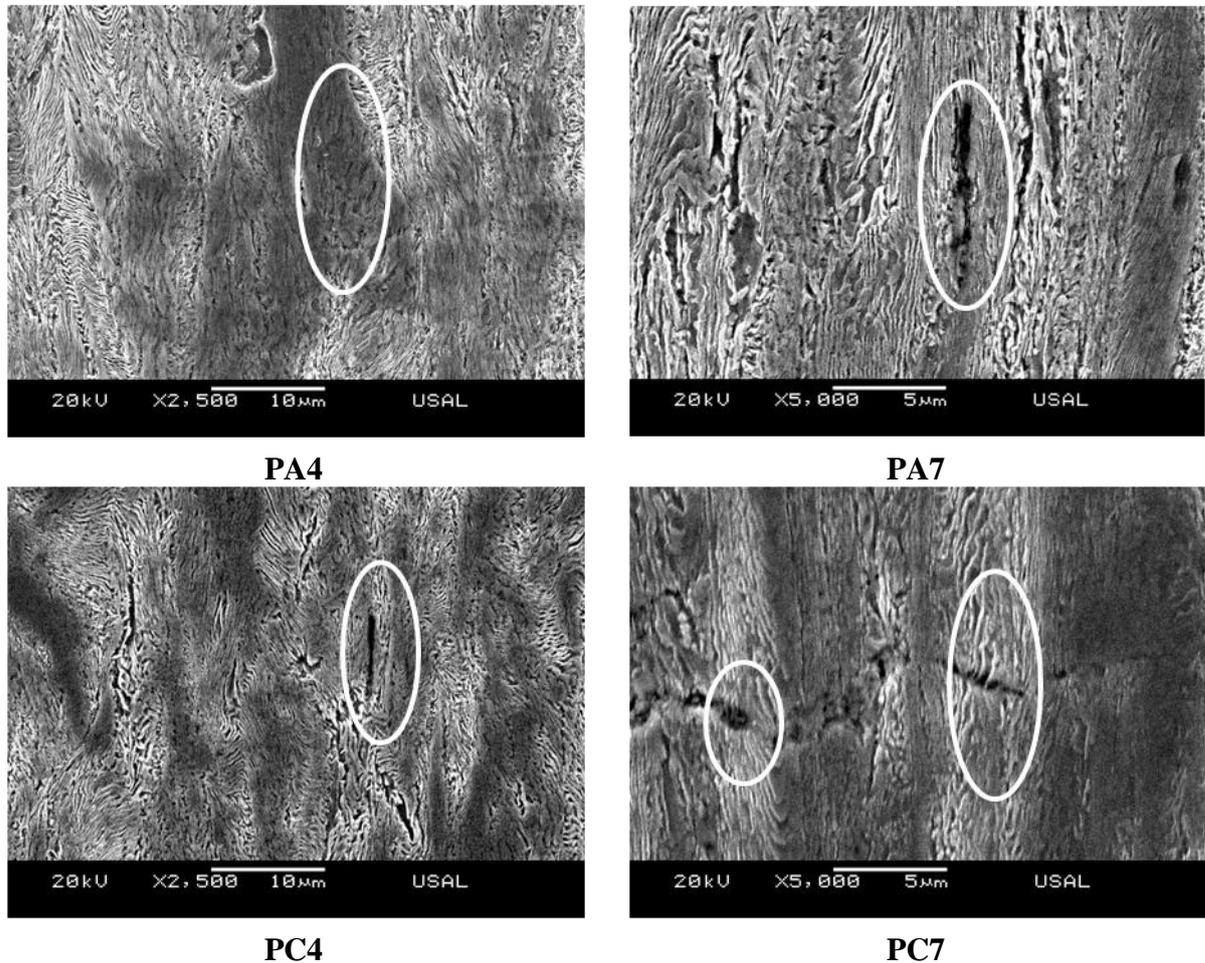


Fig. 3.101. Garras de leopardo (PA4) y desgarros intercoloniales.

En la Fig. 3.101 se muestra una de las micrografías perteneciente a la probeta PA4 en la cual se observan garras de leopardo muy deformadas en una colonia con láminas orientadas. En las micrografías de las probetas PA7 y PA4 se pueden ver desgarros intracoloniales verticales en colonias con láminas orientadas, con respecto al eje longitudinal. Los desgarros intracoloniales también pueden atravesar colonias con láminas orientadas horizontalmente, micrografía de la probeta PA7.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores uno de los micro-defectos en el cual se ha centrado la mayor atención dentro del análisis micrográfico es el producido por las inclusiones, Figs. 3.102-3.103.

Los micro-defectos producidos por las inclusiones de tipo mezcla, las cuales están formadas por la combinación de una o dos inclusiones de tipo duro y otra blanda normalmente situada alrededor de éstas, se han podido encontrar en las proximidades de la entalla de todas las probetas analizadas.

El micro-daño generado por las inclusiones de tipo mezcla se debe principalmente a la deformación y la fractura de la inclusión de tipo blanda, aunque también se produce de micro-daño bastante relevante debido a la discontinuidad de material generada en los bordes superior e inferior de las inclusiones de tipo duro, bordes los cuales se acentúan durante los ensayos pero que fundamentalmente parecen producirse durante el proceso de trefilado.

Las deformaciones producidas por los ensayos de flexión se ven reflejadas en las distintas orientaciones y morfologías de algunas de este tipo de inclusiones, claro ejemplo es la morfología en forma ondulada que se observa en la micrografía de la Fig. 3.102 de la PC3.

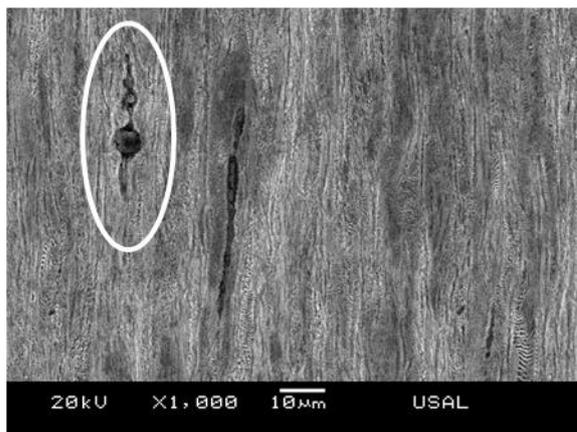
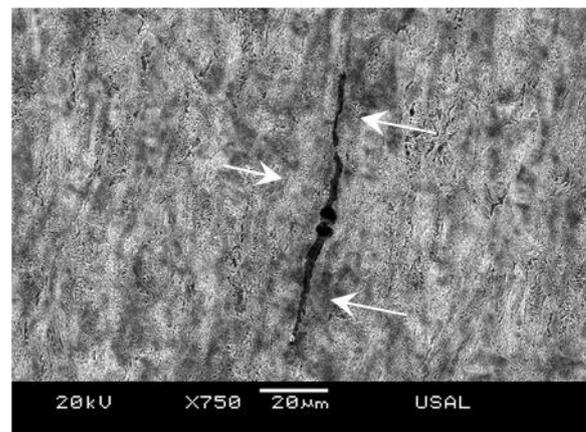
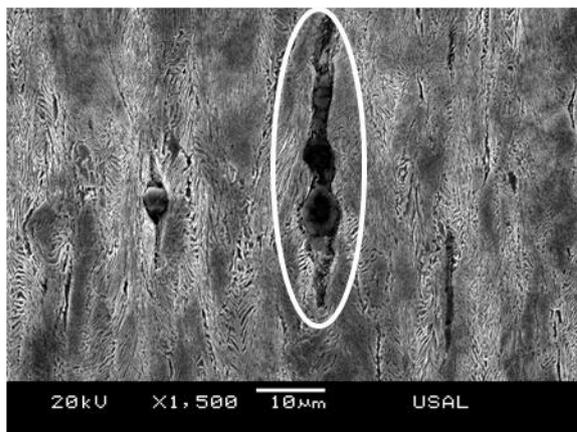
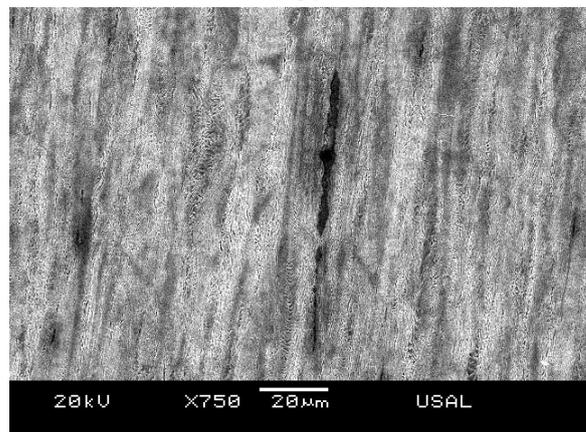
**PA7****PC3****PC4****PC7**

Fig. 3.102 Microdefectos producidos por inclusiones de tipo mezcla.

Las inclusiones de tipo blando (Fig. 3.103) bien compuestas por sulfuros de manganeso o nitruros, presentan grandes deformaciones en la dirección del eje longitudinal de la probeta, sin embargo la importancia de estos microdefectos radica en la morfología de los mismos, la cual en probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción estaba completamente orientada en la dirección longitudinal del alambre y en las probetas sometidas a ensayos de flexión se encuentra, como las inclusiones de tipo mezcla, con morfologías onduladas. Las morfologías onduladas más acentuadas se han encontrado en las zonas próximas a la entalla.

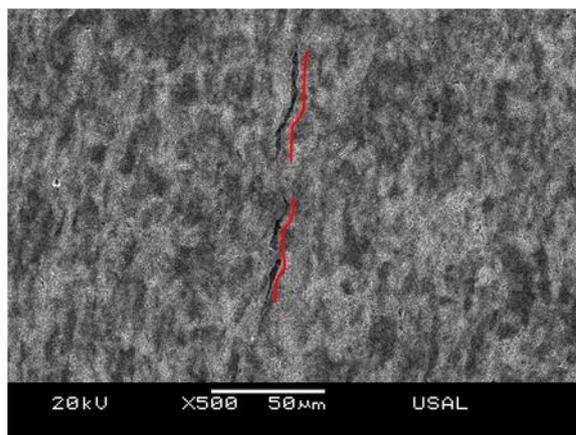
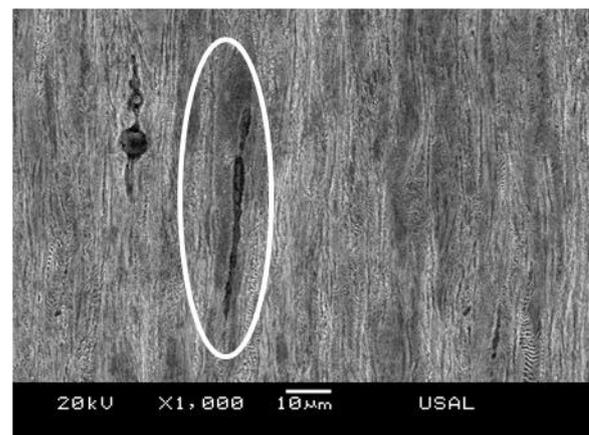
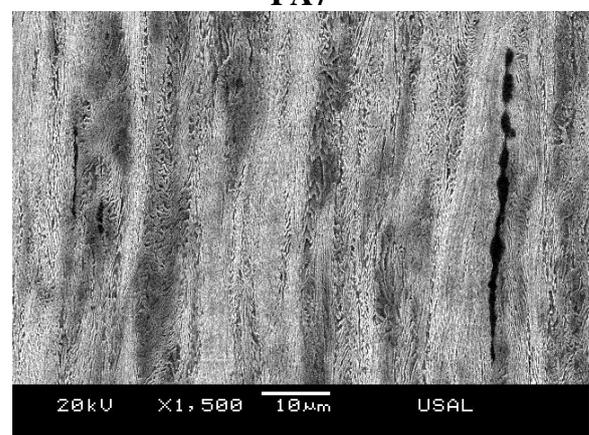
**PA3****PA7****PC4****PC7**

Fig. 3.103. Microdefectos producidos por inclusiones de tipo blando.

Dentro de las inclusiones de tipo duro analizadas en todos los casos de estudio se ha podido observar el microdefecto generado por las mismas en forma de microhuevo. Éste está situado en las zonas superior e inferior de las inclusiones, con respecto al eje longitudinal del alambre, Fig. 3.104. Algunas de las inclusiones de tipo duro analizadas presentan una descohesión de la matriz perlítica circundante en los laterales de las mismas, mucho menor que la anteriormente comentada. Cabe señalar el cambio morfológico de estos microdefectos, el cual se produce por el pandeo de la inclusión debido a los esfuerzos que experimenta durante el

ensayo. Dicho cambio observado es insignificante en comparación con el experimentado por las inclusiones de tipo mezcla y duras analizadas anteriormente.

Otro de los micro-defectos analizado en las probetas de los ensayos interrumpidos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos ha sido los desgarros intercoloniales, Fig. 3.105, los cuales se han observado al igual que el resto de los microdefectos en todas las probetas objeto de estudio. No obstante la mejor muestra de éstos se ha encontrado en las micrografías obtenidas en la cercanía de las entallas de las probetas procedentes de los alambres del tercer y cuarto paso de ambas probetas entalladas, PA y PC.

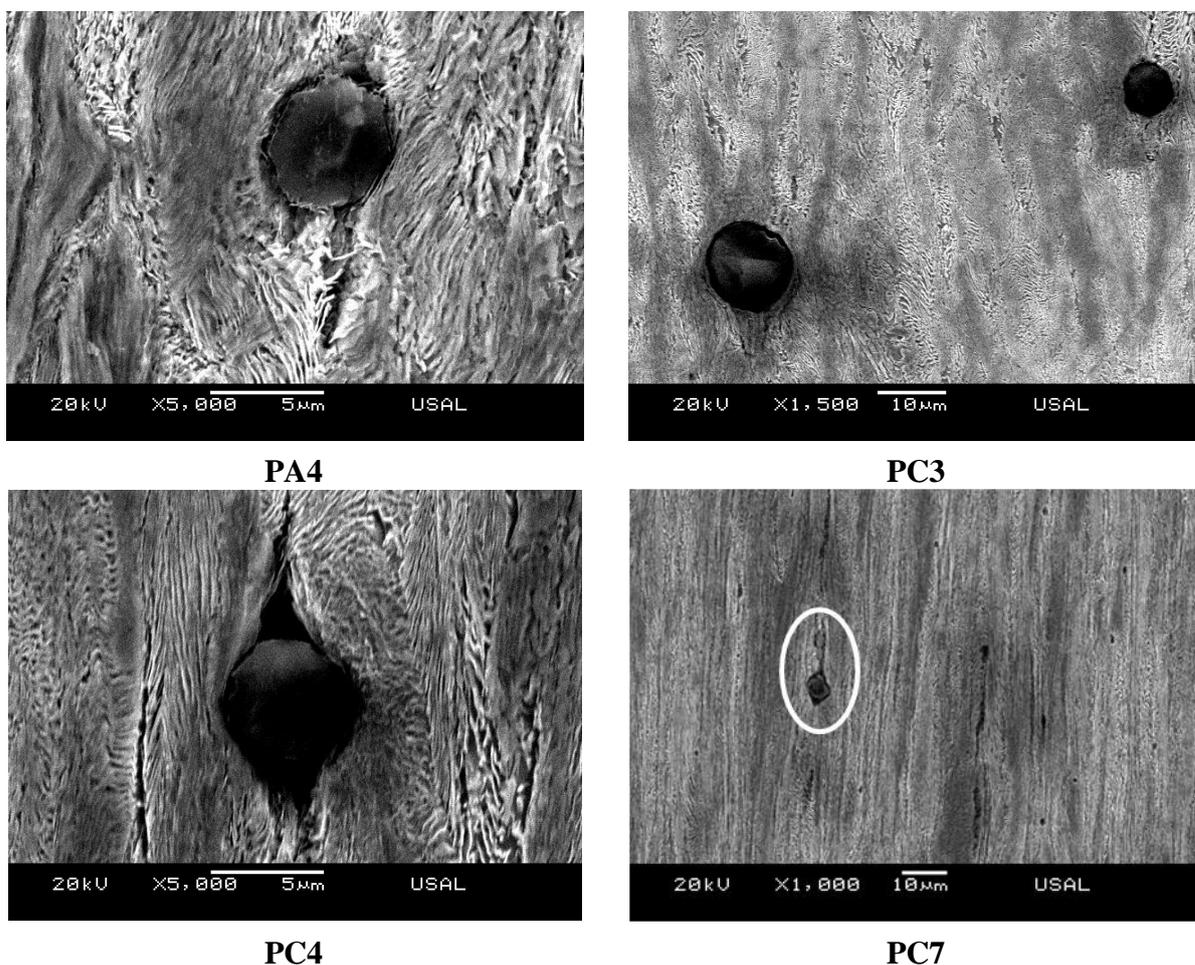


Fig. 3.104. Microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro.

Dentro de éste estudio micrográfico, de las probetas de los ensayos interrumpidos bajo sollicitación de flexión, se ha observado la inclinación de la microestructura en las zonas cercanas a la entalla. Dicha inclinación es más pronunciada en las probetas con entalla de tipo C y parece estar relacionada con la flecha máxima que se ha alcanzado en los ensayos correspondientes. En las probetas con entalla de tipo A la zona afectada por dicha inclinación microestructural es mucho menor que la analizada en las probetas con entalla de tipo C.

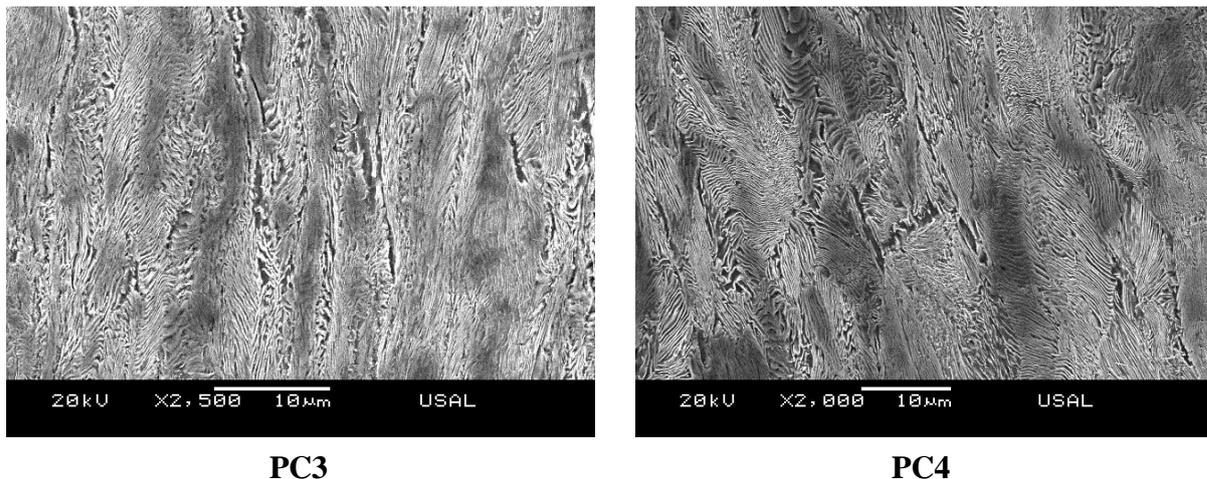


Fig. 3.105. Desgarros intercoloniales.

Las inclinaciones, de las láminas de cementita de las colonias, analizadas muestran orientaciones diferentes dependiendo del lado de la entalla analizada, siendo estas simétricas a ambos lados de la misma. En la Fig. 3.106 se observan las micrografías de ambas zonas pertenecientes a los laterales de la entalla en las probetas PC4 y PC7, en ésta figura también se muestra una micrografía de un lateral de la entalla de la probeta PA7 y se adjunta un esquema de las probetas que detalla las zonas dónde se han realizado.

En las probetas con entallas de tipo A la zona en la cual se han observado dichas inclinaciones se encuentran restringidas a las proximidades de la entalla. Las inclinaciones observadas son debidas a las tensiones de tracción que se producen en la parte inferior de la probeta durante el ensayo de flexión por cuatro puntos.

Algunas de las inclusiones analizadas en este tipo de probetas han presentando morfologías onduladas, éstas se encontraban en las proximidades del fondo de entalla, con lo que dicha morfología puede ser debida a la concentración de tensiones que se producen en las inmediaciones de ésta.

Los microdefectos generados por las inclusiones, tanto de tipo duro como de tipo blando, parecen adaptarse a esta inclinación microestructural, como se ha comentado anteriormente, a veces exhibiendo morfologías onduladas y otras simplemente inclinándose junto con la matriz perlítica. En la siguiente Fig. 3.107 se observan distintas micrografías en las cuales la matriz perlítica y las inclusiones conjuntamente se inclinan a favor de los esfuerzos que se producen en el ensayo de flexión por cuatro puntos.

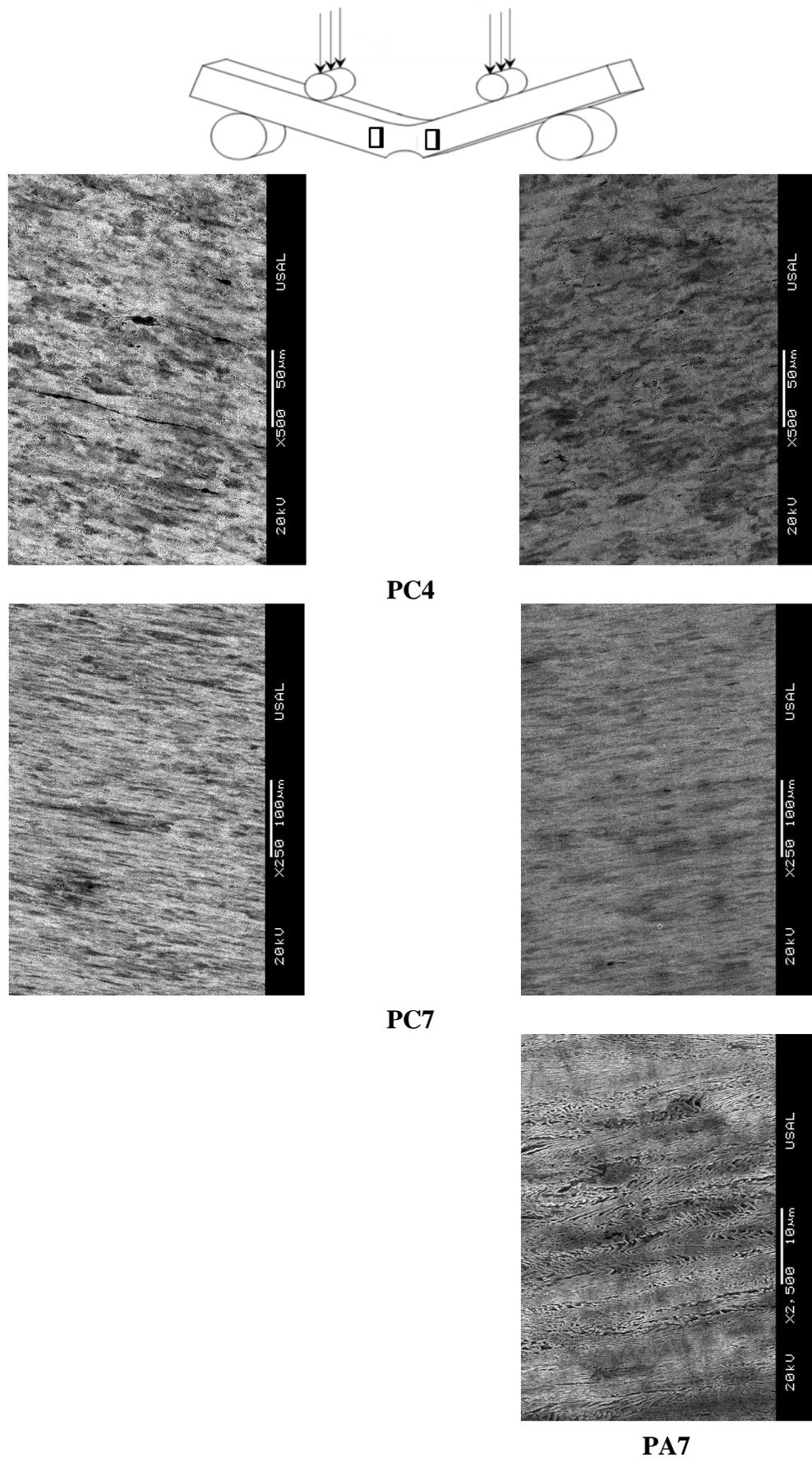


Fig. 3.106. Inclinaciones de la microestructura en ensayos bajo sollicitación de flexión.

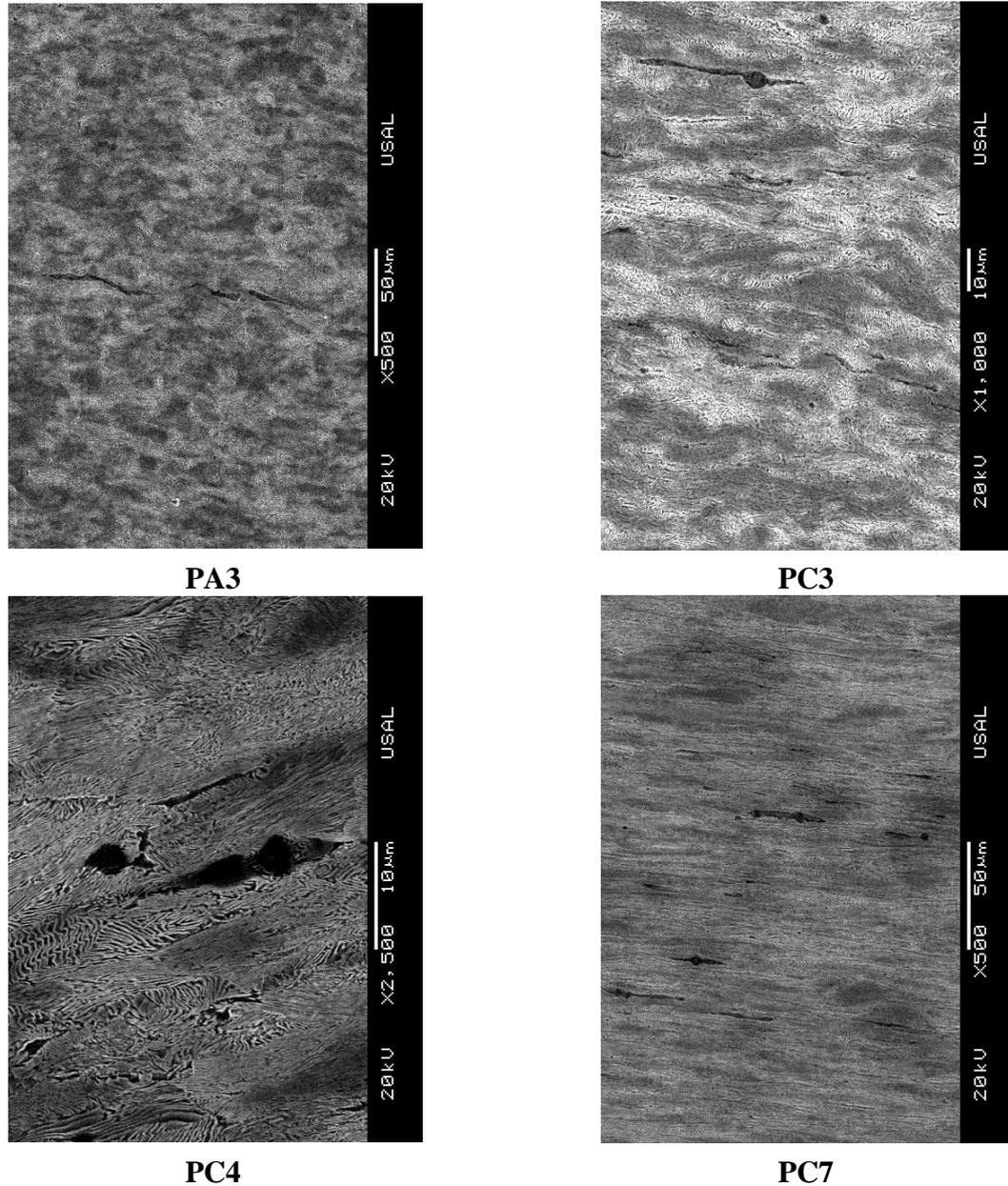


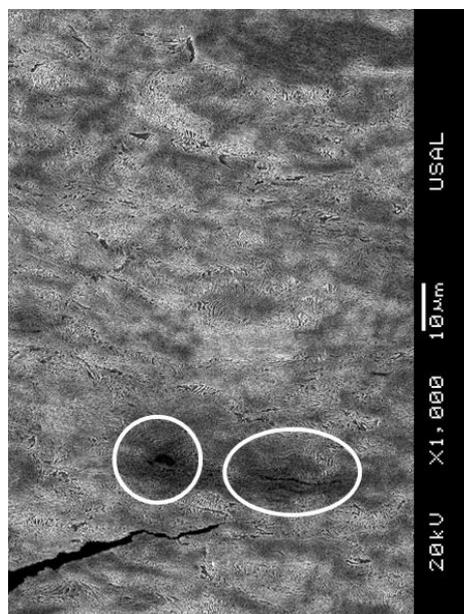
Fig. 3.107. Adaptaciones de las inclusiones a la inclinación microestructural.

Una vez estudiados los microdefectos que presentan las probetas objeto de estudio, PA y PC sometidas a ensayos de flexión por cuatro puntos interrumpidos antes de la fractura total, se ha procedido a analizar las distintas fisuras encontradas en los sucesivos pulidos. Las Figs. 3.108-3.113 muestran las distintas micrografías y mapas obtenidos de las mismas. En algunos casos para una mejor ubicación de las fisuras se han acompañado de la micrografía de la entalla completa.

En el análisis micrográfico de la probeta PA3 procedente del ensayo interrumpido se ha observado una de las fisuras situada en uno de los laterales del fondo de entalla. Dicha microfisura presenta una dirección menor de 45° . En la micrografía de la Fig. 3.108 también se

observan dos inclusiones muy próximas al avance de la fisura, la de mayor tamaño hacia la cual no parece progresar la fractura y otra de tipo blanda con morfología ondulada hacia la que parece dirigirse el avance.

Tanto en las probetas PA3 como PA4 se han observado fisuras en los laterales del fondo de entalla. En las probetas PA4 se muestra la disposición de estas micro-fisuras dentro de la entalla así como su dirección, éstas progresan aproximadamente paralelas al eje longitudinal de la probeta como se muestra en la Fig. 3.109. En la micrografía correspondiente a la fisura inferior de ésta figura se puede observar una inclusión de tipo duro hacia la cual parece dirigirse dicha microfisura.



PA3

Fig. 3.108. Micrografía de fisura en el fondo de entalla.

Las microfisuras observadas en los sucesivos pulidos de la probeta PA7, se sitúan al igual que las anteriores en el fondo de entalla, sin embargo éstas aparecen más próximas al centro de la misma y sus direcciones de propagación presentan ángulos mayores que las anteriores, Fig. 3.110. En ambas microfisuras se pueden ver inclusiones algunas de gran tamaño de tipo mezcla hacia las que progresa claramente la fisura, como en la microfisura derecha y otras de tipo blando igual de esbeltas embebidas en la microfisura izquierda. El análisis en detalle de éstas microfisuras de las probetas PA4 y PA7 muestra como el avance de la microfisura se produce mayoritariamente a través de bordes de colonia en las probetas PA4. En el caso de la PA7 el comienzo de la micro-fisura se produce atravesando las colonias con láminas orientadas a 45° y el avance prosigue también a través de bordes de colonias.

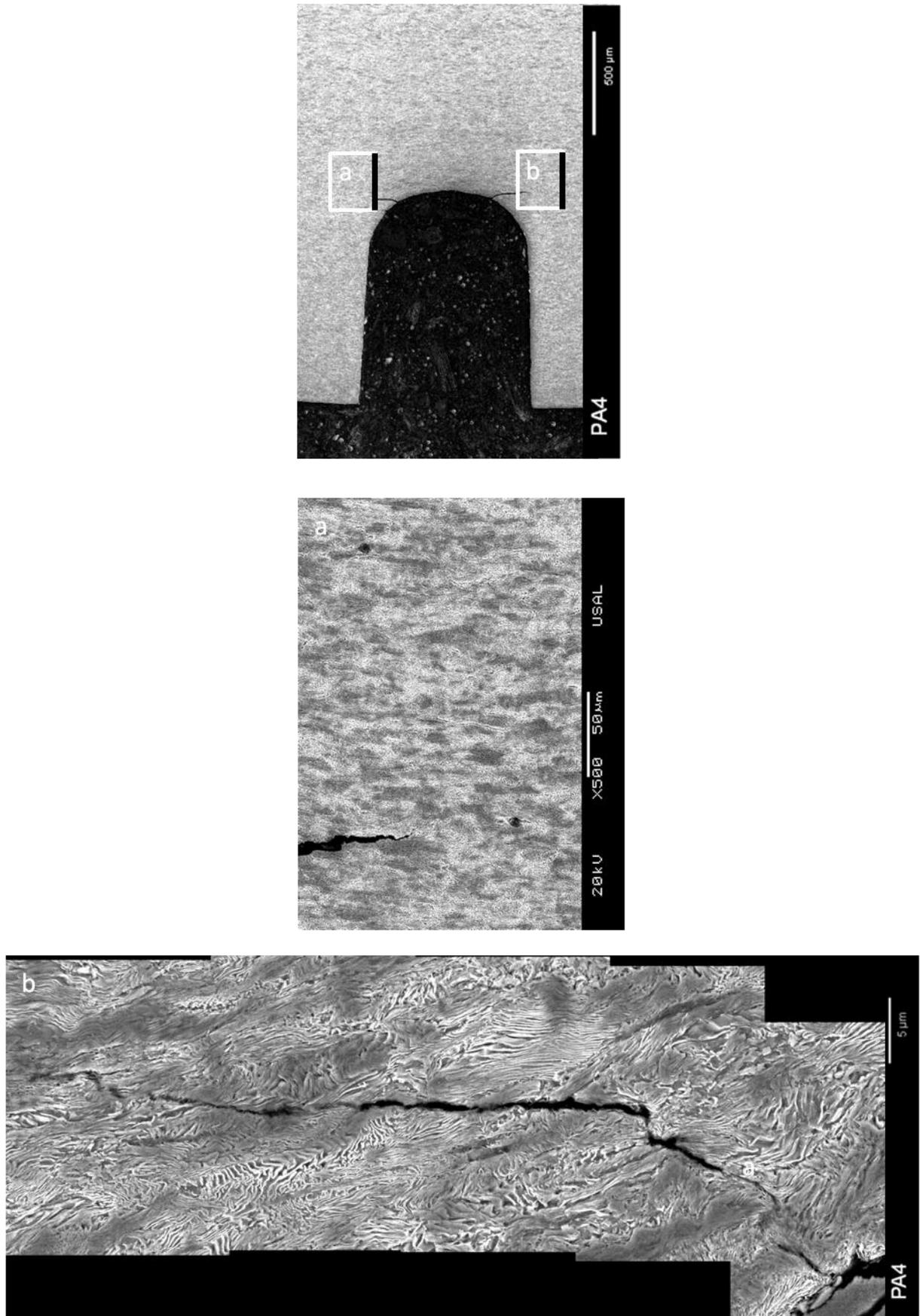


Fig. 3.109. Vista general y micrografías de las fisuras en el fondo de entalla, PA4.

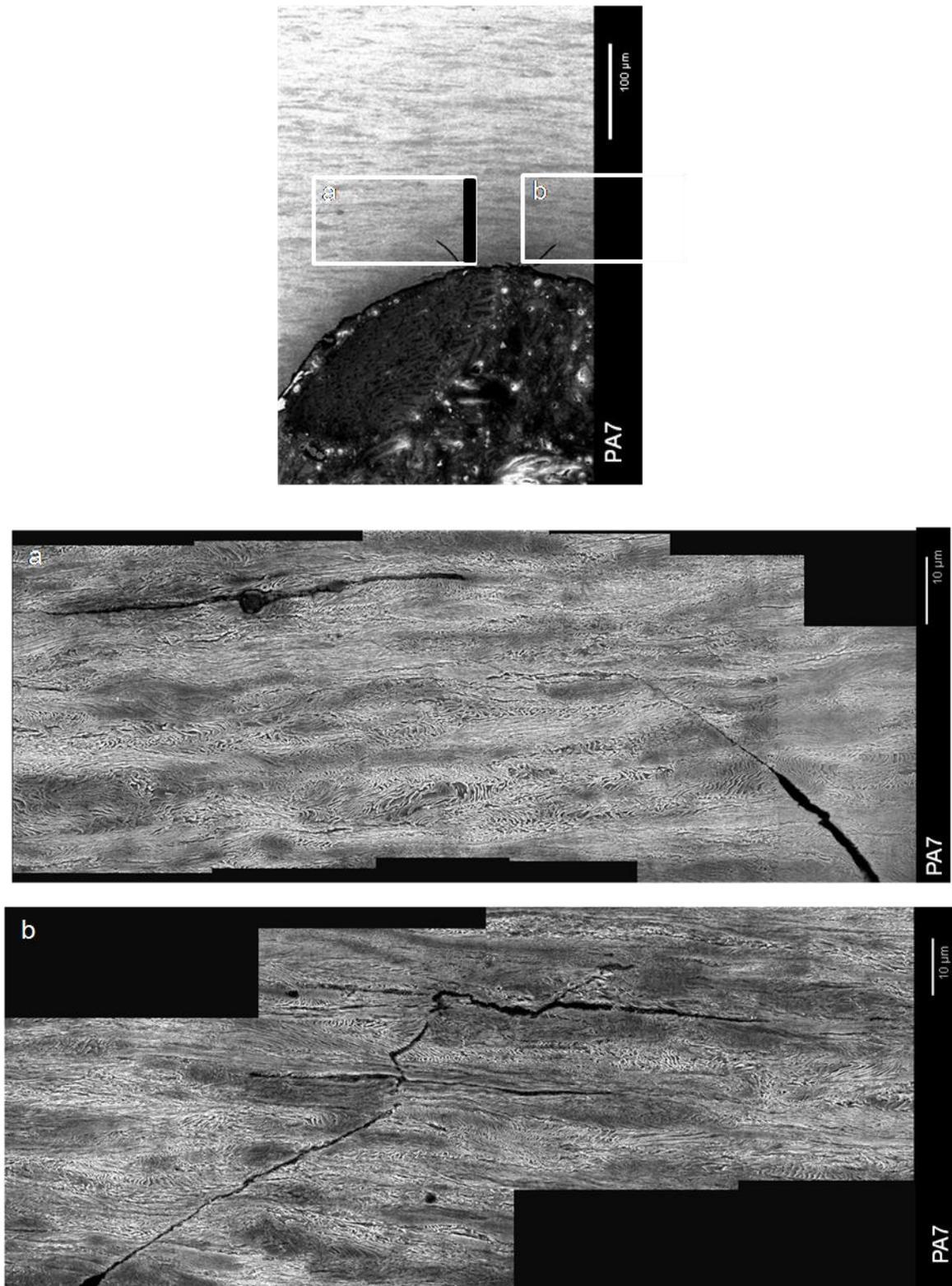


Fig. 3.110. Vista general y micrografías de las fisuras en el fondo de entalla, PA7.

En los ensayos interrumpidos de las probetas con entallas de tipo C, gran radio de curvatura, se han observado micro-fisuras situadas en la parte central del fondo de entalla. Las probetas con entalla de tipo C presentan una situación de microfisuras que difiere de las de las probetas

con entalla de tipo A, siendo la situación de las microfisuras de las entallas de tipo A más próxima al los bordes del fondo de entalla. Cabe señalar que las probetas con entalla de tipo A han presentado dos microfisuras simétricas con respecto al centro del fondo de entalla, mientras que en las probetas con entalla de tipo C se han observado uno o varias microfisuras de menor tamaño en el centro del fondo de entalla.

Las probetas PC4 muestran una microfisura de gran grosor en su inicio y cuya progresión, debido al micro-daño observado, va a ser próxima a la horizontalidad, Fig. 3.111. La dirección del comienzo de la fractura es más paralela a la sección neta de la probeta en comparación con el observado en las probetas con entalla de tipo A, estudiadas anteriormente. En el análisis en detalle de esta microfisura se puede observar el avance próximo a la horizontalidad atravesando colonias con láminas orientadas en la dirección del eje longitudinal de la probeta.

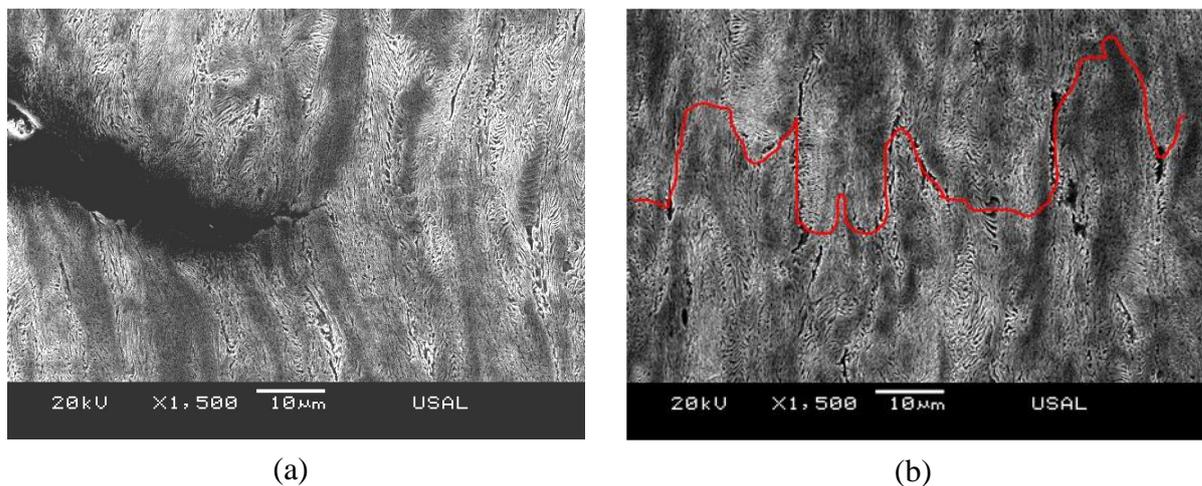


Fig. 3.111. Probeta PC4, (a) Comienzo de micro-fisura y (b) posible progresión de la misma a través de diversos microdefectos presentes.

Dentro del análisis de las microfisuras encontradas en la probeta PC7 se han encontrado un comienzo de fisura, situado en la zona central del fondo de la entalla, el cual diverge en dos microfisuras con orientaciones opuestas, como se puede ver en la Fig. 3.112. La inclinación en el avance de estas dos microfisuras es similar de igual forma que la progresión a través de la microestructura, en ambas el avance se produce atravesando las colonias orientadas en un principio con tendencia horizontal y progresivamente con un ángulo próximo a 45° . En la microfisura derecha de dicha probeta se muestra una inclusión de tipo dura hacia la cual parece dirigirse la microfisura. Las distintas micrografías observadas de estas microfisuras evidencian esfuerzos de cizalla, debido a la morfología de ésta. Dicho hecho es fácilmente observable en las probetas con entalla de tipo C aunque también se produce en las probetas de tipo A con menor intensidad, Fig. 3.113.

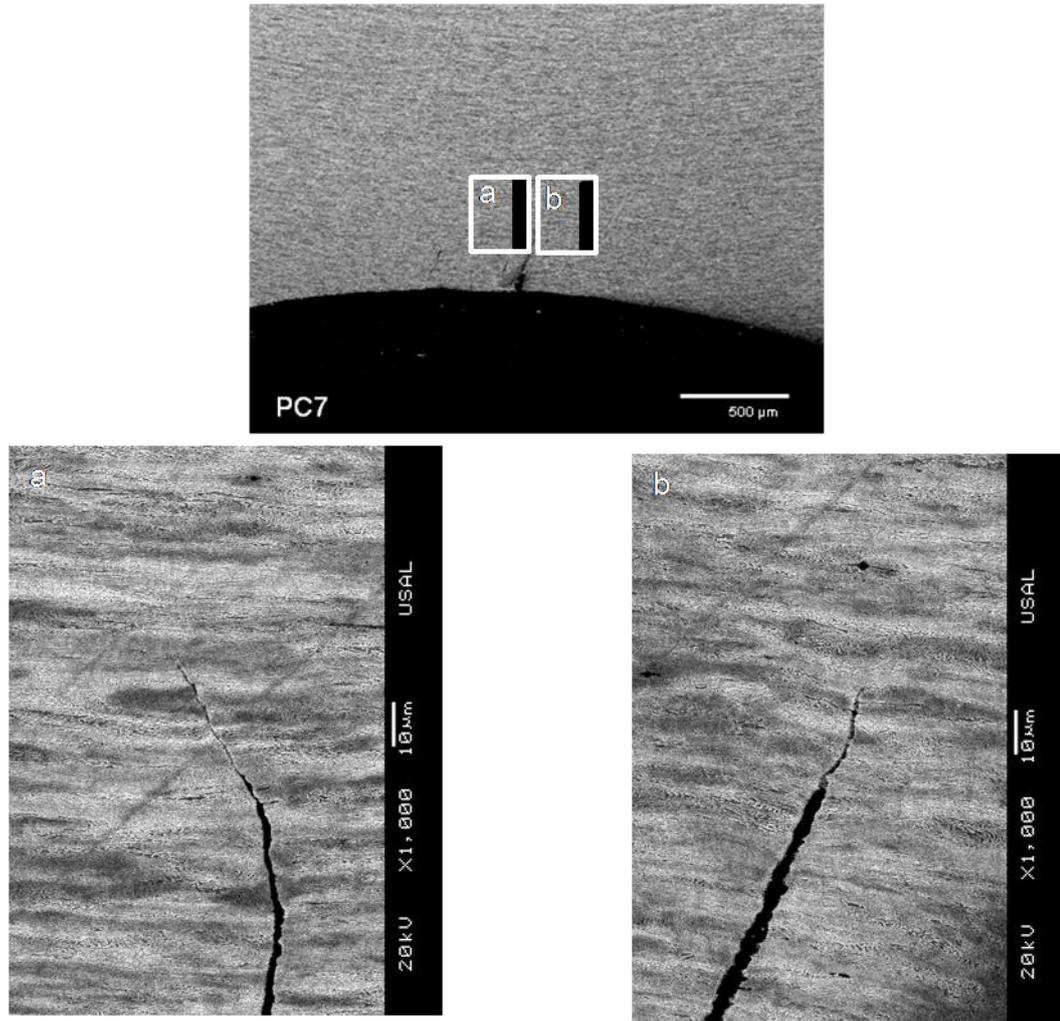


Fig. 3.112. Vista general y micrografías de las fisuras en el fondo de entalla, PC7.

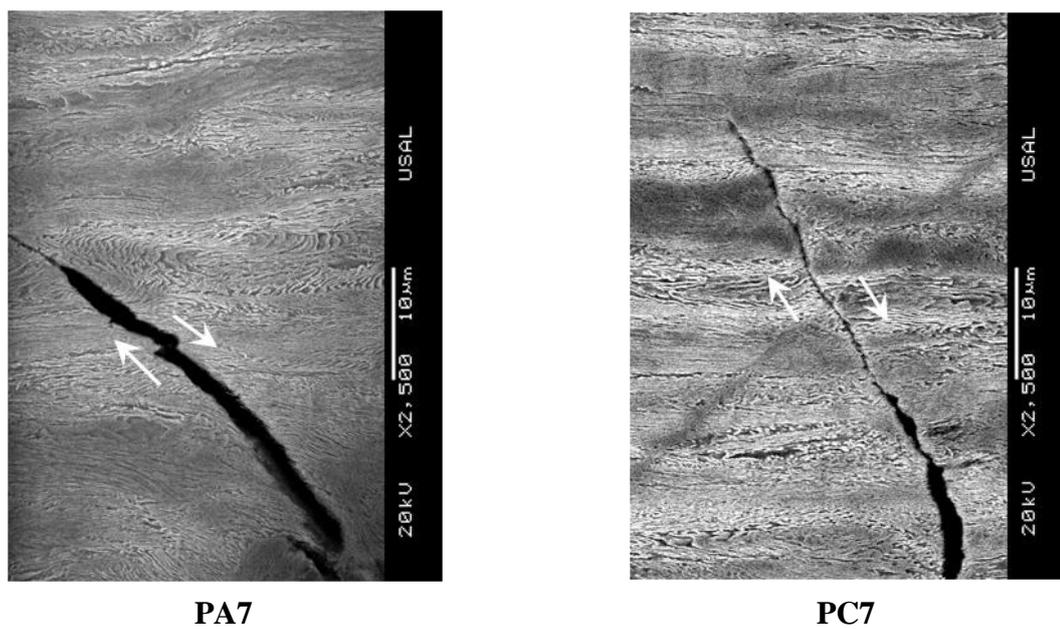


Fig. 3.113. Desplazamiento de cizalla en la micro-fisura, probeta PC7.

IV. MODELIZACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

En el siguiente capítulo de la presente Tesis se han realizado modelizaciones de las probetas estudiadas sometidas a distintos tipos de solicitaciones, probetas prismáticas entalladas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos de fractura bajo solicitación de tracción y probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos de fractura bajo solicitación de flexión por cuatro puntos, empleando para ello el programa de cálculo Marc Mentat 2010, basado en el método de los elementos finitos (MEF).

Una vez obtenidas las diferentes modelizaciones de los ensayos realizados se han podido estudiar las tensiones y deformaciones que imperan en las diferentes probetas bajo las distintas solicitaciones de tracción y flexión por cuatro puntos a las cuales han sido sometidas.

Tras realizar el estudio de los diferentes campos de tensiones y deformaciones (tensiones normales, de von Mises, hidrostática y deformación plástica), se ha procedido a realizar el estudio de micro-defectos generados por las inclusiones dentro de estas probetas en las zonas en las cuales se produce la mayor triaxialidad (tensión hidrostática/von Mises).

1. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURA A TRACCIÓN EN PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS DE ACERO PERLÍTICO.

1.1. Modelización como medio continuo

Hasta el presente apartado se ha estudiado el comportamiento del material en fractura para dos tipos de entallas prismáticas, PAA y PCC, en función de las *variables externas* obtenidas de los ensayos de fractura mediante la máquina de ensayos universal, reflejándose las curvas $F-u$ en las gráficas estudiadas en el apartado 6.2 del capítulo II de la presente Tesis. Posteriormente se ha realizado un análisis fractográfico de las mismas, apartado 3 del capítulo III, en el cual se han analizado de forma cuantitativa y cualitativa las distintas zonas presentes en la superficie de fractura de las probetas en ambos tipos de entallas así como las micrografías de las mismas.

En éste apartado se realiza un estudio por medio de la utilización del MEF los cuales van a permitir el cálculo de *variables internas* (tensiones y deformaciones), que complementarán los estudios anteriores, permitiendo establecer criterios de fractura para cada acero en función del paso de trefilado y del tipo de entalla correspondiente. Para la obtención de las variables internas se ha empleado un programa de cálculo (MARC[®]) el cual se fundamenta en el MEF. Este método de cálculo permite resolver problemas complejos e introducir en éstos no linealidades, tales como el comportamiento elastoplástico de materiales, el contacto, etc. El MEF permite determinar el comportamiento de un material ante una determinada sollicitación sustituyendo la solución continua, exacta y en la mayoría de los casos imposible, del sistema de ecuaciones diferenciales que conforman el problema elastoplástico por una solución discontinua y discreta y, por tanto, aproximada. Para ello se discretiza el dominio, *i.e.*, se divide en elementos no diferenciables, o elementos finitos, interconectados entre sí a través de un número de puntos que se denominan nodos. Después de estudiar cada elemento por separado se recompone el dominio, restableciendo el equilibrio y la compatibilidad de desplazamientos en los nodos, lo que da lugar a un sistema de ecuaciones algebraicas. La resolución de este sistema de ecuaciones permite hallar los desplazamientos de los nodos y, a partir de ellos, las restantes incógnitas del problema elastoplástico.

La simulación numérica de las probetas axisimétricas objeto de estudio consiste en el análisis tenso-deformacional de un problema en el cual se consideran dos no linealidades. Por un lado la no linealidad se introduce en el análisis para incluir el comportamiento elastoplástico del material durante el ensayo bajo sollicitación de tracción y por otro parte la segunda no linealidad se debe a considerar en el análisis las grandes deformaciones que se producen en el alambre durante dicho ensayo.

Para realizar la simulación numérica de dichas probetas hay que introducir el comportamiento elastoplástico del alambroón inicial, de los alambres pertenecientes al tercer y cuarto paso del proceso y alambre de pretensado comercial, dependiendo del caso de estudio a analizar. La definición del comportamiento de cada alambre vendrá dado por el modulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν), la curva de comportamiento plástico y el criterio de plastificación. Estos datos se han extraído de caracterizaciones mecánicas de estos aceros realizadas por el GIFIE de la USAL, considerándose la curva de comportamiento plástico de cada alambre, Fig. 4.1, la curva de comportamiento del acero siendo el primer punto de ésta el correspondiente a la tensión a la que se inician las deformaciones plásticas ($\epsilon_p=0$). Debido a las altas deformaciones plásticas que soportan las probetas entalladas durante los ensayos es necesario introducir la ley de comportamiento del material en cuestión (curva tensión-deformación plástica) adaptada para grandes deformaciones. Las leyes de comportamiento de los materiales empleadas en el programa de cálculo han sido las curvas tensión-deformación propias de cada acero, las cuales han sido prolongadas hasta el valor de la deformación necesaria para obtener mediante estirado en frío del acero 7 (AYASO, 2001). Los datos utilizados para dicha simulación, de cada alambre correspondiente a cada paso del proceso de trefilado, se muestran en el apartado 2 del capítulo II dentro de material utilizado, Acero E. El criterio de plastificación utilizado en todos los casos es el criterio de von Mises.

La modelización de las distintas probetas estudiadas, pertenecientes al alambroón inicial, tercer y cuarto paso y alambre de pretensado comercial, con los dos tipos de entallas, PAA y PCC, se ha realizado teniendo en cuenta las medidas originales de las mismas, es decir, incorporando a dichas geometrías los errores producidos durante el proceso de mecanizado, anexo II. Debido a ésta variación de las medidas entre las entallas pertenecientes a una misma probeta se ha optado por representar la geometría original, con los defectos propios del mecanizado, para la realización del cálculo. Dicha geometría posee dos planos de simetría por lo cual se ha representado 1/4 de la probeta de partida para ambos tipos de entallas PAA y PCC, tal y como se muestra en la siguiente Fig. 4.2.

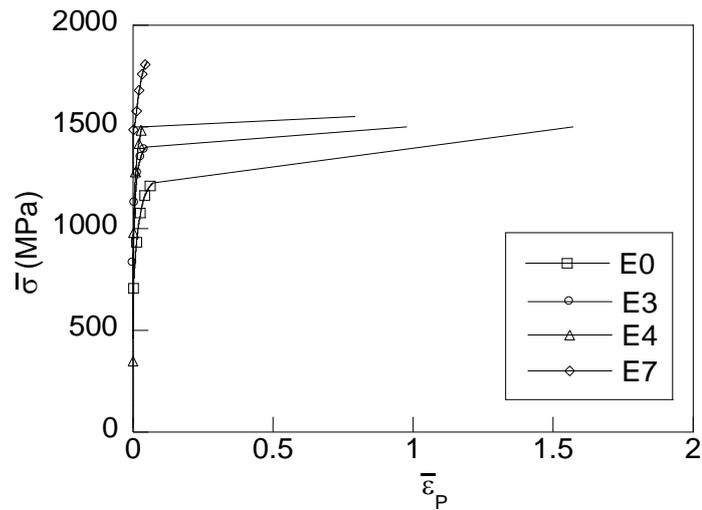


Fig. 4.1. Curvas de comportamiento plástico del alambroón inicial (E0), tercer paso de trefilado (E3), cuarto paso de trefilado (E4) y alambre de pretensado (E7).

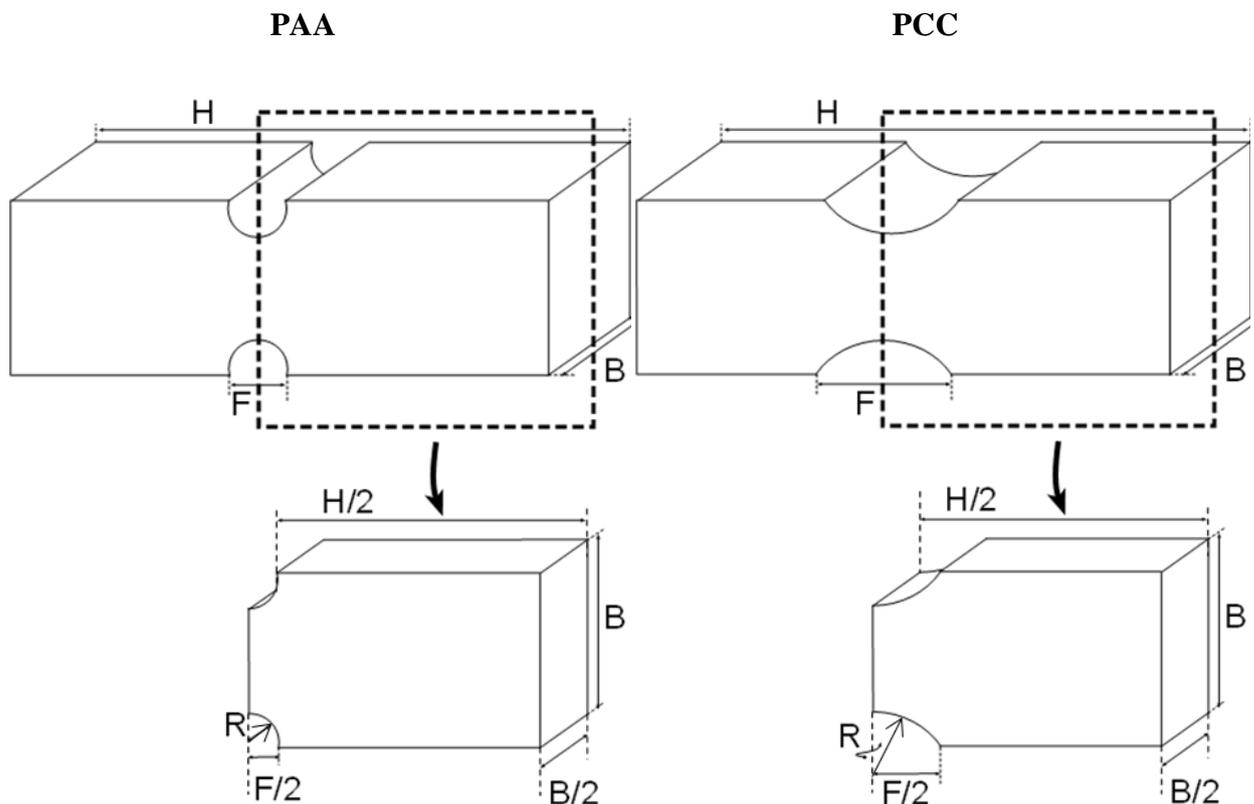


Fig. 4.2. Secciones utilizadas para el cálculo mediante MEF de las probetas tipo PAA y PCC.

Una vez seleccionadas las secciones geométricas de cálculo se aplica a éstas las condiciones de contorno debidas a la geometría de partida esquematizadas en la Fig. 4.3 en la cual se muestra un desplazamiento impedido en la dirección del eje x impuesto en la sección de corte

de dicha probeta, [Fig. 4.3 (b)] ó sección media de la entalla; otro de los desplazamientos impedidos se encuentra en el eje z situándose en uno de los bordes longitudinales de dicha sección [Fig. 4.3 (c)]; por último otro de los desplazamientos impedidos, esta vez en eje y , se sitúa en la fibra neutra de la probeta [Fig. 4.3 (a)]. Dichos desplazamientos impedidos se han tomado como condiciones de contorno en todas las probetas prismáticas tanto para las probetas de tipo PAA como para las de tipo PCC. En todos los casos de estudio se ha aplicado como condición de contorno fundamental y representativa de cada ensayo la mitad del desplazamiento registrado por el extensómetro en la dirección del eje x , el cual ha sido obtenido de los ensayos bajo sollicitación de tracción realizados, Fig. 4.3 (d).

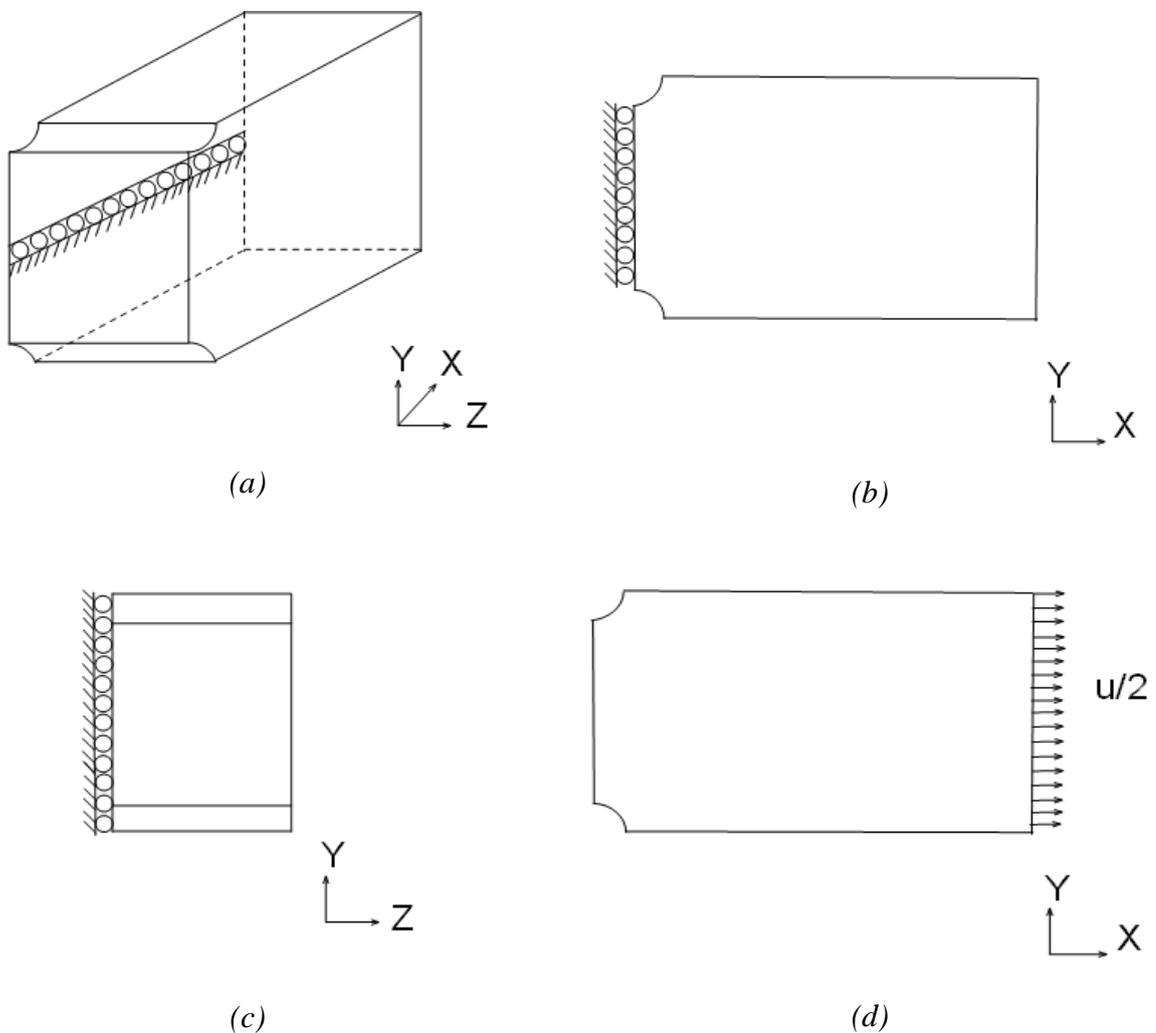


Fig. 4.3. Condiciones de contorno impuestas, desplazamientos impedidos, en la simulación numérica de las PAA y PCC: (a) en el eje y , (b) en el eje x , (c) eje z y (d) eje x , condición de ensayo $u/2$.

El MEF es un método aproximado cuyo grado de aproximación aumenta con el número de elementos en los que se divide el material. Para corroborar el grado de aproximación es necesario realizar dos tipos de convergencias en los cálculos la primera de ellas en referencia al número de elementos denominada *convergencia de malla* y la segunda a la discretización del tiempo de cálculo denominada *convergencia numérica*.

Para llevar a cabo las convergencias, necesarias para ratificar los cálculos realizados, se ha optado por realizar éstas en el alambroón inicial y en el alambre de pretensado comercial teniendo en cuenta que la validez de las mallas y tiempos de cálculo en estas simulaciones numéricas implica la validación de las mismas en los alambres intermedios, pertenecientes al tercer y cuarto paso del proceso de trefilado.

La *convergencia de malla* se ha realizado variando el número de elementos que componen cada una de las mallas, para ello se han realizado tres tipos de mallas. En el primer tipo de malla se ha optado por dividir la entalla en 14 elementos, obteniéndose un total de 5844 elementos finales que conforman la simulación de la probeta, la segunda malla estudiada se caracteriza por la formación de 20 elementos en la entalla y un total de 24000 elementos en la probeta y por último la tercera malla la cual se compone de 24 elementos en la zona de entalla y un total de 41472 elementos. La convergencia de malla se ha realizado para el alambroón inicial y el alambre de pretensado comercial, como se ha comentado anteriormente, para ambos tipos de entalla PAA y PCC.

Los gráficos resultantes del estudio de la convergencia se muestran en las Figs. 4.4 -4.7. La *convergencia numérica* se ha realizado variando los elementos de cálculo entre 500, 750 y 1000. Los gráficos resultantes del estudio de la convergencia numérica se muestran en las Figs. 4.8-4.11.

Una vez realizadas las convergencias (de malla y numérica) se ha podido elegir, entre las diferentes mallas al igual que entre los diferentes tiempos de cálculo, optimizándose de ésta forma los recursos informáticos y obteniéndose resultados de los cálculos lo más veraces posibles. De ésta forma se ha optado por mallas de 14 divisiones y 500 incrementos de cálculo para todas las probetas a excepción de las probetas PAA0, PAA3 y PAA4 para los cuales se han empleado mallas realizadas con 20 divisiones puesto que éstas permiten obtener los resultados con una mayor fiabilidad según el estudio de convergencias realizado.

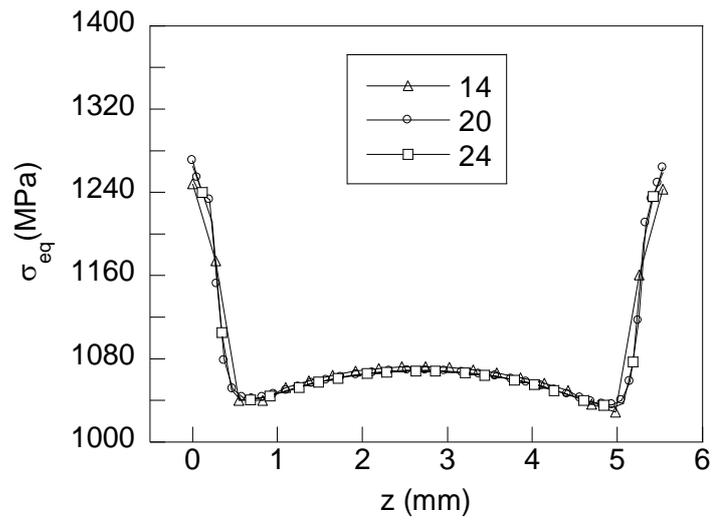


Fig. 4.4. Convergencia de malla: probeta PAA0.

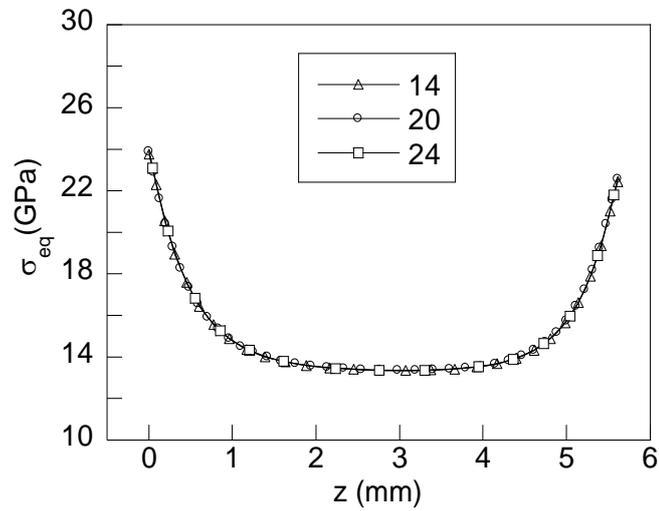


Fig. 4.5. Convergencia de malla: probeta PCC0.

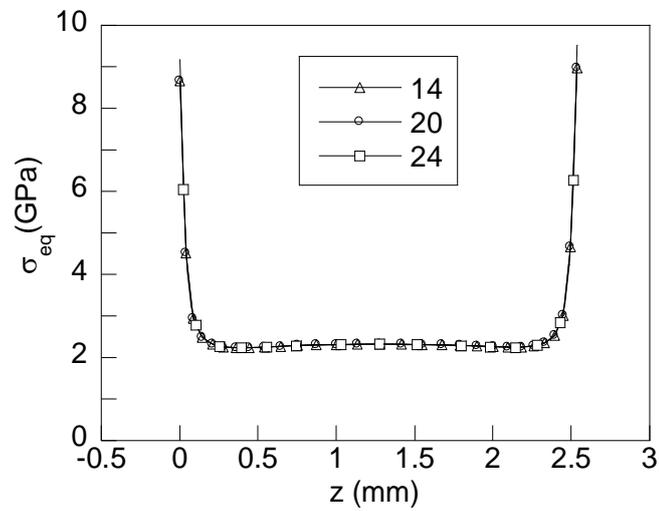


Fig. 4.6. Convergencia de malla: probeta PAA7.

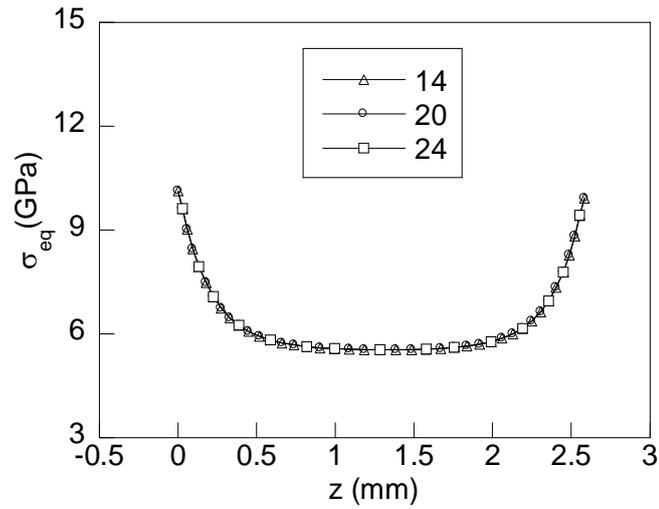


Fig. 4.7. Convergencia de malla: probeta PCC7.

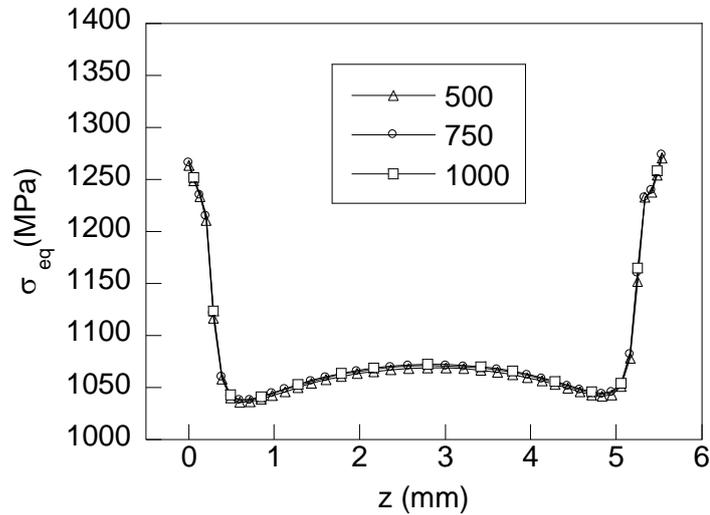


Fig. 4.8. Convergencia numérica: probeta PAA0.

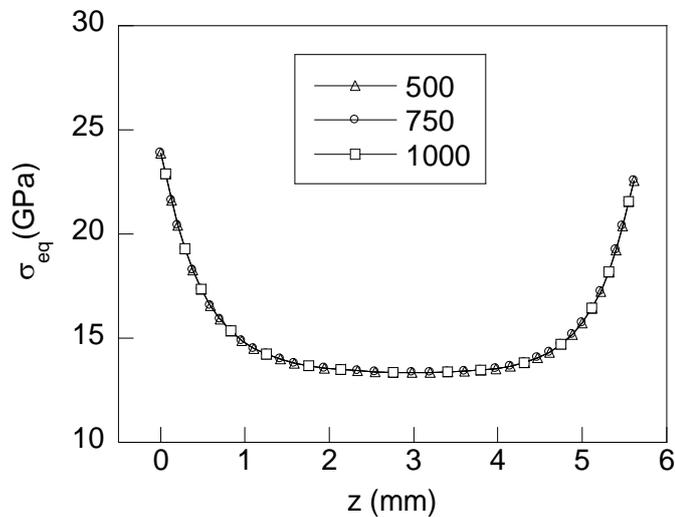


Fig. 4.9. Convergencia numérica: probeta PCC0.

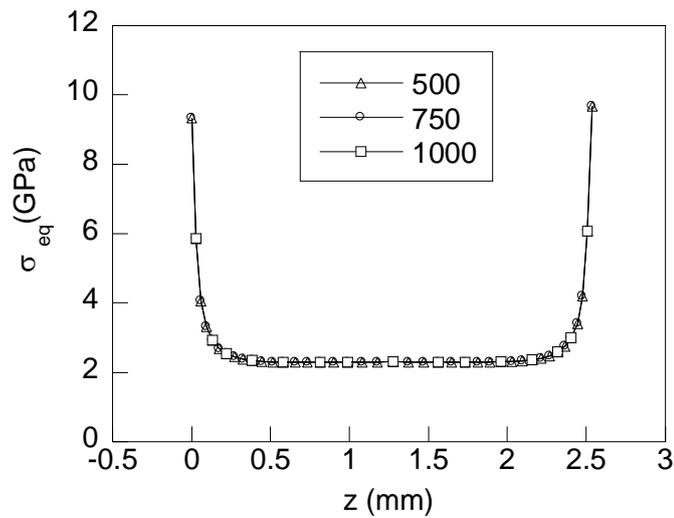


Fig. 4.10. Convergencia numérica: probeta PAA7.

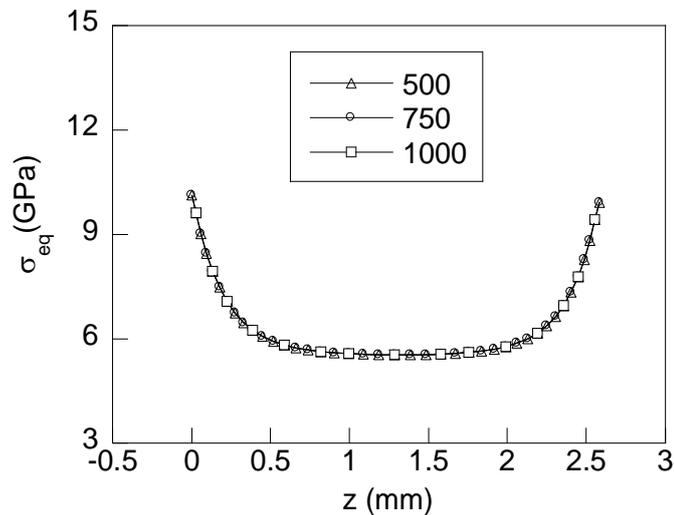


Fig. 4.11. Convergencia numérica: probeta PCC7.

Tras la realización de los distintos cálculos mediante el MEF se procedió a la segunda verificación de los mismos, la cual consiste en comparar las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos, curvas experimentales (EXP), con las con las curvas $F'-u'$ obtenidas en las simulaciones correspondientes, curvas numéricas (NUM). Las comparaciones entre ambos tipos de curva se han representado para todas las probetas prismáticas entalladas analizadas en el intervalo de Figs. 4.12-4.14.

Como se puede observar en las siguientes figuras de las comparativas entre los dos tipos de curvas $F-u$, experimental y numérica, la coincidencia de ambas curvas es casi total incluso en la carga máxima alcanzada durante la realización del ensayo y el descenso de carga registrado en los ensayos realizados de las probetas entalladas con gran radio de curvatura, PCC.

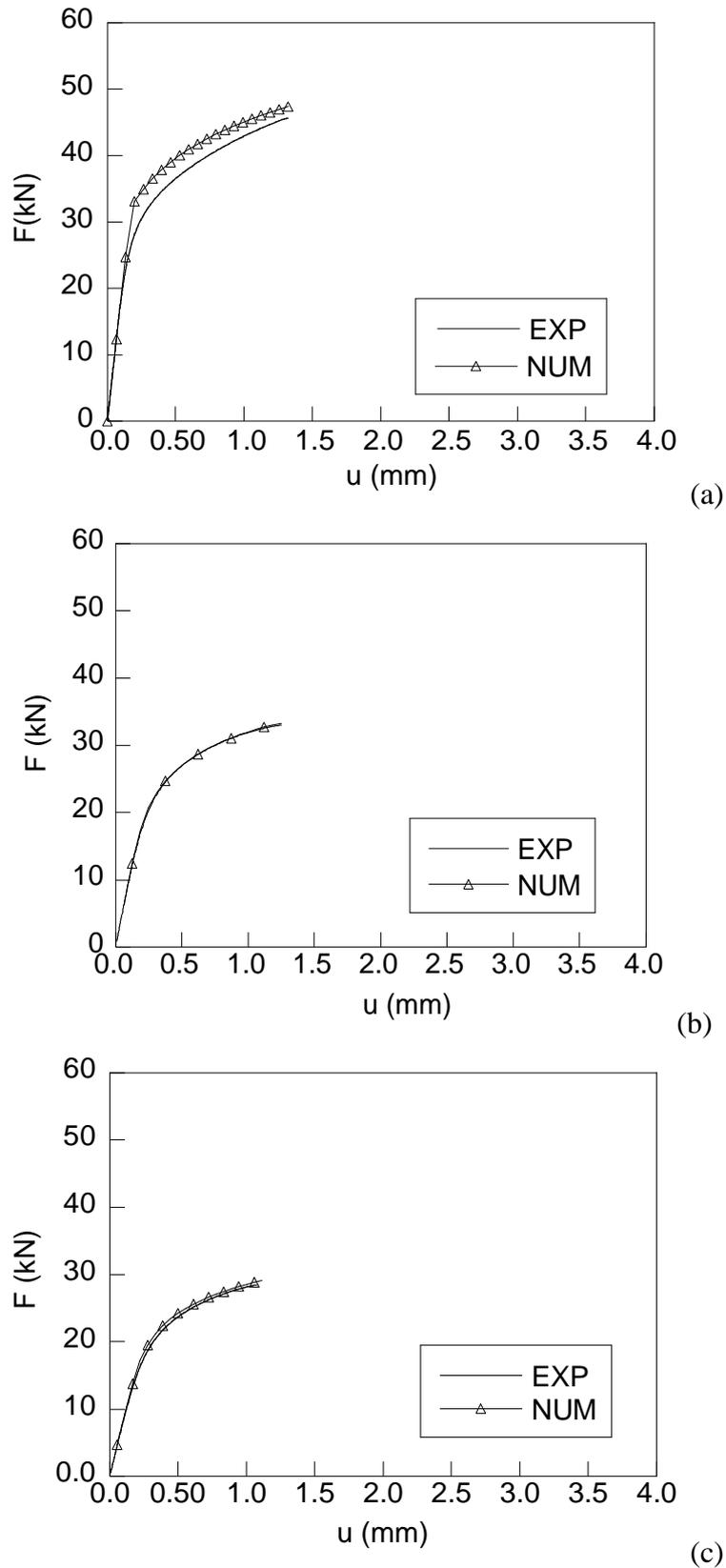


Fig. 4.12. Curva experimental vs numérica para las probetas (a) PAA0, (b) PAA3 y (c) PAA4.

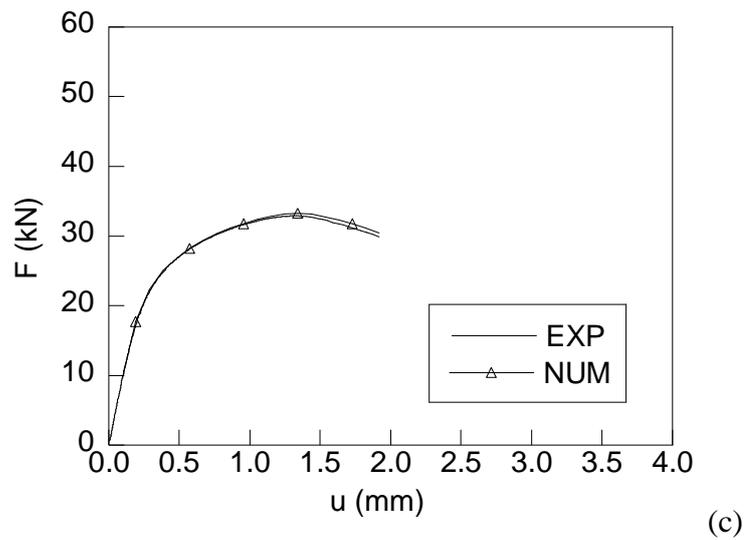
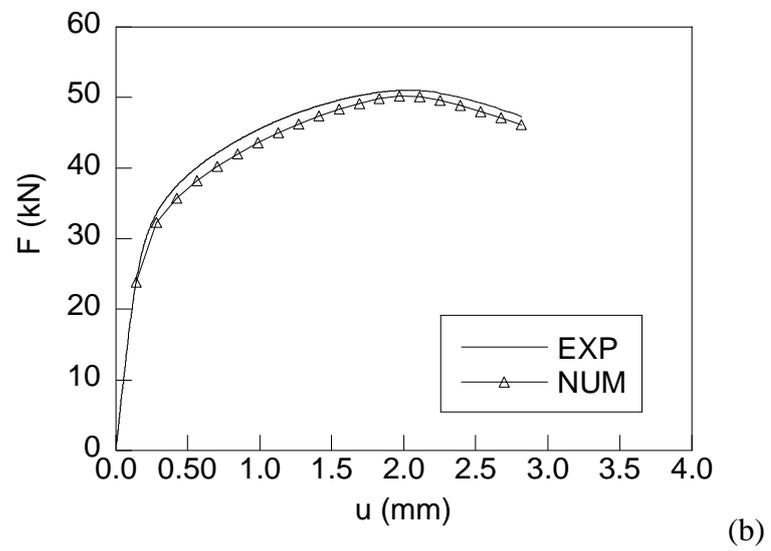
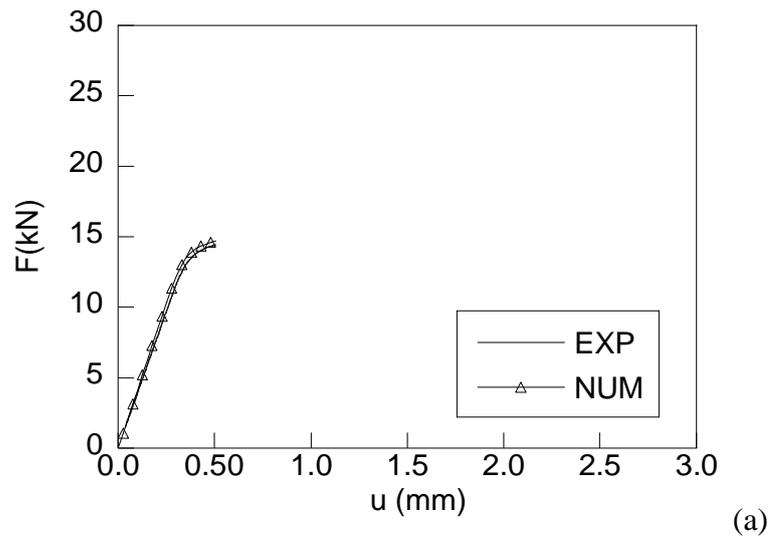


Fig. 4.13. Curva experimental vs numérica para las probetas (a) PAA7, (b) PCC0 y (c) PCC3.

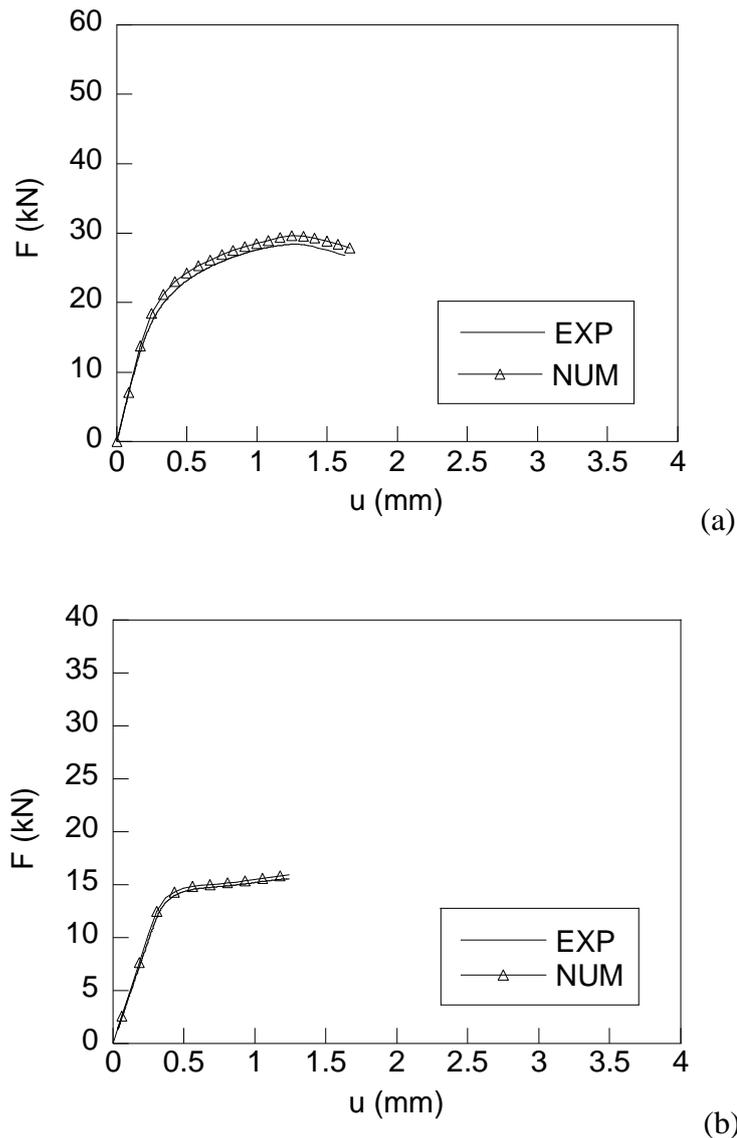


Fig. 4.14. Curva experimental vs numérica para las probetas (a) PCC4 y (b) PCC7.

Cabe señalar como, a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha mecanizado la probeta, las comparativas entre las curvas $F-u$, experimental y numérica, muestran menores diferencias para ambos tipos de probetas estudiadas.

Una vez verificadas las modelizaciones numéricas de los ensayos de probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de tracción se han extraído las siguientes variables; tensiones en los ejes cartesianos (σ_x , σ_y y σ_z), tensión equivalente de von Mises (σ_{eq}), tensión hidrostática (σ) y deformación plástica equivalente (ε_{eq}^P). A continuación se exponen las fractografías de las probetas tipo de cada terna analizada acompañadas de los mapas de contorno de las variables internas, las cuales han sido extraídas de las modelizaciones numéricas correspondientes a cada una de las probetas en cuestión, Figs. 4.15-4.26. En dichas figuras se observa la distribución de las diferentes variables analizadas en el momento de producirse la

fractura por separación total de superficies de las distintas probetas analizadas, así como el cambio morfológico sufrido por la superficie de fractura de las probetas correspondientes.

La distribución de los valores que toma la tensión normal en el eje x (σ_x) muestra valores significativamente mayores en las probetas PCC. La mayor concentración de la σ_x se presenta, en las PAA, en los fondos de entalla para todos los aceros analizados, alcanzándose mayores valores a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre (Fig. 4.15). Por el contrario las probetas PCC muestran la mayor concentración de σ_x en la zona central de la probeta y ésta también es mayor a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre de procedencia, a excepción de la probeta PCC7, en la cual la concentración de los valores más elevados de σ_x se desplaza hacia una zona cercana a los fondos de entalla [Fig. 4.16 (d)].

En el análisis de la tensión normal en el eje y , σ_y , tal y como se muestra en las Figs. 4.17 y 4.18, se puede comprobar que los valores más elevados son alcanzados por las probetas tipo PAA. En cuanto a la distribución tensional de σ_y a lo largo de la sección neta de las muestras ensayadas, las probetas PAA presentan los valores máximos en las proximidades de los fondos de entalla en todos los alambres estudiados (Fig. 4.17). Por el contrario, al igual que sucedía en el estudio de la σ_x , las probetas PCC muestran los máximos en la zona central de la superficie de fractura, siendo éstos valores de mayor cuantía cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha obtenido la probeta (Fig. 4.18). Cabe señalar como la distribución de los valores máximos se extiende para abarcar una zona más amplia de la sección neta de la probeta PCC7, llegando a ocupar una zona muy importante de la misma y hasta zonas próximas a los fondos de entalla.

La tensión normal σ_z alcanza mayores valores en las probetas PAA (Fig. 4.19). En dichas probetas los valores máximos se presentan en las proximidades de las entallas para todas la serie (PAA0, PAA3, PAA4 Y PAA7); sin embargo, cabe señalar la presencia de tensiones de compresión (negativas) en la zona central de la mitad de la superficie analizada. Dicha zona con valores negativos de la σ_z aumenta a medida que aumenta grado de trefilado del acero del que procede la probeta mecanizada, extendiéndose hasta la zona central de dicha superficie en la probeta PAA7 (Fig. 4.19). En las probetas tipo PCC los valores máximos se presentan en la zona central de la sección neta, valores los cuales aumentan también con el grado de trefilado (Fig. 4.20). Cabe señalar la distribución de dicha tensión σ_z en la probeta PCC7, en la cual los valores máximos se muestran en las cercanías del fondo de entalla, además de ser la única de las PCC en la cual se presentan valores negativos de dicha tensión, los cuales, al igual que sucedía en las probetas PAA, se sitúan en el centro de la sección neta. Dichos valores negativos son similares a los obtenidos en las PAA, aunque la zona afectada es de menor tamaño, en este caso.

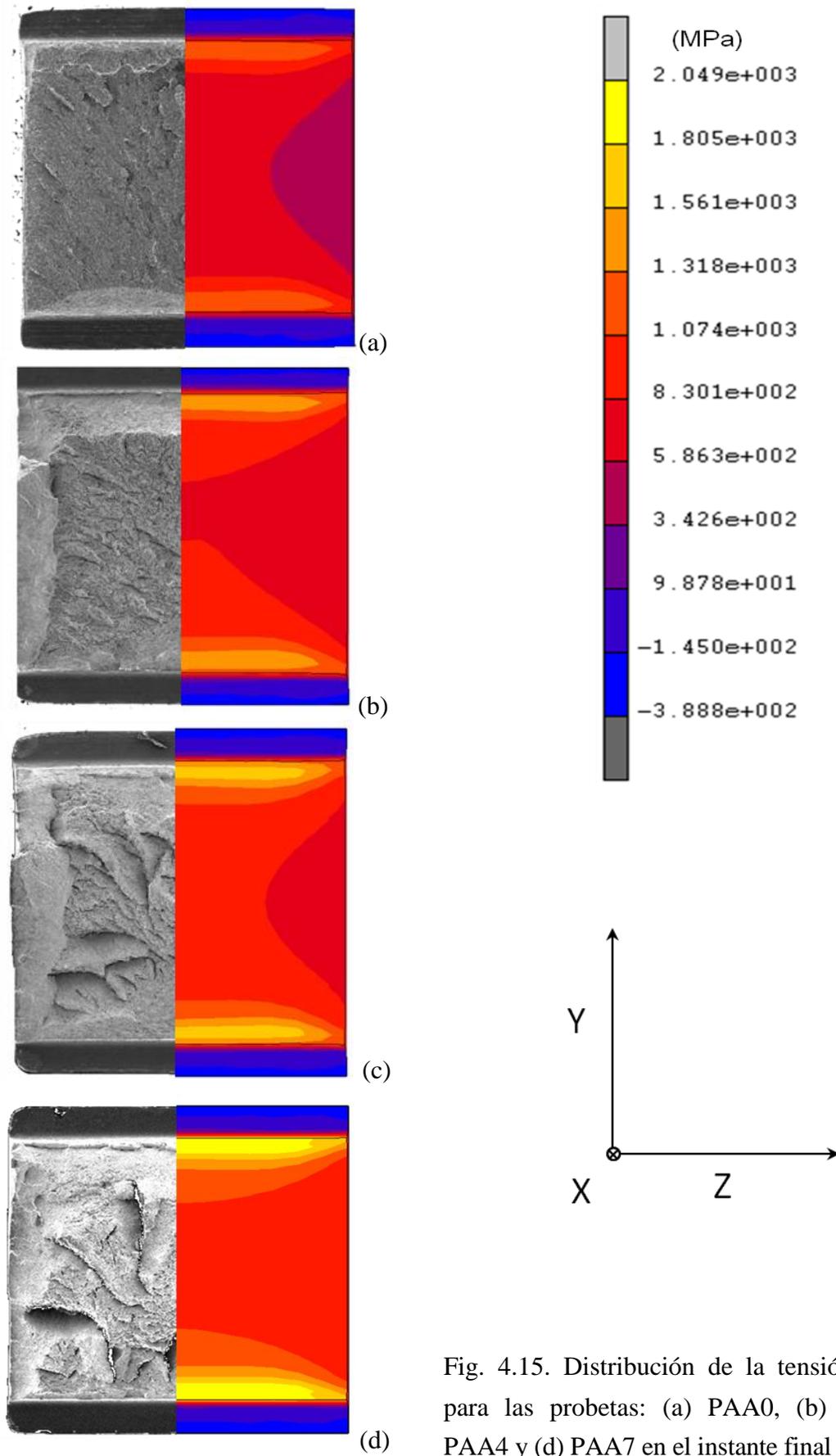
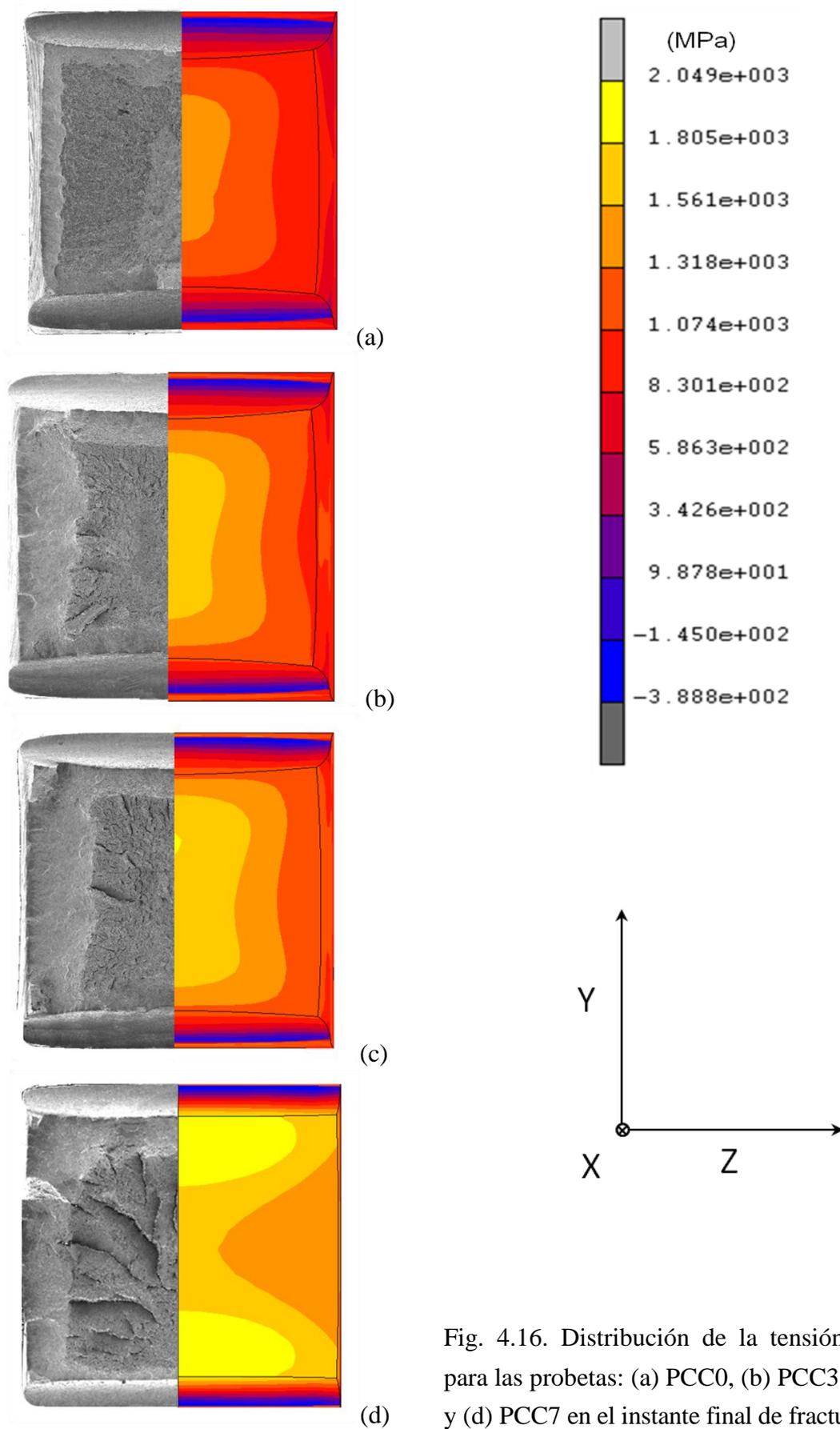


Fig. 4.15. Distribución de la tensión axial σ_x para las probetas: (a) PAA0, (b) PAA3, (c) PAA4 y (d) PAA7 en el instante final de fractura.



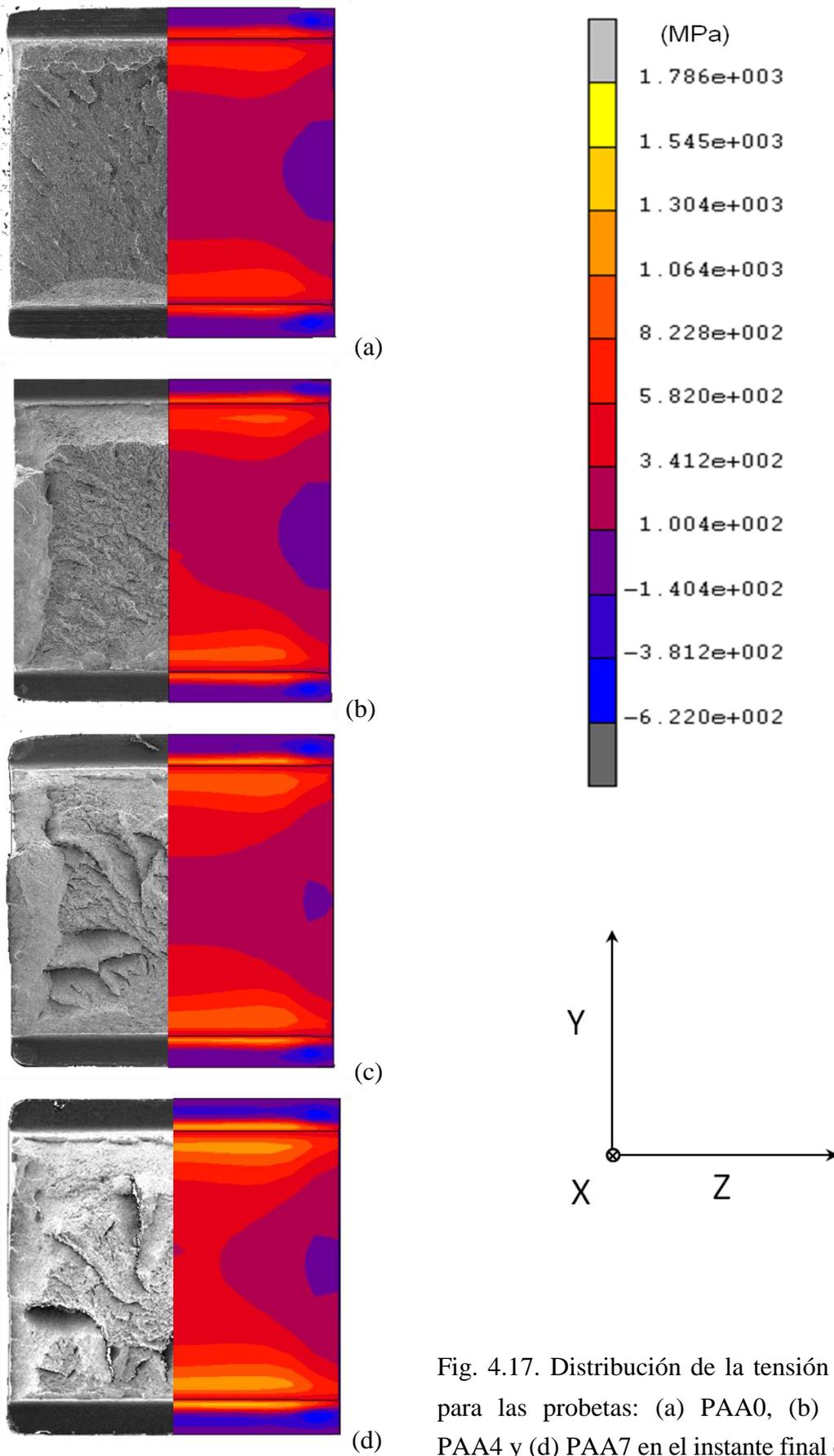


Fig. 4.17. Distribución de la tensión normal σ_y para las probetas: (a) PAA0, (b) PAA3, (c) PAA4 y (d) PAA7 en el instante final de fractura.

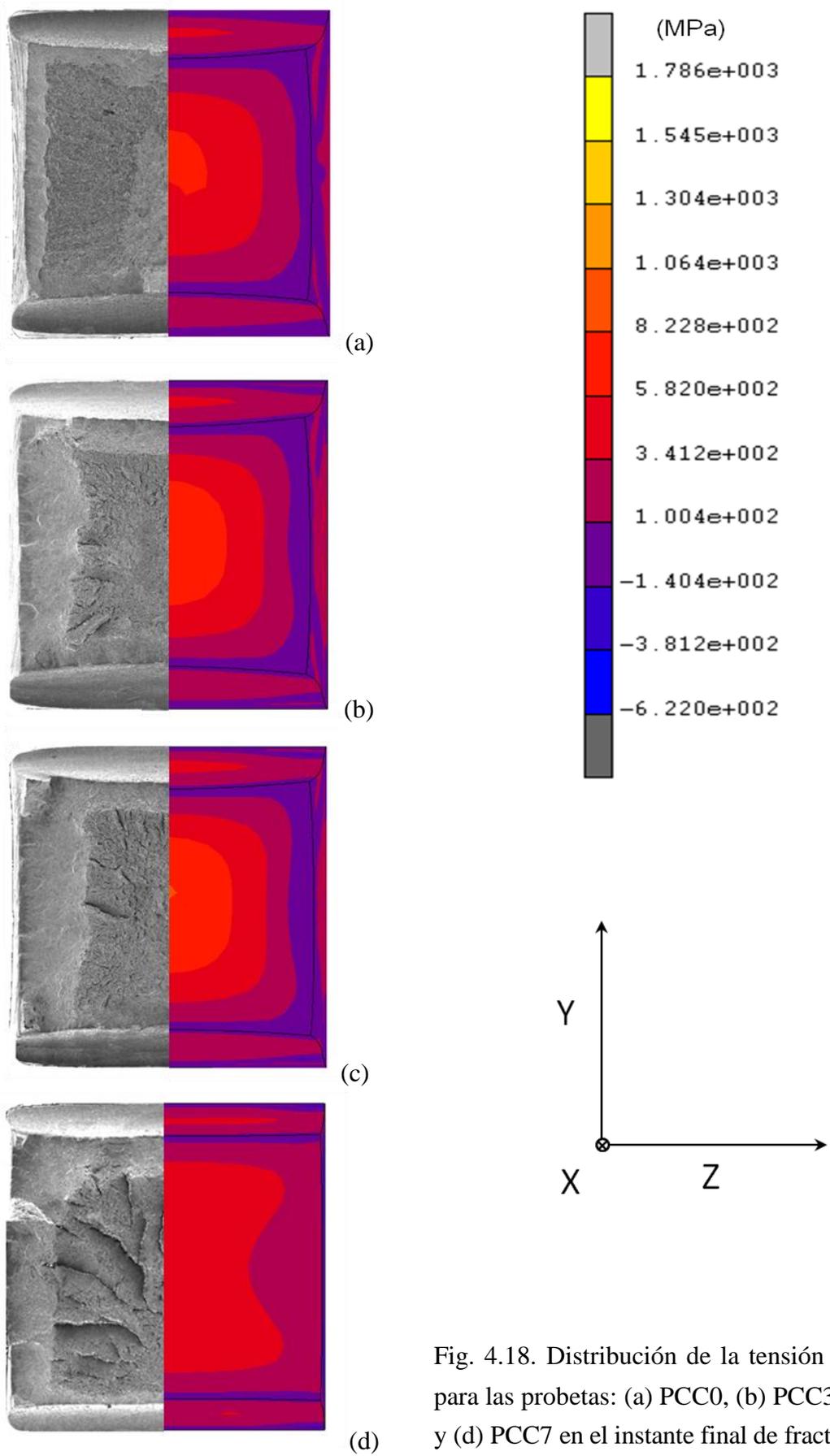


Fig. 4.18. Distribución de la tensión normal σ_y para las probetas: (a) PCC0, (b) PCC3, (c) PCC4 y (d) PCC7 en el instante final de fractura.

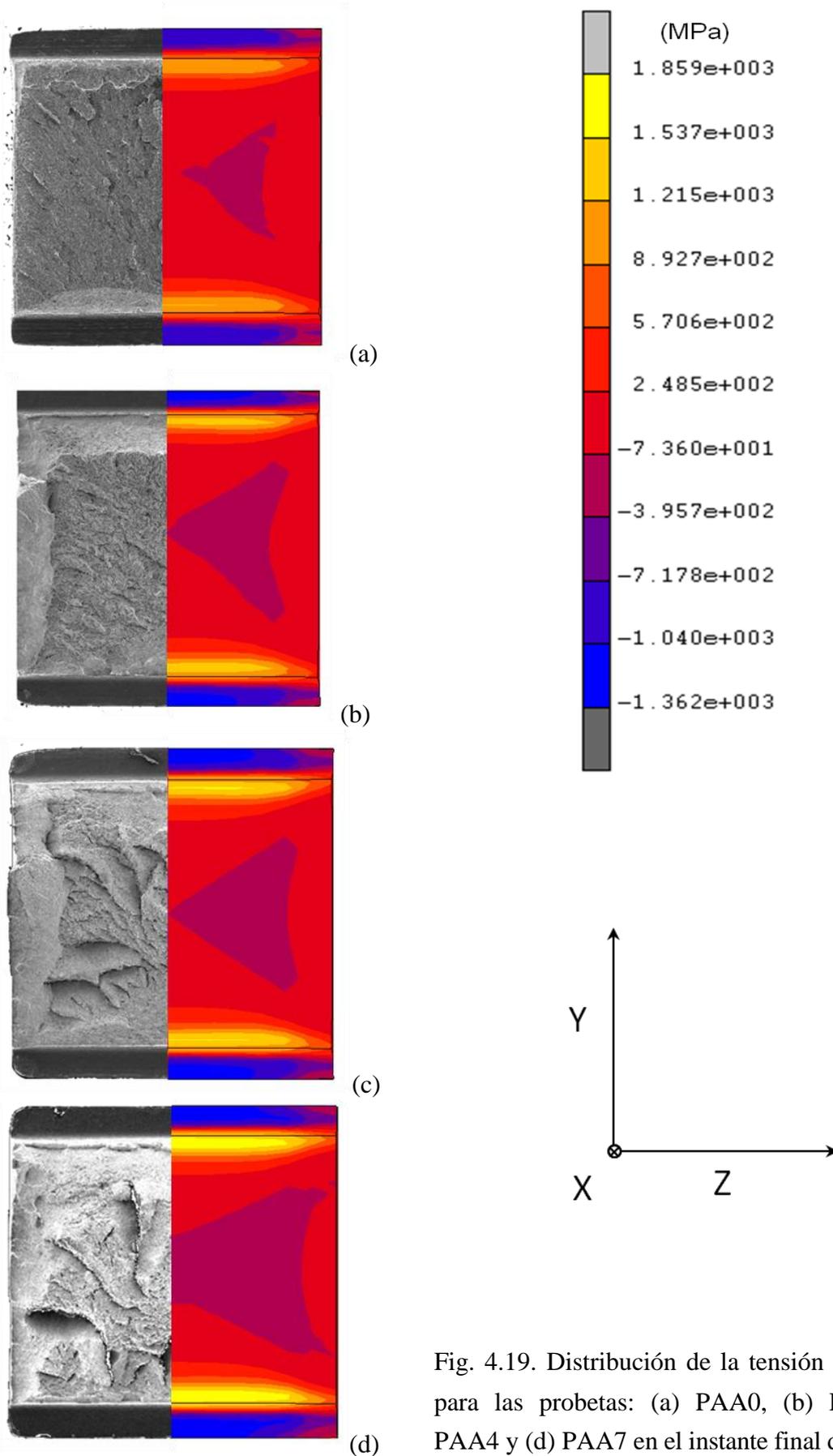


Fig. 4.19. Distribución de la tensión normal σ_z para las probetas: (a) PAA0, (b) PAA3, (c) PAA4 y (d) PAA7 en el instante final de fractura.

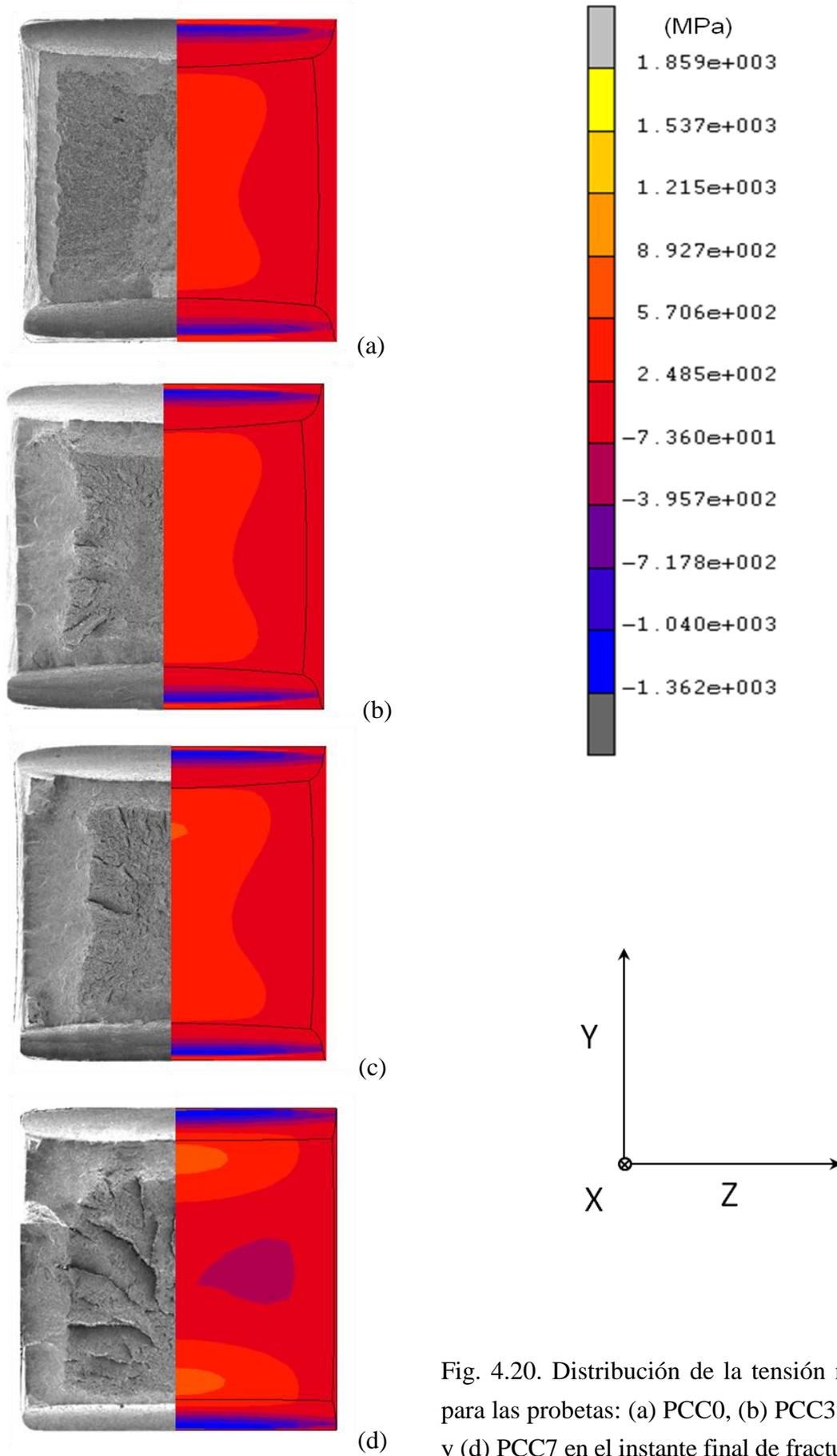


Fig. 4.20. Distribución de la tensión normal σ_z para las probetas: (a) PCC0, (b) PCC3, (c) PCC4 y (d) PCC7 en el instante final de fractura.

En el intervalo de Figs. 4.21 a 4.26 se muestra la distribución de los valores que adquieren la tensión equivalente o efectiva de von Mises (σ_{eq}), la tensión hidrostática (σ) y la deformación plástica equivalente (ϵ_{eq}^P) a lo largo de la sección neta de las probetas (sección en el fondo de entalla) en el instante correspondiente a la fractura final de las probetas. En estas figuras, al igual que en las figuras de la distribución de las tensiones normales, se han incluido (para una mejor comprensión) las superficies de fractura de las probetas analizadas.

Con respecto al estudio de la distribución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises (σ_{eq}), ambos tipos de probetas analizadas han mostrado valores máximos similares, aunque éstos ocupan mayor superficie en las probetas PCC (Figs. 4.21 y 4.22).

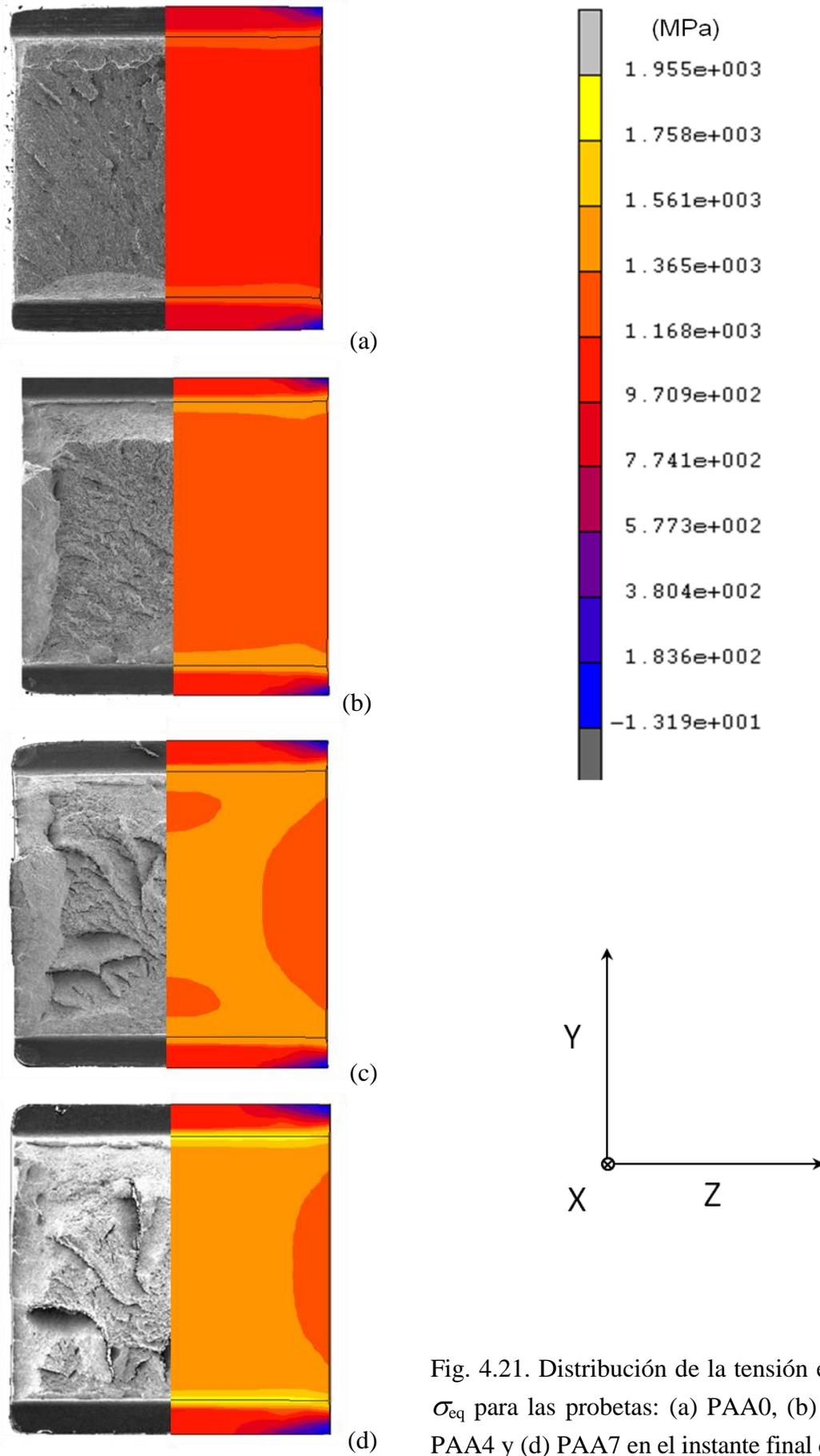
En las probetas PAA los mayores valores se presentan en los fondos de entalla de las mismas y dichos valores aumentan con el aumento del grado de trefilado del alambre (Fig. 4.21). Los niveles de esta tensión en las probetas PCC son máximos en casi toda la superficie de fractura, aunque éstos aumentan a medida que también aumenta el grado de trefilado del alambre estudiado (Fig. 4.22). La probeta PCC7 muestra los mayores valores en la zona central y éstos se distribuyen hasta las proximidades del fondo de entalla.

La tensión hidrostática (σ), obtenida en las distintas probetas (Figs. 4.23 y 4.24) presenta valores más elevados en las probetas tipo PAA, los cuales están situados en los fondos de entalla y aumentan cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre (Fig. 4.23).

En las probetas PCC la tensión hidrostática presenta sus máximos valores en la zona central de la sección neta considerada (Fig. 4.24), y al igual que en las PAA crecen a medida que aumenta el grado de trefilado al que pertenecen las probetas en concreto. Una vez más como excepción se encuentra la probeta PCC7, en la cual los valores máximos se sitúan en las zonas próximas a los fondos de entalla.

En cuanto a las distribuciones de deformación plástica equivalente (ϵ_{eq}^P) obtenida en las distintas secciones netas de las probetas modelizadas (Figs. 4.25 y 4.26), éstas presentan valores mayores en las probetas PCC.

En las probetas PAA y PCC los valores máximos se sitúan en los fondos de entalla y la zona de estos valores máximos parece disminuir a medida que aumenta el grado de trefilado del acero. En las probetas PCC los valores de la deformación disminuyen a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha mecanizado la probeta en cuestión, tal y como se indica en la Fig. 4.26.



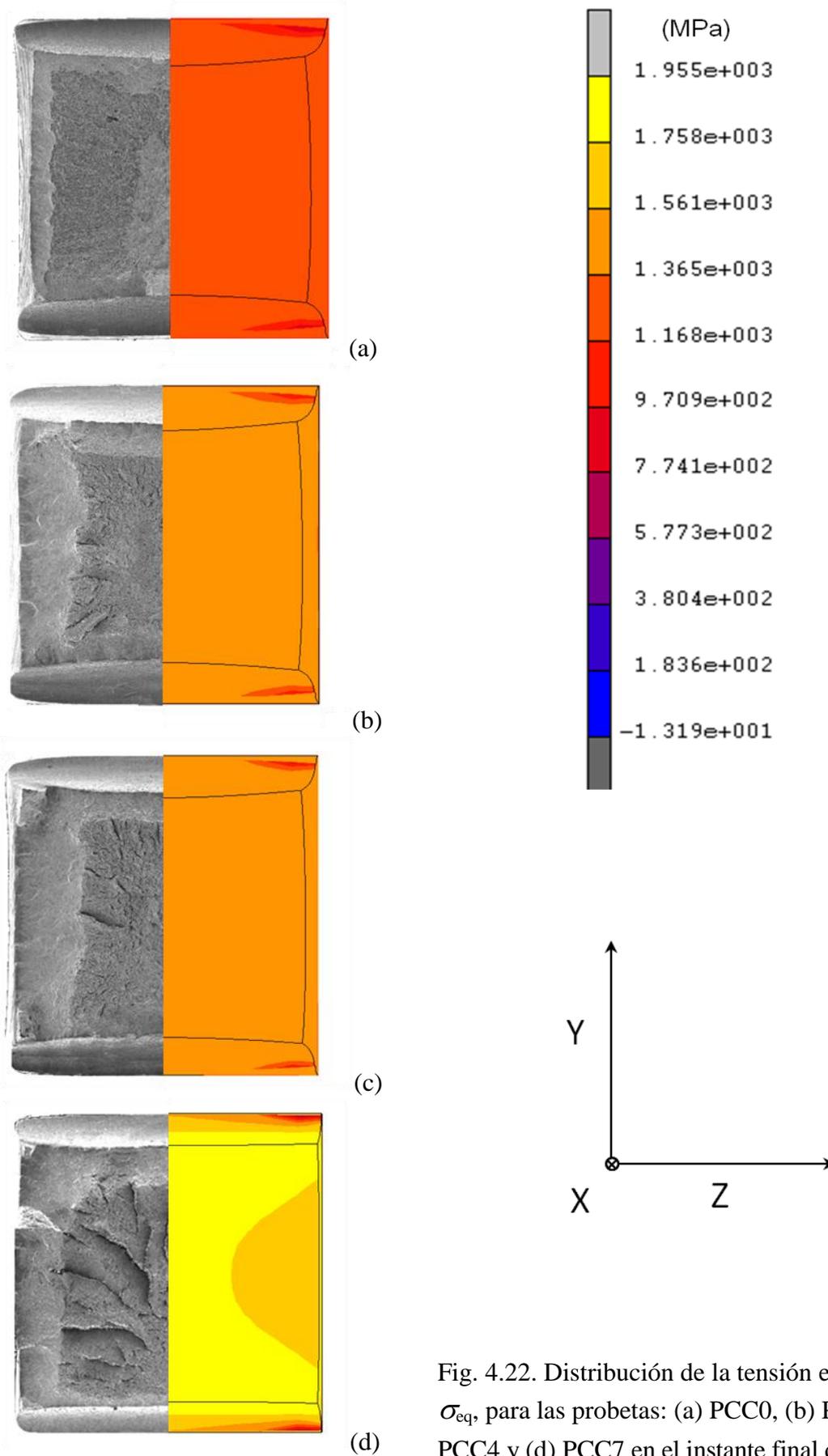


Fig. 4.22. Distribución de la tensión equivalente σ_{eq} , para las probetas: (a) PCC0, (b) PCC3, (c) PCC4 y (d) PCC7 en el instante final de fractura.

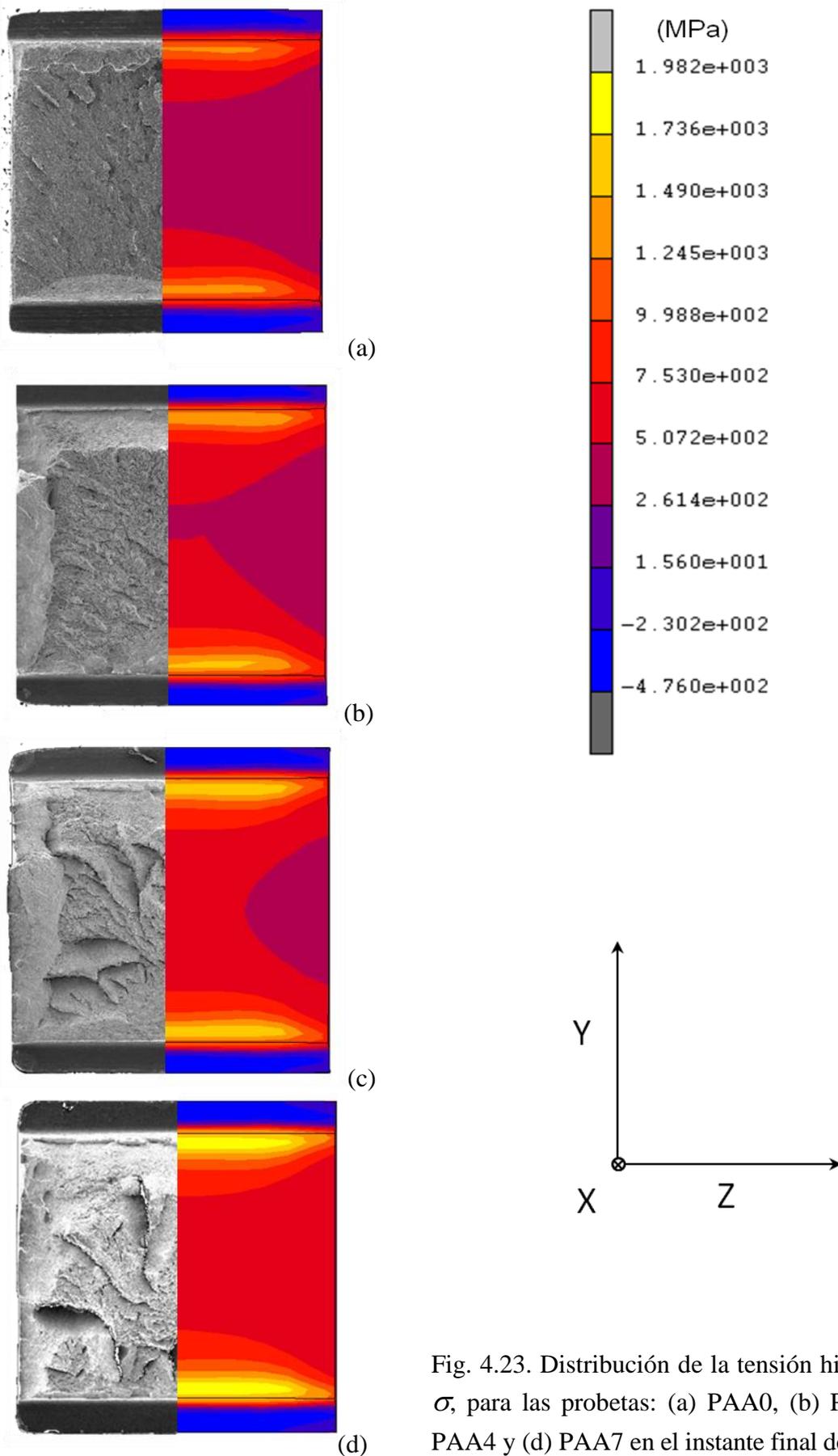


Fig. 4.23. Distribución de la tensión hidrostática σ , para las probetas: (a) PAA0, (b) PAA3, (c) PAA4 y (d) PAA7 en el instante final de fractura.

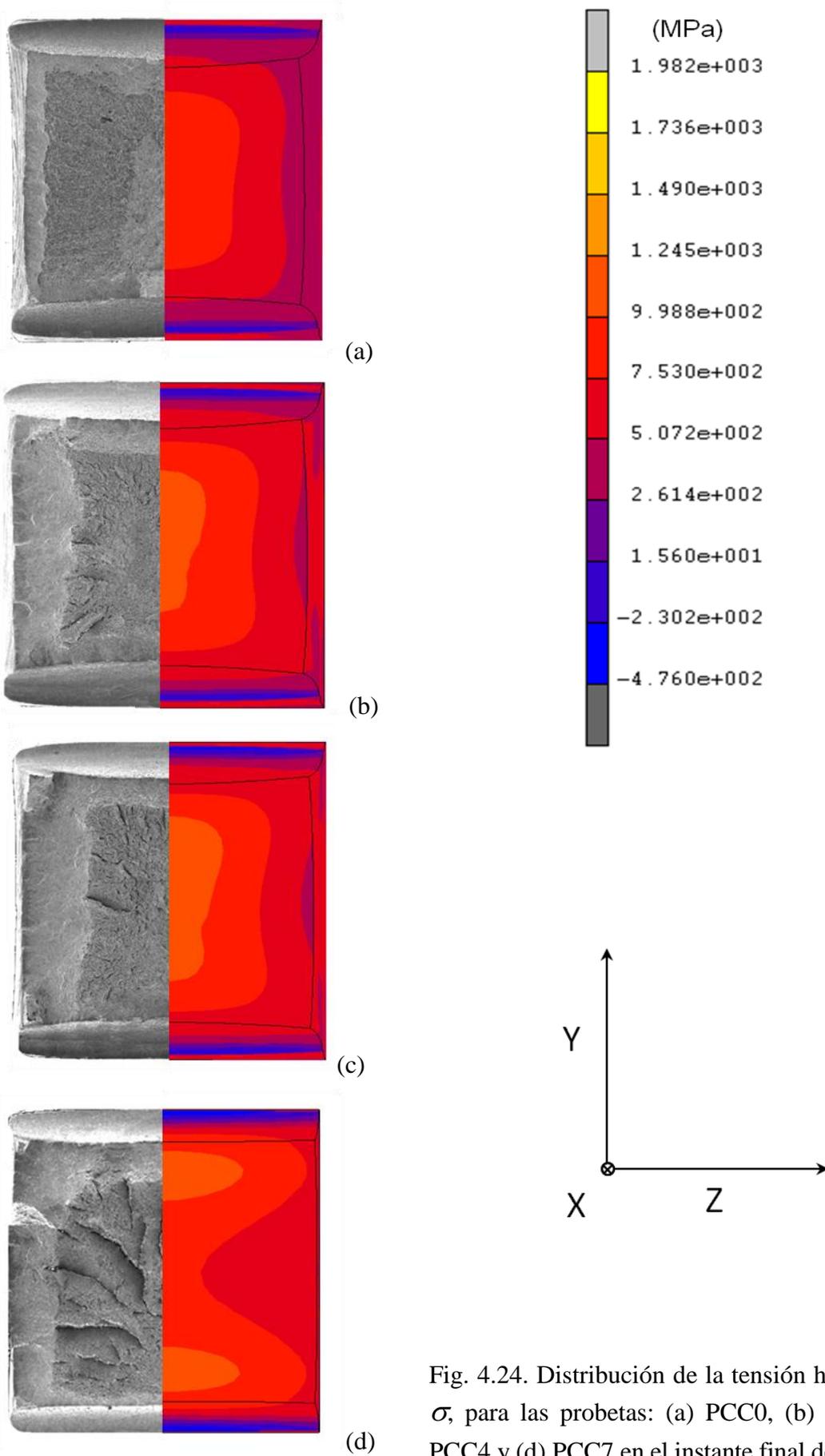
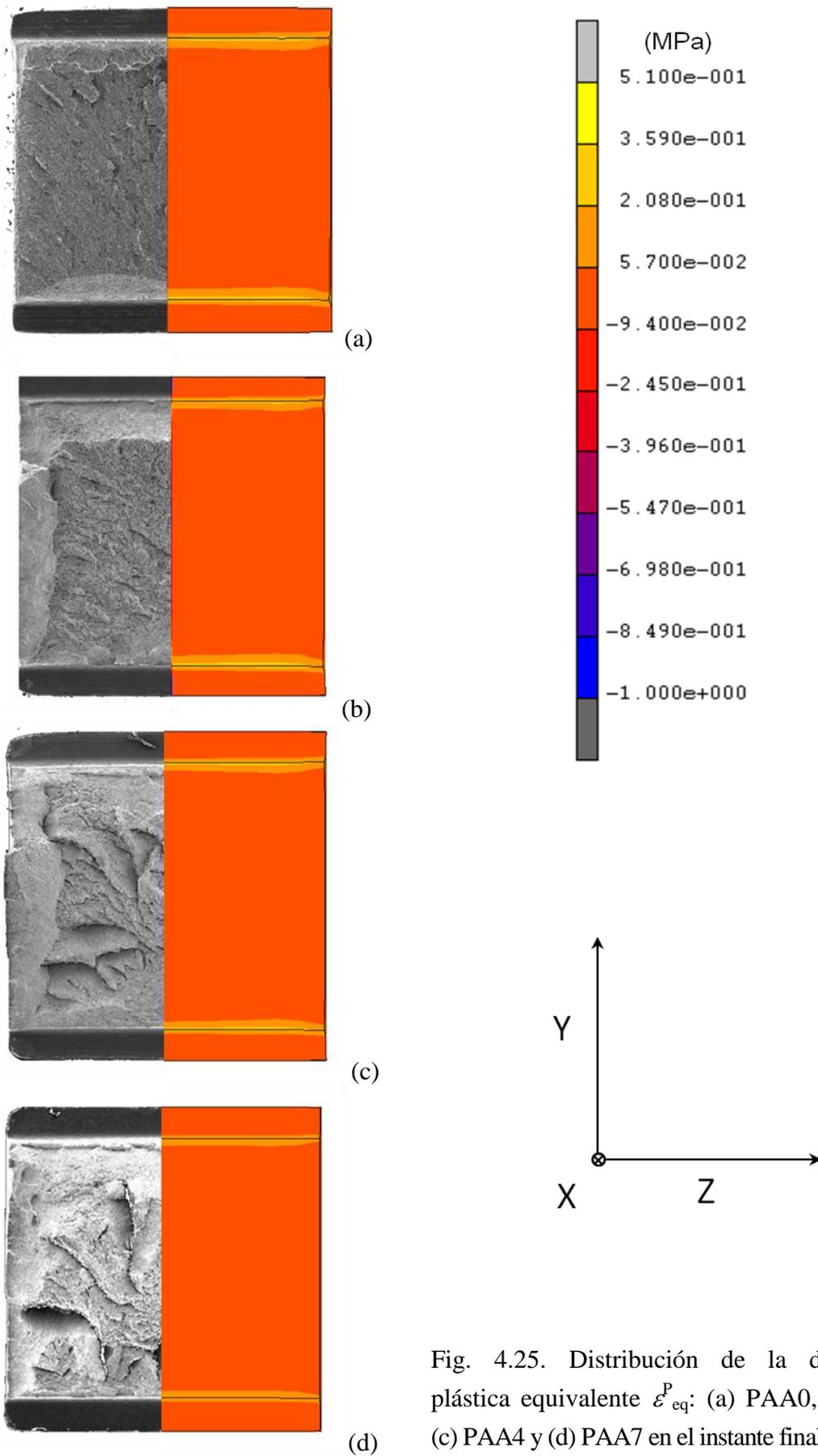
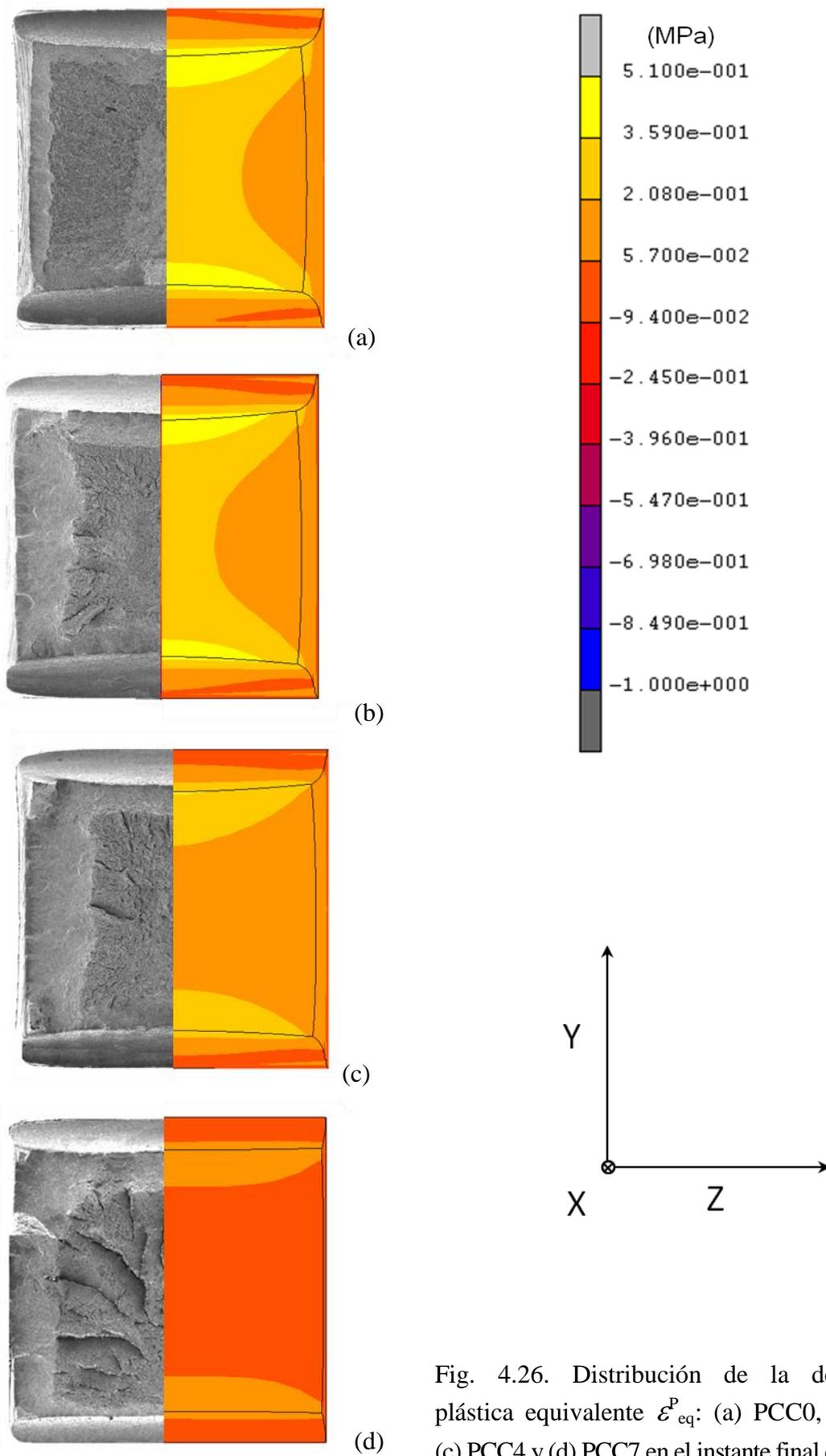


Fig. 4.24. Distribución de la tensión hidrostática σ , para las probetas: (a) PCC0, (b) PCC3, (c) PCC4 y (d) PCC7 en el instante final de fractura.





Se ha obtenido el valor de la triaxialidad a lo largo de los ejes x e y situados en el plano que contiene la sección neta de las probetas (fondo de entalla) y en el momento correspondiente a la fractura final de las probetas por separación total de superficies (Fig. 4.27). La triaxialidad tensional (t) es una medida del constreñimiento al que se encuentra sometido el material debido a la presencia de las entallas e influye claramente en el propio proceso de fractura. Se obtiene mediante la expresión $t = \sigma / \sigma_{eq}$, siendo σ la tensión hidrostática y σ_{eq} la tensión equivalente o efectiva de von Mises, anteriormente citadas. En la Fig. 4.28, se muestra la variación de los valores de la triaxialidad en los ejes y - z para todos los casos de estudio analizados (probetas tipo PAA y PCC).

Como se puede observar en la Fig. 4.28, la triaxialidad es mayor en las proximidades de las entallas para las probetas PAA (menor radio de curvatura), y en el centro de la superficie neta para probetas las PCC (mayor radio de curvatura), siendo mayor en las probetas PAA en el eje y . La triaxialidad presentada por las PAA se mantiene constante con el grado de trefilado, al igual que sucede en las probetas PCC.

Cabe mencionar la disminución de los valores de triaxialidad en la PCC7, con respecto a las probetas analizadas con el mismo tipo de entalla. En el eje z , Fig. 4.28 (b), la triaxialidad es mayor en la superficie para ambos tipos de probeta, siendo en este caso mayor en las PCC. En los valores de triaxialidad en dicho eje se observa un ligero aumento con el aumento del grado de trefilado del alambre de procedencia para ambos tipos de probetas analizadas.

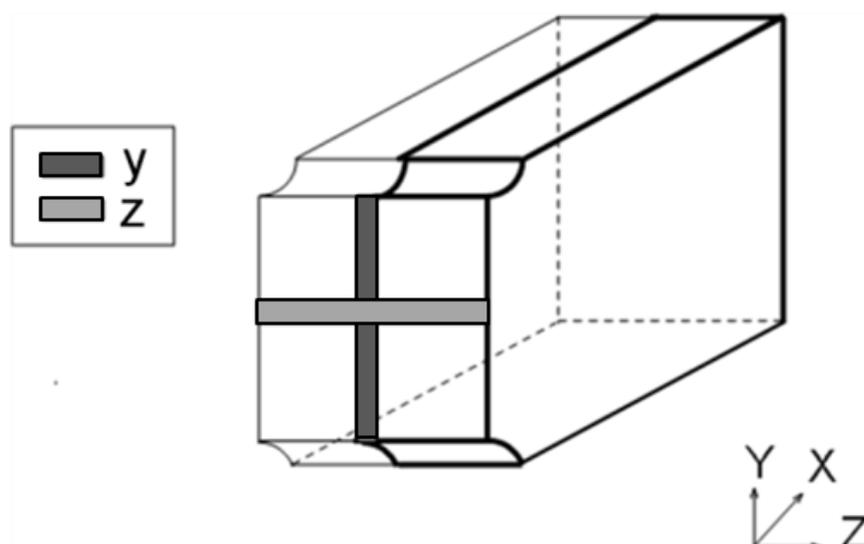


Fig. 4.27. Zonas de extracción de los datos en la sección neta de las probetas PAA y PCC para el cálculo de la triaxialidad tensional t .

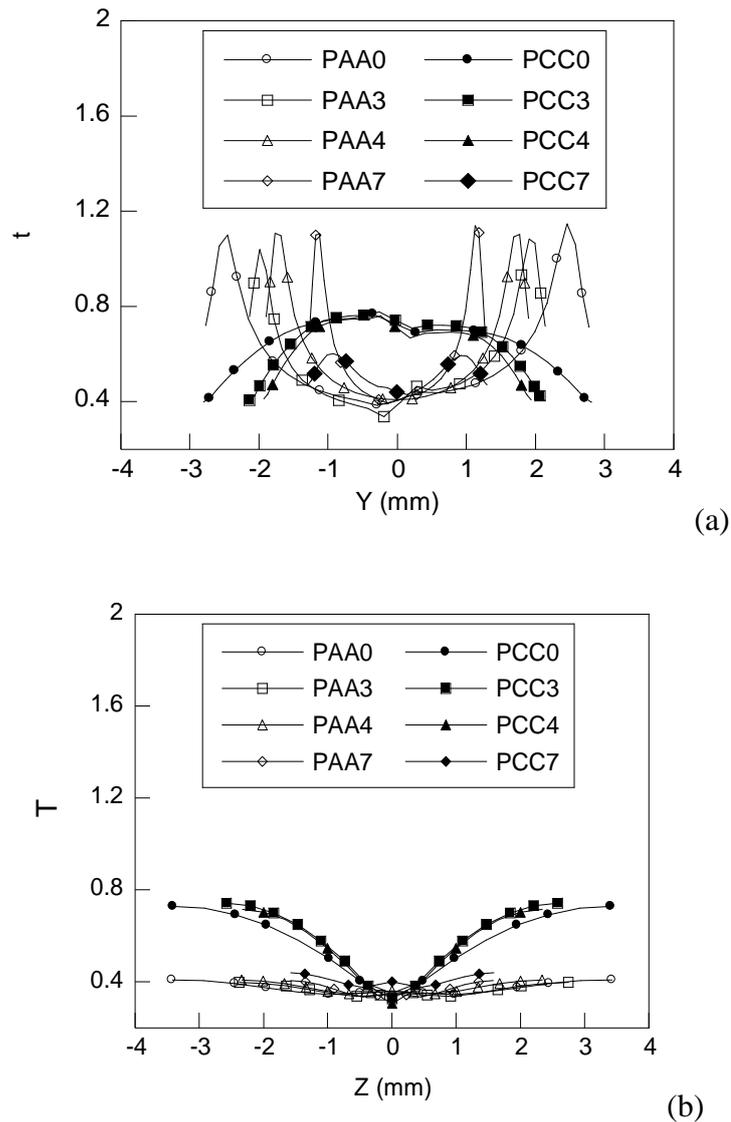


Fig. 4.28. Triaxialidad de las probetas PAA y PCC en: (a) eje y y (b) en el eje z.

1.2. Modelización de micro-defectos generados por las inclusiones

Uno de los objetivos de la presente Tesis se centra en analizar la influencia de los micro-daños generados por las inclusiones en la fractura de los distintos alambres de acero perlítico procedentes de la cadena de trefilado. Para el estudio de dicha influencia se ha optado por modelizar mediante el MEF las inclusiones y el micro-daño correspondiente que se genera en torno a las mismas. Este análisis parte de los estudios de clasificación de inclusiones y sus micro-defectos anteriormente expuestos en el apartado 4.3.1 del capítulo II de la presente Tesis Doctoral.

En dicho capítulo se han clasificado las inclusiones analizadas en tres tipos; *blandas*, *duras* y del *tipo mezcla* según el tipo de composición química de las mismas. Además ha sido realizado un estudio cuantitativo del factor de forma de los micro-defectos producidos por

dichas inclusiones, en el cual se muestran los diferentes factores de forma obtenidos para los distintos tipos de inclusiones analizadas en los distintos alambres que conforman la cadena de trefilado del acero E (Fig. 4.29).

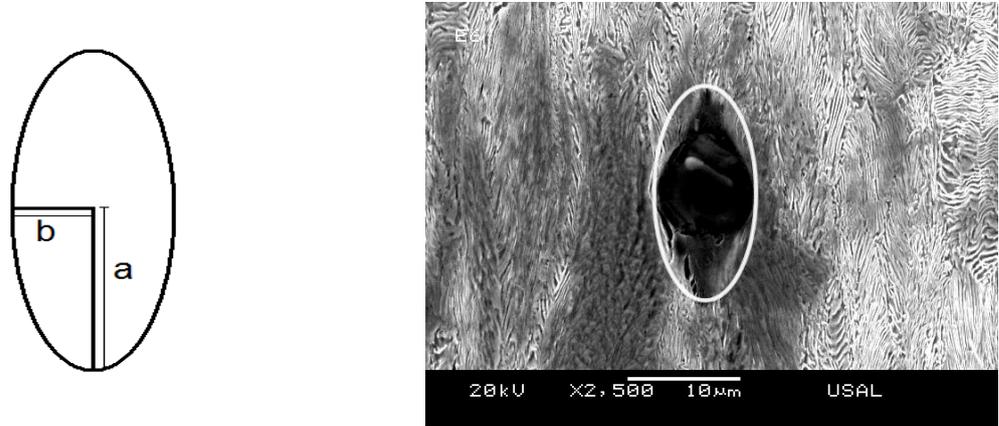


Fig. 4.29. Morfología de la elipse utilizada para determinar el factor de forma.

Para la realización del análisis de la influencia de los micro-defectos generados por las inclusiones en este tipo de probetas prismáticas entalladas se ha partido de las modelizaciones numéricas ya realizadas de las mismas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, extrayendo la información de las zonas donde se producen mayores tensiones y deformaciones, en las cuales los micro-defectos podrían sufrir mayores daños y por lo tanto tener una mayor influencia en la fractura al comportarse éstos como concentradores de tensiones. De esta forma se han realizado modelizaciones paralelas a los cálculos ejecutados, extrayendo de los mismos los elementos de mayor interés junto con los desplazamientos obtenidos de sus nodos, simulando cada uno de ellos como una *celda aislada* en cuanto al resto de la probeta se refiere. En dicha celda seleccionada será introducido el micro-defecto y aplicados los desplazamientos obtenidos en el exterior de la misma durante los ensayos bajo sollicitación de tracción (Fig. 4.30). La elección de este tipo de modelización se ha basado en estudios anteriores en los cuales se analiza también la influencia de las inclusiones en distintos procesos industriales mediante la utilización del MEF (LUO y SÄHLBERG, 2001; YU *et al.*, 2003). Este procedimiento de cálculo, celda aislada, permite la realización de mallas en 3D con un mayor número de elementos, lo cual aumenta la fiabilidad de los resultados y optimiza los recursos informáticos.

En las probetas PAA, como se ha visto anteriormente, la distribución de triaxialidad (t) es opuesta a la encontrada en las probetas PCC, pues en las primeras los máximos valores de triaxialidad se alcanzan en zonas próximas a la entalla, mientras que en las PCC los valores máximos se sitúan en la zona central.

Para estudiar la influencia de la triaxialidad en la variación del factor de forma de dichos micro-defectos se han realizado, de cada una de las probetas seleccionadas, PAA0, PAA7, PCC0 y PCC7, dos cálculos paralelos con dos celdas, una de ellas situada en las proximidades de la entalla y otra situada en la zona central.

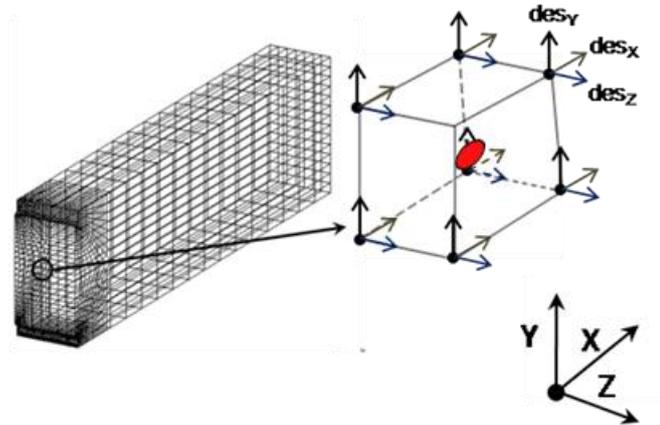


Fig. 4.30. Esquema de extracción de una celda aislada a partir de la malla en la simulación numérica previa de la probeta prismática entallada.

En la modelización numérica de los posibles micro-defectos presentes en los alambres de trefilado de las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, se ha optado por representar dos tipos de dichos micro-defectos, los generados por las inclusiones de *tipo blando* y por las de *tipo duro*, puesto que las inclusiones de tipo mezcla son una combinación de ambos. En dicha modelización los tamaños de las inclusiones y los factores de forma de los micro-defectos escogidos pertenecen a las medias obtenidas de estudios cuantitativos ya comentados y realizados sobre estos mismos alambres de la cadena de trefilado, acero E, a partir de los cuales se han mecanizado dichas probetas. La modelización de micro-defectos generados por inclusiones se ha realizado en las probetas prismáticas procedentes del *alambroń inicial* y del *alambre de pretensado comercial*, es decir alambre sin trefilar y alambre perteneciente al último paso de la cadena de trefilado, de forma que las modelizaciones de los micro-defectos engloben el comportamiento de éstos en probetas procedentes de alambres pertenecientes a pasos intermedios de la cadena de trefilado. En la siguiente Tabla 4.1 se resumen los factores de forma (S) de los micro-defectos introducidos, siendo S la división entre las medidas de los ejes principales de la elipse (a/b) a la cual se aproximan dichos micro-defectos generados por los distintos tipos de inclusiones.

Tabla 4.1. Factor de forma aproximado (S) de los micro-defectos generados por inclusiones.

ACERO	DURAS	BLANDAS
E0	1.4	3.3
E7	3.0	12.0

Para corroborar la fiabilidad de los datos se han obtenido los valores de las tensiones exteriores presentes en la *celda origen* (modelización numérica del ensayo) y *aislada* (modelización numérica de la celda con el micro-defecto). Los valores de las tensiones obtenidos en dichas celdas, *origen* y *aislada*, deberán ser similares ($\pm 5\%$) para considerar la modelización numérica como aceptable. Para ello se han realizado mapas de contorno de la distribución de los valores de la tensión de von Mises en los bordes de la celda origen y en la misma *celda aislada*. Las comprobaciones de éstos se muestran en el anexo IV.

Las modelizaciones de los micro-defectos generados por las inclusiones de *tipo blando* se han realizado sin la presencia de la propia inclusión dentro del micro-defecto, puesto que estas inclusiones apenas oponen resistencia a la libre deformación del mismo. Según los estudios anteriores realizados por otros investigadores sobre las inclusiones de tipo blando (MnS), éstas poseen módulos de Young muy inferiores a los del acero objeto de estudio [YU *et al.*, 2003]. Dicha modelización de los micro-defectos generados por inclusiones de *tipo blando* se ha realizado para evitar dos tipos de problemas, uno en referencia a las excesivas deformaciones experimentadas por éste tipo de inclusiones, y para evitar problemas de contacto entre las mallas generadas debido a esas grandes deformaciones, además de reducir de manera sustancial el tiempo de cálculo y los recursos informáticos utilizados. Sin embargo en las modelizaciones de los micro-defectos generados por inclusiones de *tipo duro* se han incluido en el cálculo inclusiones con morfología esférica separadas del micro-defecto 0.0002 mm para evitar así problemas de contacto iniciales entre la matriz y la inclusión y se ha supuesto que dicha inclusión de tipo duro posee un modulo de Young de 352 GPa así como un coeficiente de Poisson de 0.24 basándose en estudios ya realizados [YU *et al.*, 2003]. Como se ha observado en las micrografías analizadas dichas modelizaciones coinciden con los micro-defectos encontrados, viéndose en éstas inclusiones de tipo blando totalmente adaptadas a la matriz circundante de colonias de perlita, y también observándose separaciones entre la matriz del acero y las inclusiones de tipo duro, Fig. 4.31.

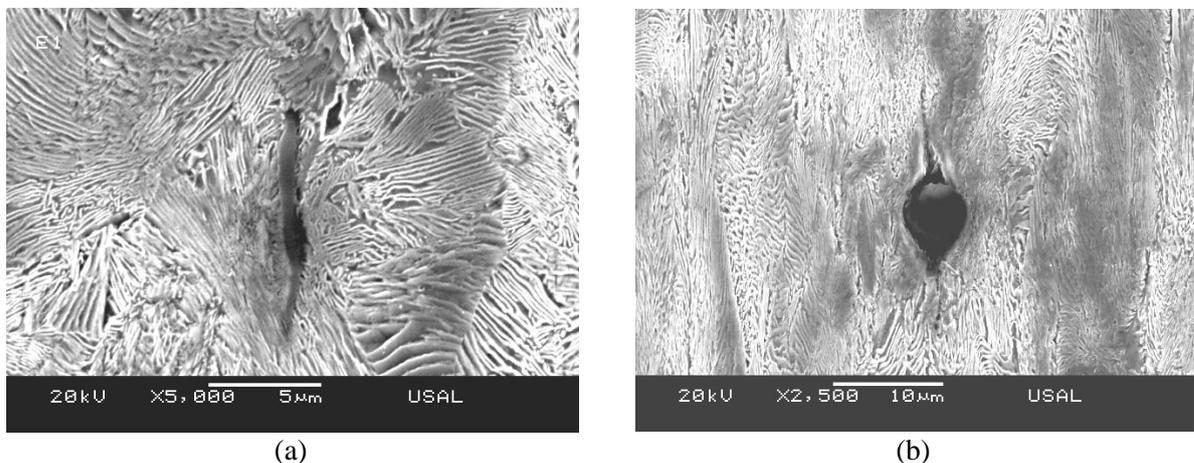


Figura 4.31. Micro-defectos generados por inclusiones de tipo (a) blando y (b) duro.

En cuanto al tamaño del eje menor de la elipse (b) a la cual se han aproximado los micro-defectos generados por inclusiones de *tipo duro* y de *tipo blando*, se ha optado por utilizar el tamaño medio de las inclusiones observadas en dichos aceros, siendo esta media una medida representativa de los distintos tamaños de micro-defectos e inclusiones analizados. Para las inclusiones de *tipo duro* con morfología esférica el tamaño considerado ha sido de 0.0018 mm, mientras que para ambos tipos de micro-defectos la altura de los mismos ha sido de 0.002 mm, aplicando a dicha altura el factor de forma correspondiente en la dirección del eje x del alambre. Todos los micro-defectos modelizados numéricamente se han centrado en el interior de la celda extraída, calculándose para las distintas morfologías de las celdas la ubicación exacta del micro-defecto. En el caso de la representación de micro-defectos con inclusiones de *tipo duro*, también se ha optado por ubicar la inclusión en el centro del micro-defecto generado por la misma, Fig. 4.32. De esta forma de cada una de las probetas modelizadas, el alambroón inicial y alambre de pretensado comercial, se ha obtenido la variación de los micro-defectos generados por las inclusiones de *tipo duro* y de *tipo blando*, tanto en las proximidades de la entalla como en la zona centro de la misma. Debido a los cambios morfológicos producidos en dichas modelizaciones numéricas de los micro-defectos, los cuales incluyen deformaciones en los tres ejes principales las mediciones de los factores de forma finales, se han realizado extrayendo los datos de los extremos más alejados, tanto en la dirección del eje x como en el eje y en las morfologías de partida.

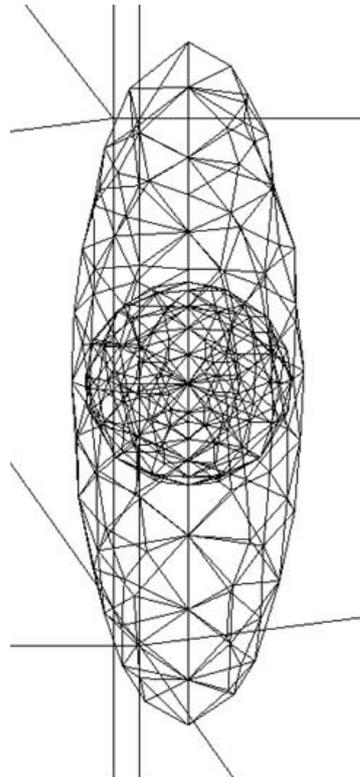


Fig. 4.32. Simulación de inclusión de *tipo duro* y su micro-defecto.

Si se toma como factor de forma final $S'=a'/b'$ y $S=a/b$ como factor forma inicial del micro-defecto generado por la inclusión, la diferencia entre éstos representará el cambio morfológico sufrido por dicho micro-defecto durante el ensayo bajo sollicitación de tracción al cual han sido sometidas las probeta objeto de estudio. A continuación se muestran los resultados obtenidos de la diferencia entre los factores de forma iniciales y finales de los micro-defectos para ambos tipos inclusiones analizadas y para las dos zonas de ubicación de los mismos, proximidades de entalla y zona central, Tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2. Diferencia de los factores de forma de los micro-defectos ($S'-S$) ubicados en el centro de la superficie neta modelizada numéricamente.

$\Delta S=S'-S$	DURA	BLANDA
PAA0	0.06	0.10
PAA7	0.05	0.19
PCC0	0.60	1.67
PCC7	0.24	0.40

Tabla 4.3. Diferencia de los factores de forma de los micro-defectos ($S'-S$) ubicados cerca de las proximidades de la entalla.

$S'-S$	DURA	BLANDA
PAA0	0.17	0.38
PAA7	0.06	0.30
PCC0	0.67	2.01
PCC7	0.21	0.36

Como se ha podido observar en los distintos factores de forma analizados, los mayores cambios morfológicos se producen en los micro-defectos presentes en las probetas PCC para ambos tipos de inclusiones modelizadas y en ambas ubicaciones seleccionadas, zona central y proximidades de entalla, Fig. 4.33. Cabe señalar la mayor variación para ambos tipos de probetas analizadas se produce en las probetas procedentes del alambroón inicial, tanto en los micro-defectos modelizados en la zona central, como en los modelizados en las proximidades de la entalla. El mayor cambio morfológico se produce en aquellos micro-defectos modelizados numéricamente correspondientes a las inclusiones de *tipo blando* en las PCC0.

La evolución de los factores de forma en las probetas pertenecientes al alambre de pretensado comercial PAA7 y PCC7 presenta variaciones similares de los micro-defectos para ambos tipos de inclusiones, en contraposición a los modelizados para las probetas PAA0 y PCC0 en los cuales las diferencias son significativas para las diferentes ubicaciones examinadas.

El cambio morfológico del factor de forma lleva consigo mayores concentraciones de tensiones producidas en los bordes de los micro-defectos, sin embargo cabe señalar que las

mayores variaciones de tensiones vienen producidas por la resistencia a la deformación del micro-defecto que generan las inclusiones de tipo duro.

En las siguientes Figs. 4.34-4.36 se han representado las variaciones más significativas de la tensión hidrostática y de von Mises, puesto que dichas variables internas determinan la triaxialidad producida en los diferentes ejes principales de las modelizaciones de éstos micro-defectos. Con los cortes sobre los planos principales realizados sobre las modelizaciones de dichos micro-defectos se ha observado cómo tanto la tensión de von Mises como la hidrostática poseen distribuciones similares en todos los casos estudiados, independientemente de la ubicación y del tipo de inclusión que genera el micro-defecto, siendo esta distribución con valores mayores en la zona central del micro-defecto en el plano yz y disminuyendo dichos valores gradualmente a ambos lados de la misma hasta hacerse mínimos en los extremos, como se observa en la Fig. 4.34, correspondiente a diferentes planos de corte del micro-defecto simulado en las proximidades de la entalla de la PAA7.

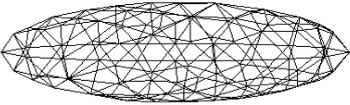
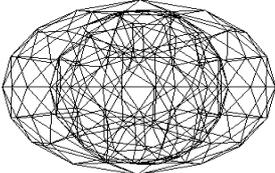
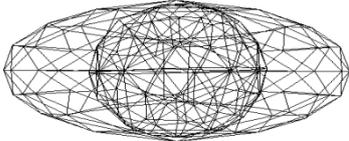
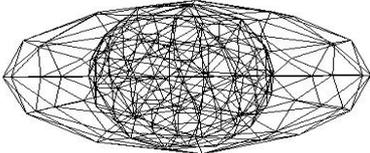
ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO	
 <p data-bbox="328 1227 579 1256">INCLUSIÓN BLANDA</p>		(a)
		(b)
 <p data-bbox="344 1641 563 1671">INCLUSIÓN DURA</p>		(c)
		(d)

Fig. 4.33. Micro-defectos generados por inclusiones del *tipo blando* y de *tipo duro* en la PCC0, antes y después del ensayo bajo sollicitación de tracción, en la sección neta de la probeta: (a) y (c) zona central, (b) y (d) zona próxima a la entalla.

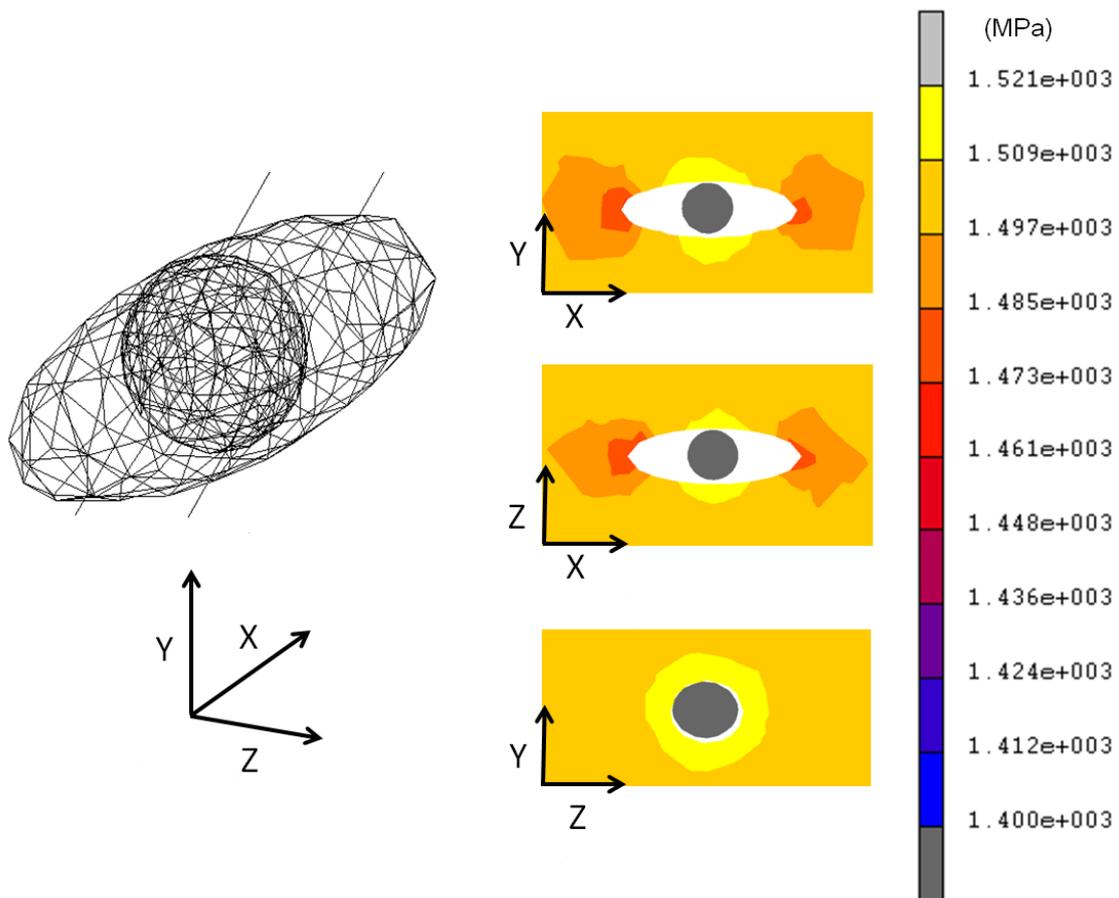


Fig. 4.34. Distribución de la tensión de σ_{eq} en el micro-defecto generado por inclusiones de tipo duro para una probeta PAA7 y en las proximidades de la entalla.

Los micro-defectos generados por las inclusiones de tipo duro se ha determinado que tienen una mayor relevancia global, puesto que en las modelizaciones numéricas realizadas se han obtenido valores superiores tanto de la tensión de von Mises como de la hidrostática en los bordes de éste, tensiones las cuales son superiores a las encontradas en las inmediaciones de las celdas origen. Cabe señalar como excepción los micro-defectos modelizados en las probetas PCC7 [Fig. 4.35 (b)] en los cuales aquellos generados por las inclusiones de tipo duro presentan unas variaciones de tensiones similares a las de la celda origen y en algún caso ligeramente superiores.

Los valores mayores registrados con respecto a la celda origen, así como en la comparativa con los valores obtenidos del resto de modelizaciones de micro-defectos, se han obtenido, en ambos tipos de probetas entalladas, en las procedentes del alambre de pretensado final, Figs. 4.35 y 4.36. Éstas corresponden a las modelizaciones de micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro en las zonas próximas a la entalla.

A continuación se muestran diferentes planos de corte en los cuales aparece la distribución de los valores de la tensión equivalente o efectiva de von Mises (Fig. 4.35) y de la tensión hidrostática (Fig. 4.36) en los micro-defectos generados por las inclusiones de tipo duro en las probetas anteriormente mencionadas.

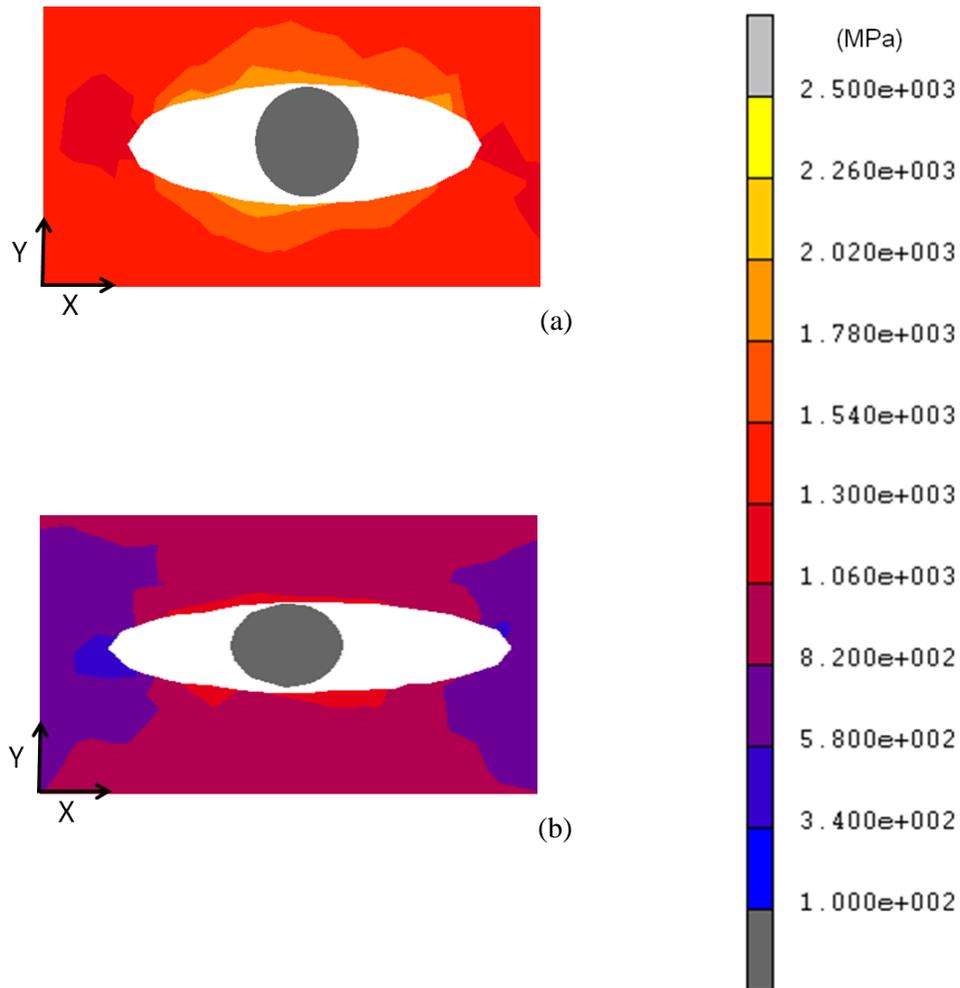


Fig. 4.35. Distribución de σ en micro-defectos de tipo duro en las proximidades de la entalla para las probetas (a) PAA7 y (b) PCC7.

Como se observa en las figuras anteriores pertenecientes de los micro-defectos generados por las inclusiones de tipo duro en los elementos de mayor triaxialidad de las probetas PAA7 y PCC7, los mayores valores de tensión de von Mises se encuentran en las PAA7, mientras los máximos valores de la tensión hidrostática se muestran en la PCC7. Este hecho era de esperar debido a las tensiones analizadas en el elemento de origen, puesto que la mayor triaxialidad se ha obtenido en las probetas PAA7.

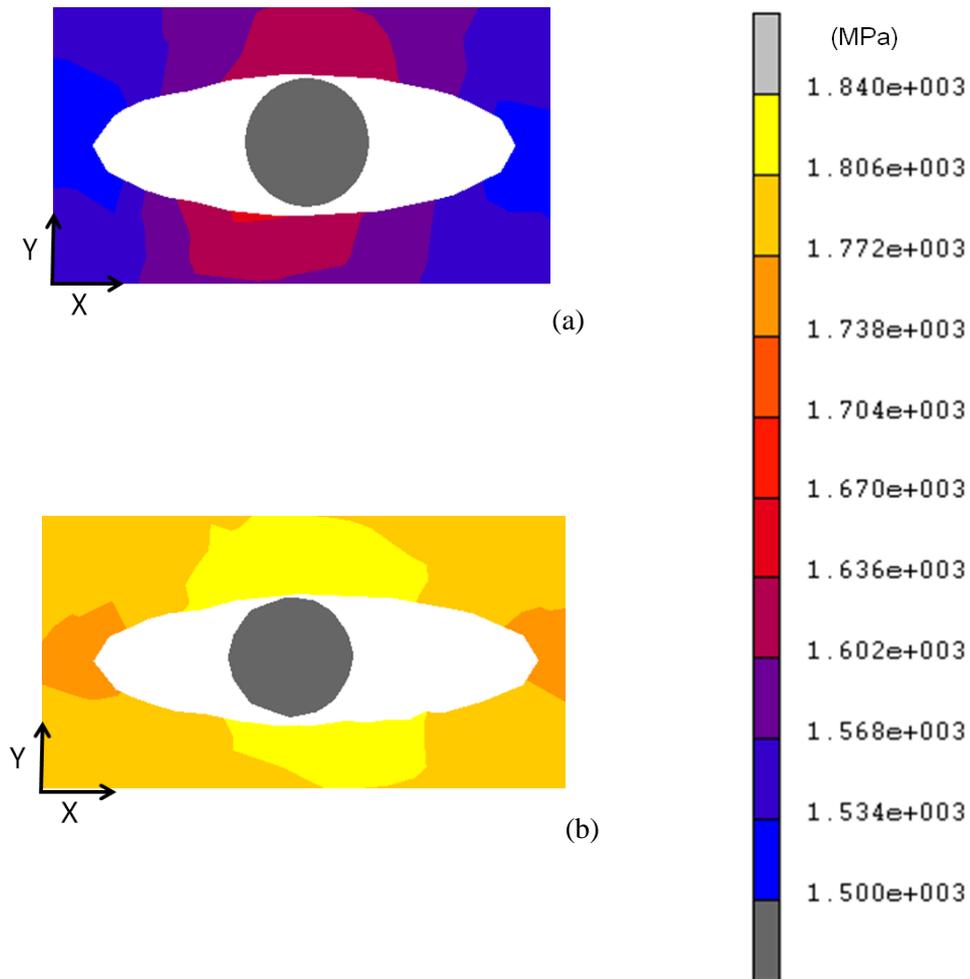


Fig. 4.36. Distribución de σ_{eq} en micro-defectos de tipo duro en las proximidades de la entalla para las probetas (a) PAA7 y (b) PCC7.

2. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURA A TRACCIÓN EN PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS DE ACERO PERLÍTICO

2.1. Modelización como medio continuo

En el capítulo anterior se estudió el comportamiento del material en fractura para cuatro tipos de probetas axisimétricas entalladas (entallas tipo A, B, C y D) en función de las *variables externas* obtenidas de los ensayos de fractura mediante la máquina de ensayo, reflejándose las curvas $F-u$ en las gráficas estudiadas en el apartado 5.2 del capítulo II de la presente Tesis. Posteriormente se ha realizado un análisis fractográfico de las mismas, apartado 3 del capítulo III, en el cual se han analizado de forma cuantitativa y cualitativa las distintas zonas presentes

en la superficie de fractura de las diferentes probetas analizadas, así como las micrografías obtenidas de éstas.

En éste apartado se realiza un estudio por medio de la utilización del MEF, los cuales van a permitir el cálculo de *variables internas* (tensiones y deformaciones) que complementarán los estudios anteriores, permitiendo establecer criterios de fractura para cada acero en función del paso de trefilado y del tipo de entalla correspondiente.

Como se ha comentado en el apartado anterior, en el cual se ha realizado la modelización numérica de probetas prismáticas entalladas sometidas bajo sollicitación de tracción, para la obtención de las variables internas se ha empleado un programa de cálculo (MARC®) el cual se fundamenta en el MEF.

Al igual que sucedía en la modelización numérica de los ensayos bajo sollicitación de las probetas prismáticas entalladas, en estas simulaciones también se consideran dos no linealidades dentro del problema objeto de cálculo. Por un lado la no linealidad se introduce en el análisis para incluir el comportamiento elastoplástico del material durante el ensayo bajo sollicitación de tracción y por otro parte la segunda no linealidad se debe a considerar en el análisis las grandes deformaciones que se producen en el alambre durante dicho ensayo.

De igual forma, para la realización de la simulación numérica mediante el MEF de los ensayos bajo sollicitación de tracción de probetas axisimétricas se ha introducido el comportamiento elastoplástico del alambión inicial, de los alambres pertenecientes al cuarto paso del proceso y alambre de pretensado comercial, dependiendo del caso de estudio a analizar, así como el modulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν), la curva de comportamiento plástico y el criterio de plastificación. Estos datos se han extraído de caracterizaciones mecánicas de estos aceros realizadas por el GIFIE de la USAL.

Las curvas de comportamiento utilizadas para los distintos alambres procedentes de los diferentes pasos del proceso de trefilado son las mismas que las utilizadas en las modelizaciones de las probetas prismáticas entalladas, véase Fig. 4.1, siendo el primer punto de ésta el correspondiente a la tensión a la que se inician las deformaciones plásticas ($\epsilon_p=0$). Los datos utilizados para dicha simulación, de cada alambre correspondiente a cada paso del proceso de trefilado, se muestran en el capítulo I dentro de material utilizado, Acero E. El criterio de plastificación utilizado en todos los casos de simulación es el de von Mises.

La modelización de las distintas probetas estudiadas, pertenecientes al alambión inicial, cuarto paso y alambre de pretensado comercial, con los cuatro tipos de entallas, A, B, C y D,

se ha realizado teniendo en cuenta las medidas reales de las mismas, es decir incorporando a dichas geometrías los errores cometidos durante el mecanizado de éstas, anexo II. La geometría de las probetas objeto de estudio posee dos planos de simétrica, de forma que se ha representado 1/4 de la probeta de partida para todos los tipos de entalla analizados, tal y como se muestra en la siguiente Fig. 4.37.

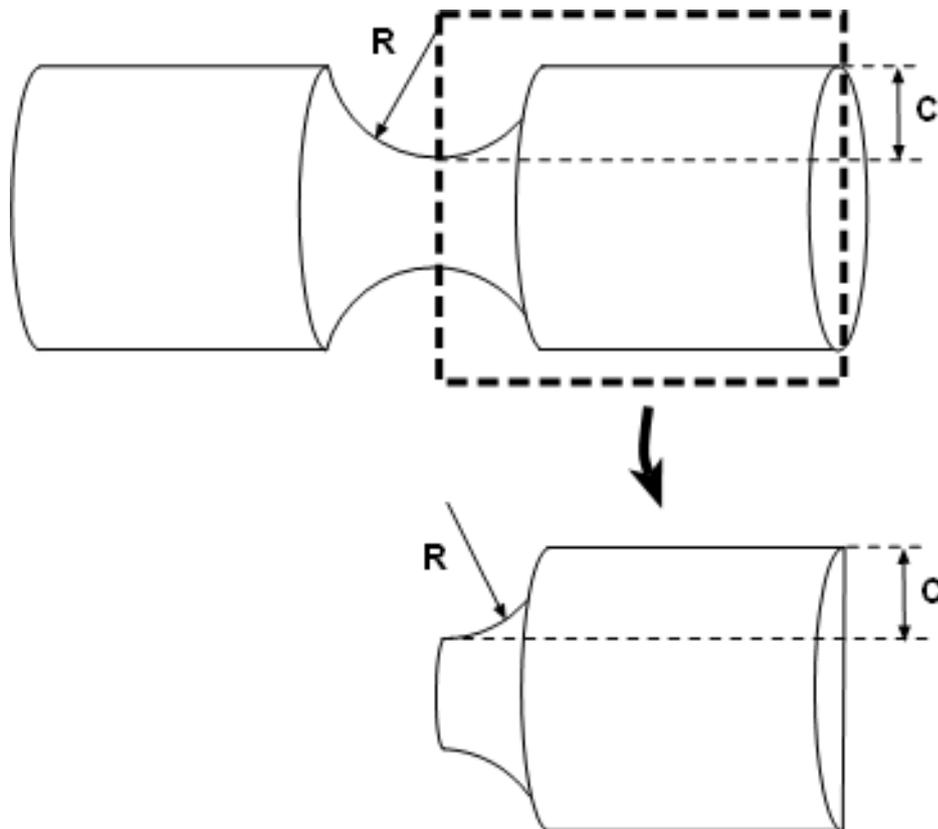


Fig. 4.37. Secciones utilizadas para el cálculo mediante el método de los elementos finitos (MEF) de las probetas entalladas axisimétricas.

Una vez seleccionadas las secciones geométricas de cálculo se aplica a éstas las condiciones de contorno debidas a la geometría de partida esquematizadas en la Fig. 4.38 en la cual se muestra un desplazamiento impedido en la dirección del eje y situado en la fibra neutra de la probeta, Fig. 4.38(a), otro de los desplazamientos impedidos, en este caso en el eje x , impuesto en la sección de corte de dicha probeta, sección media de la entalla [Fig. 4.38(b)] y por último otro de los desplazamientos impedidos esta vez en eje z situado en el plano de corte longitudinal [Fig. 4.38(c)].

Los desplazamientos impedidos se han tomado como condiciones de contorno en todas las probetas axisimétricas. En todos los casos de estudio se ha aplicado como condición de contorno fundamental y representativa de cada ensayo la mitad del desplazamiento registrado

por el extensómetro ($u/2$) en la dirección del eje x obtenido de los ensayos bajo sollicitación de tracción realizados [Fig. 4.38 (d)].

El MEF, como se ha comentado en el apartado I del presente capítulo, es un método aproximado en el cual el grado de aproximación aumenta con el número de elementos en los que se divide el material. Para corroborar el grado de aproximación es necesario realizar dos tipos de convergencias en los cálculos la primera de ellas en referencia al número de elementos denominada *convergencia de malla* y la segunda a la discretización del tiempo de cálculo denominada *convergencia numérica*.

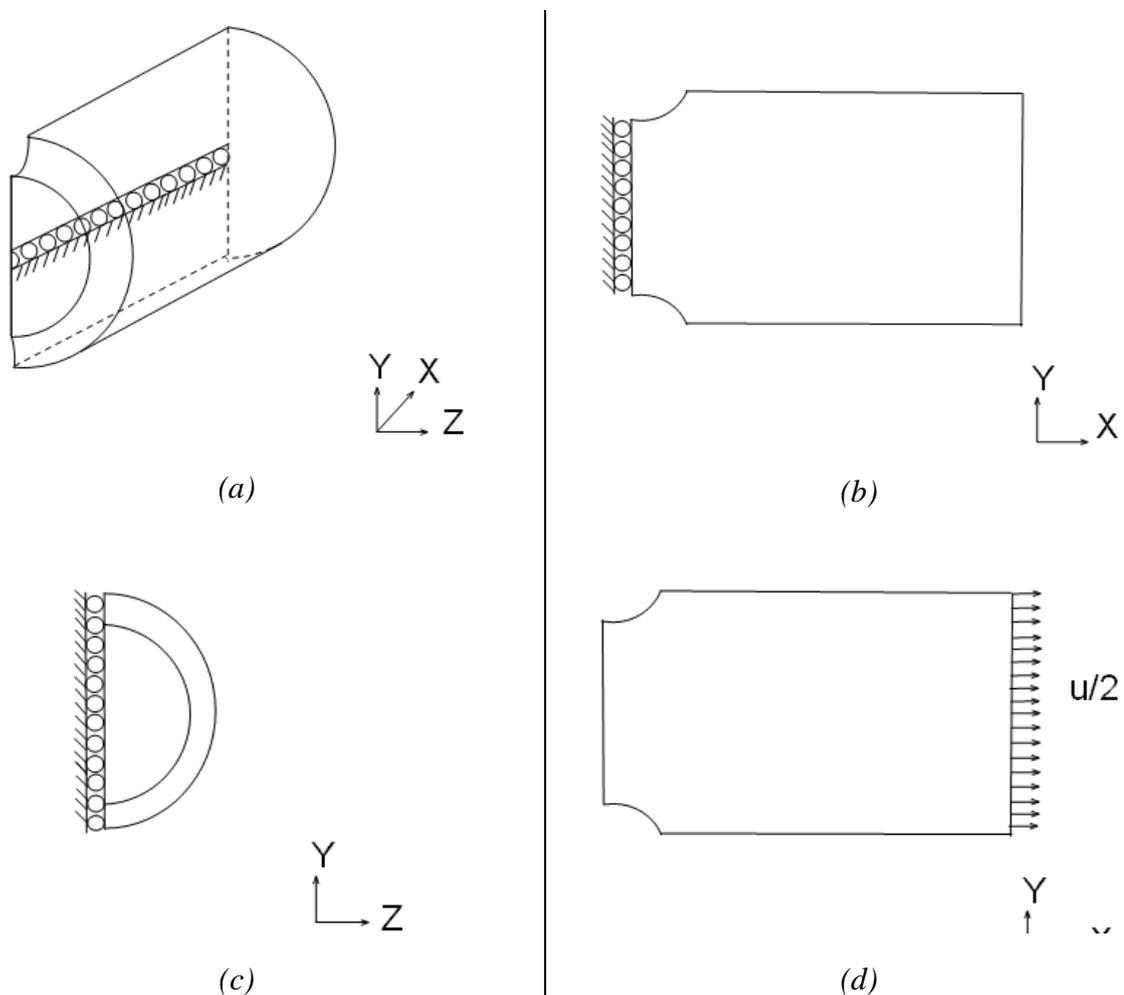


Fig. 4.38. Condiciones de contorno de la simulación numérica de las probetas axisimétricas: (a) desplazamiento impedido en el eje y , (b) desplazamiento impedido en el eje x , (c) desplazamiento impedido eje z y (d) eje x , condición de ensayo $u/2$.

Para llevar a cabo las convergencias, necesarias para ratificar los cálculos realizados, se ha optado por realizar éstas en el alambroón inicial y en el alambre de pretensado comercial, de

igual forma que en el caso de la modelización de las probetas prismáticas entalladas, teniendo en cuenta que la validez de las mallas y tiempos de cálculo en estas simulaciones numéricas implica la validación de las mismas en los alambres intermedios, en este caso del cuarto paso del proceso de trefilado.

Como conclusiones de la realización de dichas convergencias, las cuales implican la variación del número de elementos que conforman la malla de la probeta y la variación de los incrementos de tiempo en los cuales se dividen los cálculos, se ha optado por utilizar mallas compuestas por 10000 elementos y 500 incrementos de tiempo.

Tras la realización de los distintos cálculos mediante el MEF, modelizando numéricamente los ensayos objeto de estudio para los cuatro tipos de entalla, se procedió a la segunda verificación de los mismos, la cual consiste en comparar las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos, *curvas experimentales*, con las con las curvas $F'-u'$ obtenidas en las simulaciones correspondientes, *curvas numéricas*. Las comparaciones entre ambos tipos de curvas se han representado para todas las probetas axisimétricas analizadas, Figs. 4.39-4.42.

Las gráficas ratifican los cálculos de los ensayos realizados mediante MEF, observándose en éstas como las curvas $F-u$ experimentales obtenidas de los ensayos realizados bajo sollicitación de tracción coinciden con las curvas $F'-u'$ numéricas extraídas de las modelizaciones realizadas. Cabe señalar como a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha mecanizado la probeta, las comparativas entre las curvas $F-u$, experimental y numérica, muestra menores diferencias para ambos todos los tipos de probetas estudiadas. Estas verificaciones dan validez a los datos de las variables internas obtenidos los cuales se estudiarán a continuación.

Una vez verificadas las modelizaciones numéricas de los ensayos de probetas axisimétricas bajo sollicitación de tracción se han extraído las siguientes variables en el instante final de la fractura; tensiones en los ejes principales (σ_x , σ_y y σ_z), tensión equivalente de von Mises (σ_{eq}), tensión hidrostática (σ) y deformación plástica equivalente (ϵ_{eq}^P).

A continuación se exponen las fractografías de las probetas tipo de cada terna analizada acompañadas de los mapas de contorno de las variables internas, las cuales han sido extraídas de las modelizaciones numéricas correspondientes a cada una de las probetas en cuestión, Figs. 4.43-4.66. En dichas figuras se observa la distribución de las diferentes variables analizadas así, como el cambio morfológico sufrido por la superficie de fractura de la probeta.

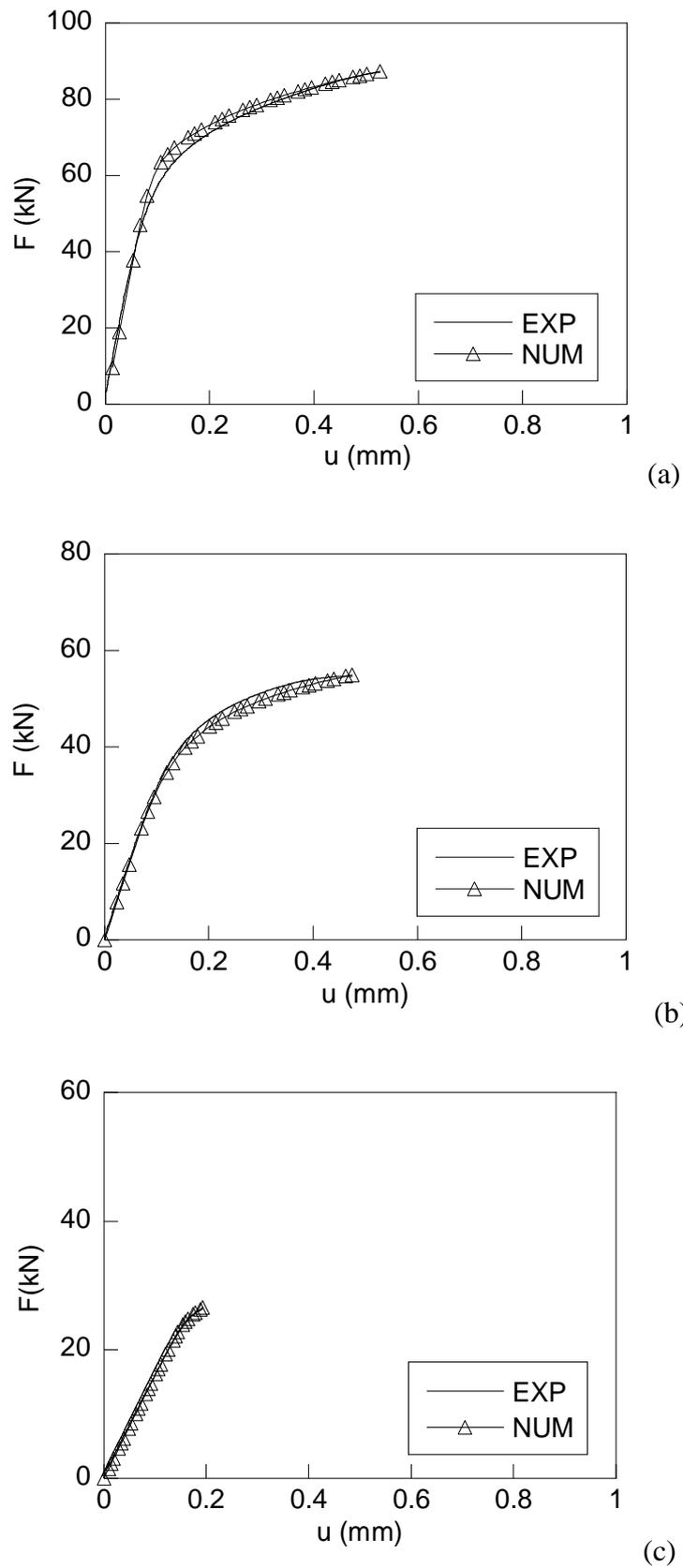


Fig. 4.39. Comparación de las curvas $F-u$, experimental y numérica, para las probetas entalladas axisimétricas: (a) A0, (b) A4 y (c) A7.

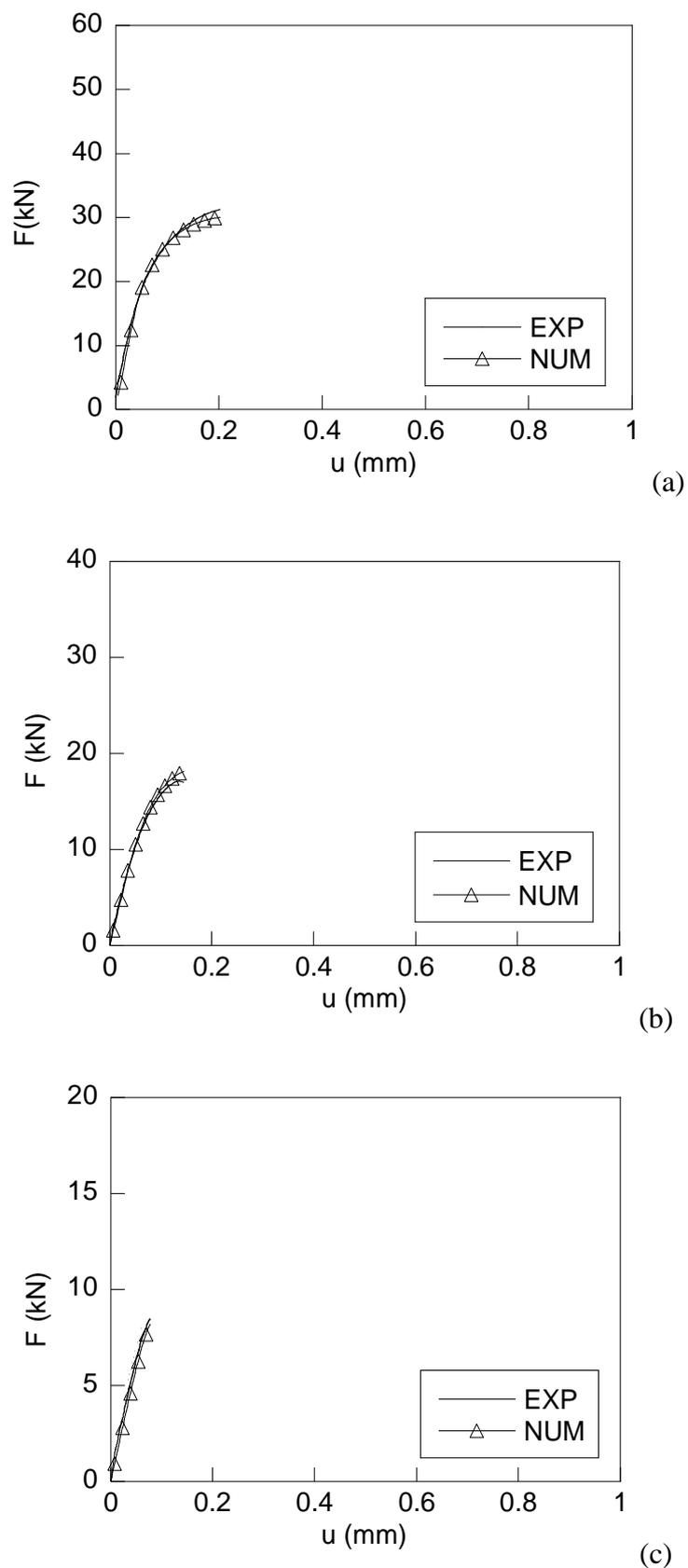


Fig. 4.40. Comparación de las curvas F - u , experimental y numérica, para las probetas entalladas axisimétricas: (a) B0, (b) B4 y (c) B7.

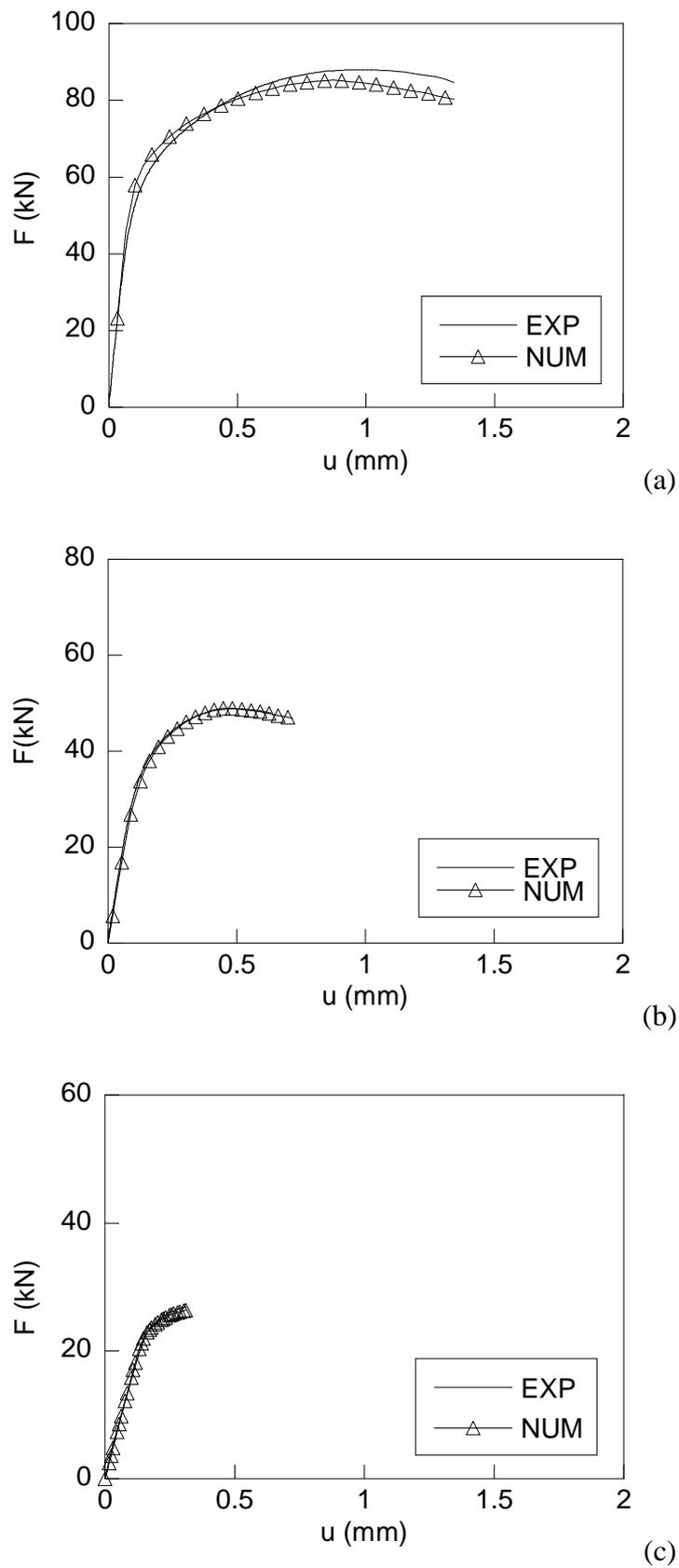


Fig. 4.41. Comparación de las curvas $F-u$, experimental y numérica, para las probetas entalladas axisimétricas: (a) C0, (b) C4 y (c) C7.

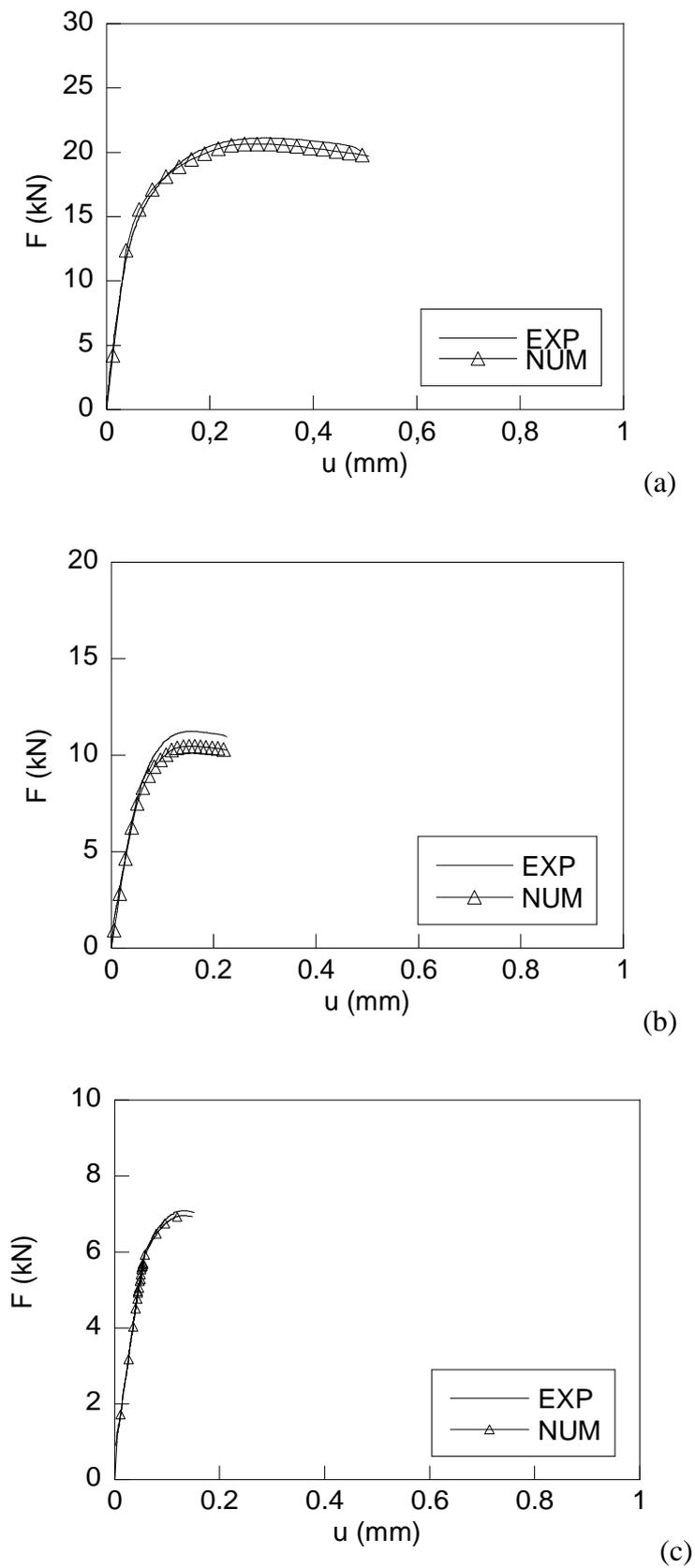


Fig. 4.42. Comparación de las curvas $F-u$, experimental y numérica, para las probetas entalladas axisimétricas: (a) D0, (b) D4 y (c) D7.

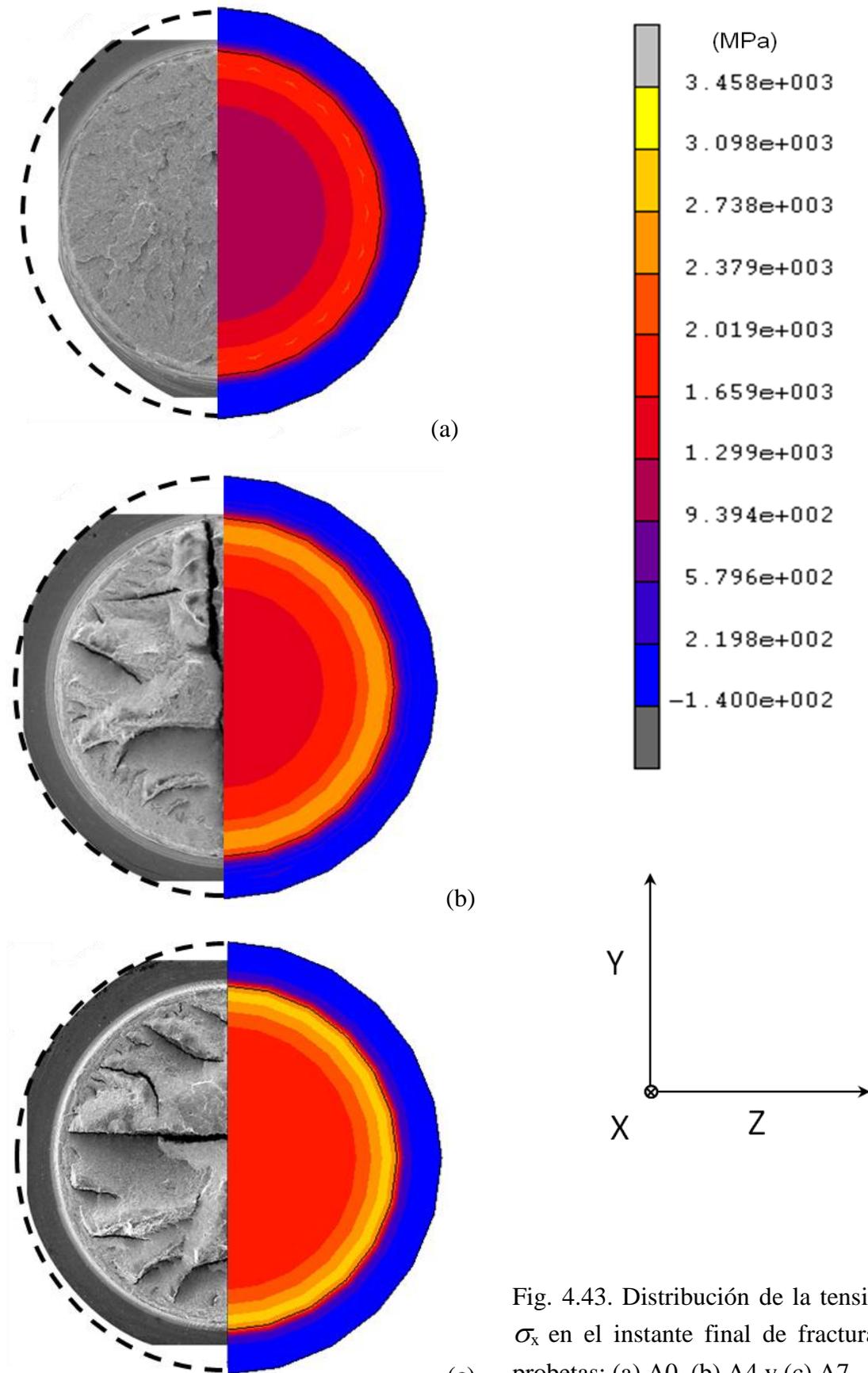


Fig. 4.43. Distribución de la tensión axial σ_x en el instante final de fractura de las probetas: (a) A0, (b) A4 y (c) A7.

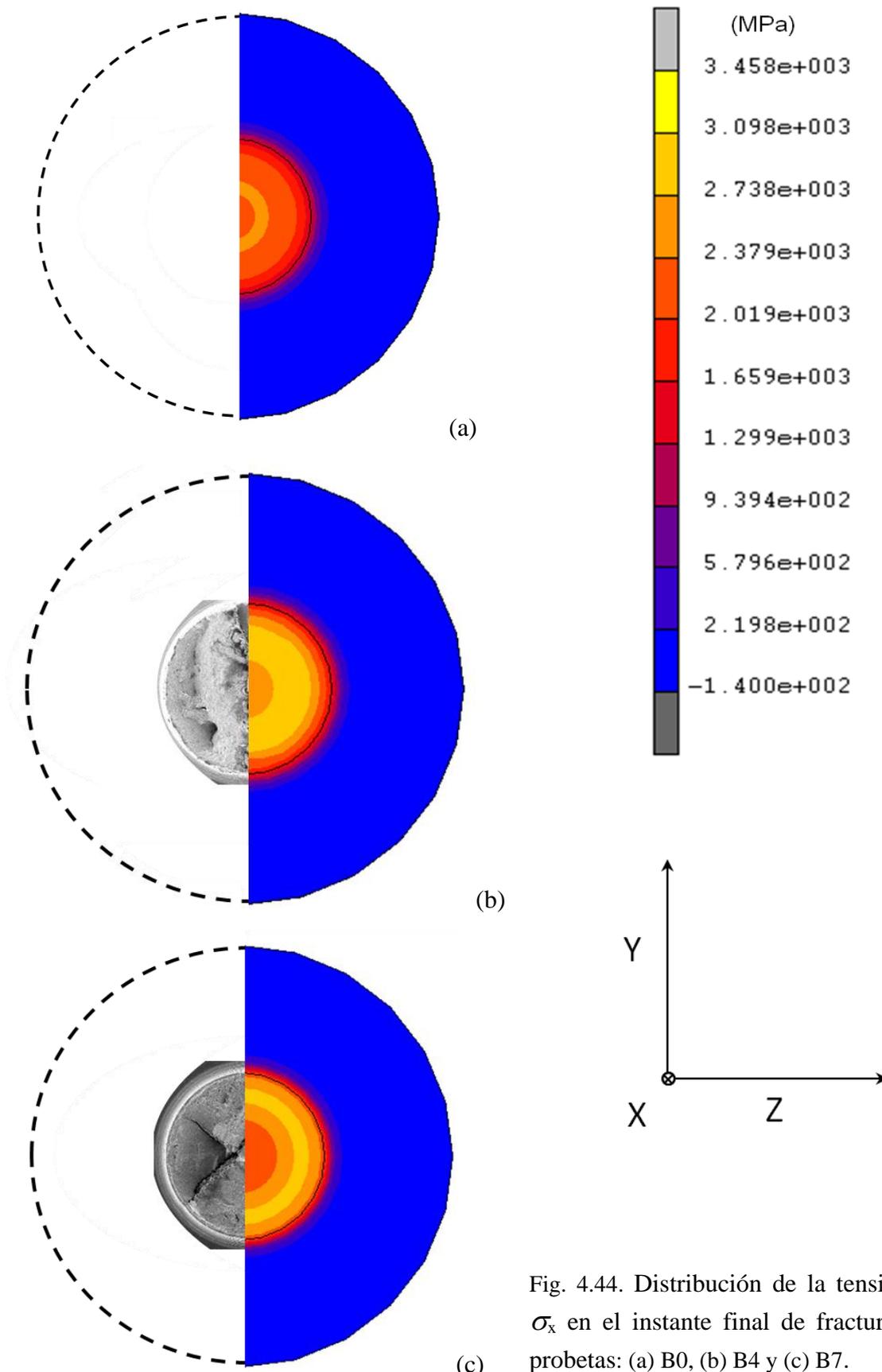
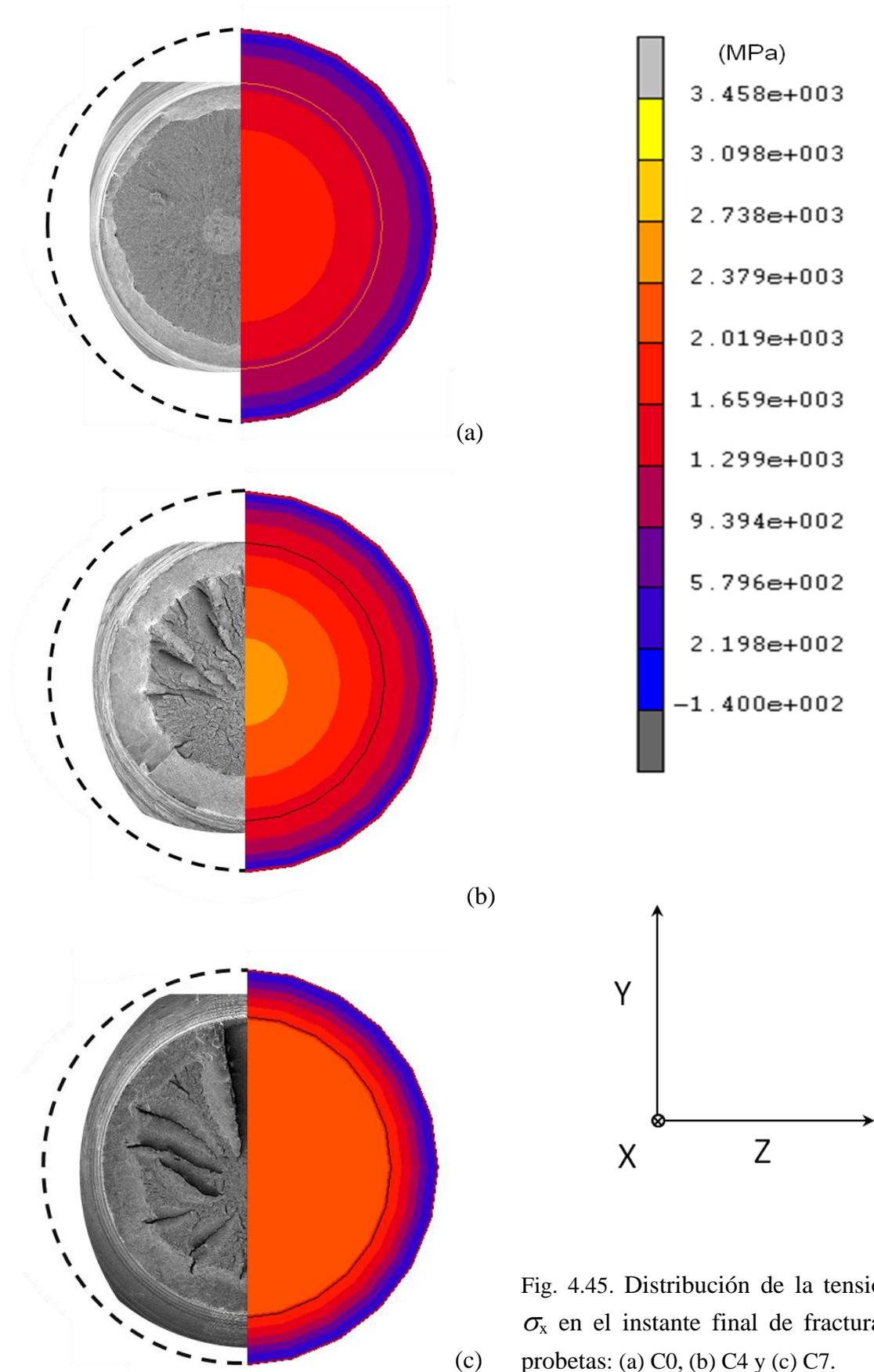
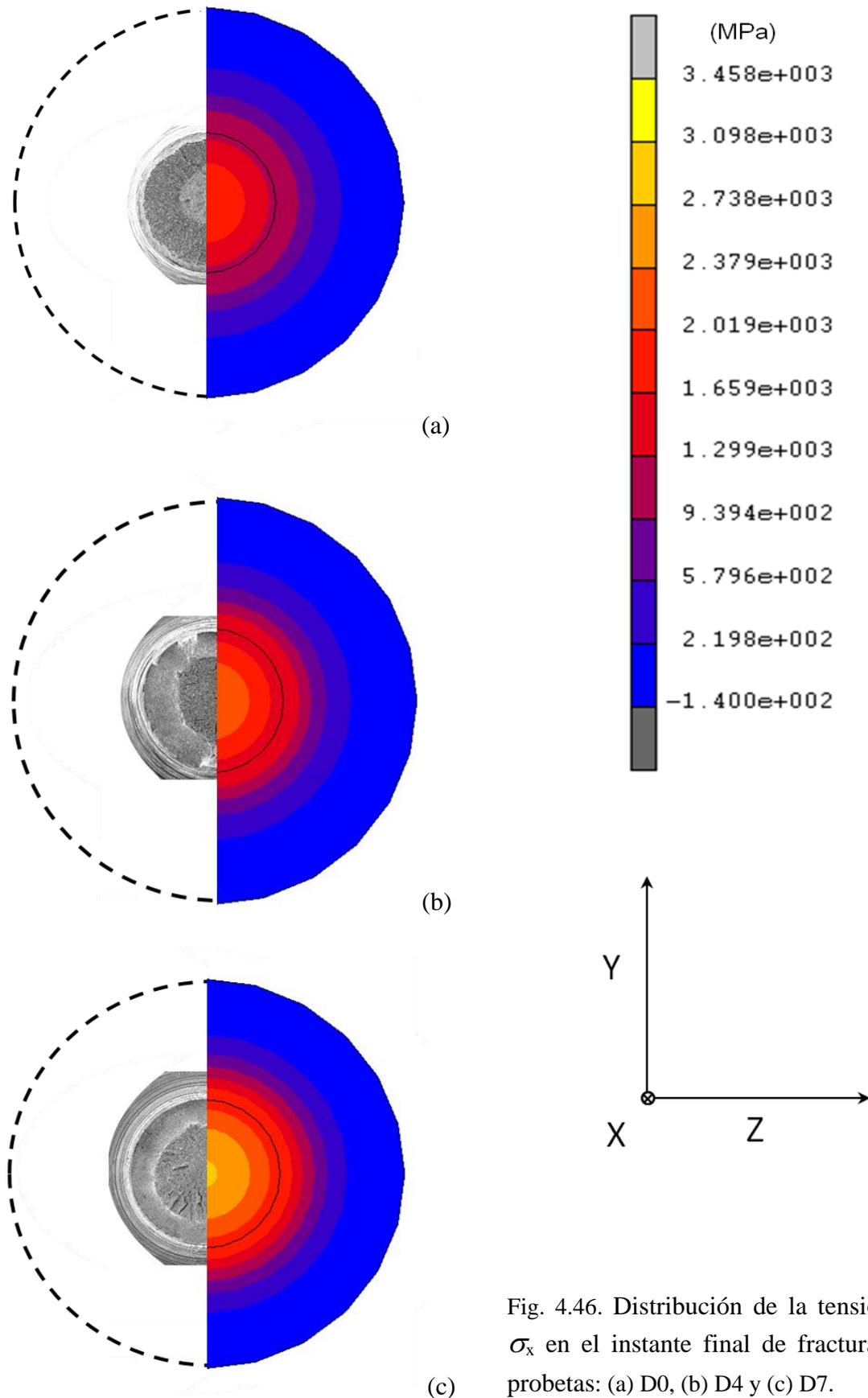
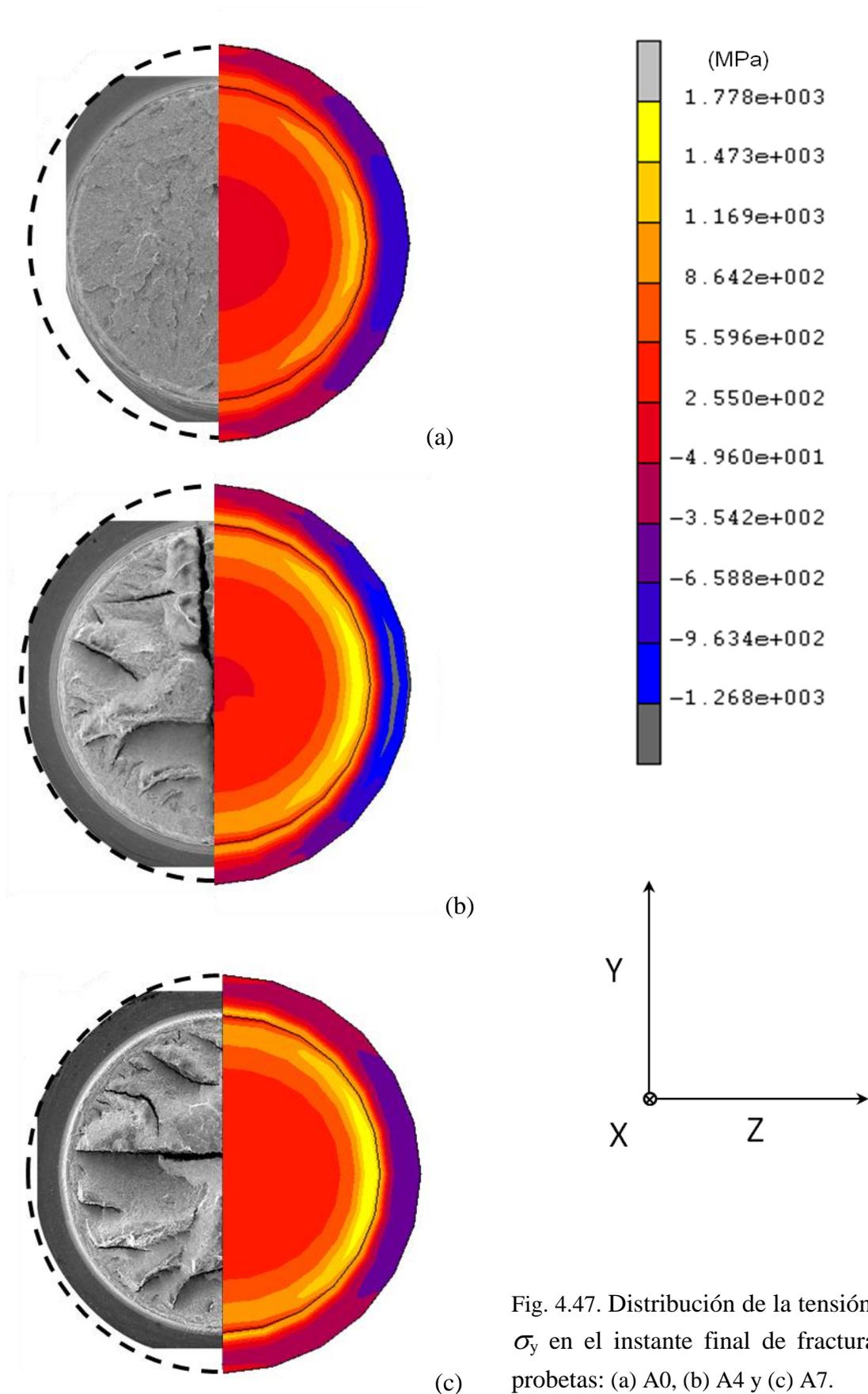
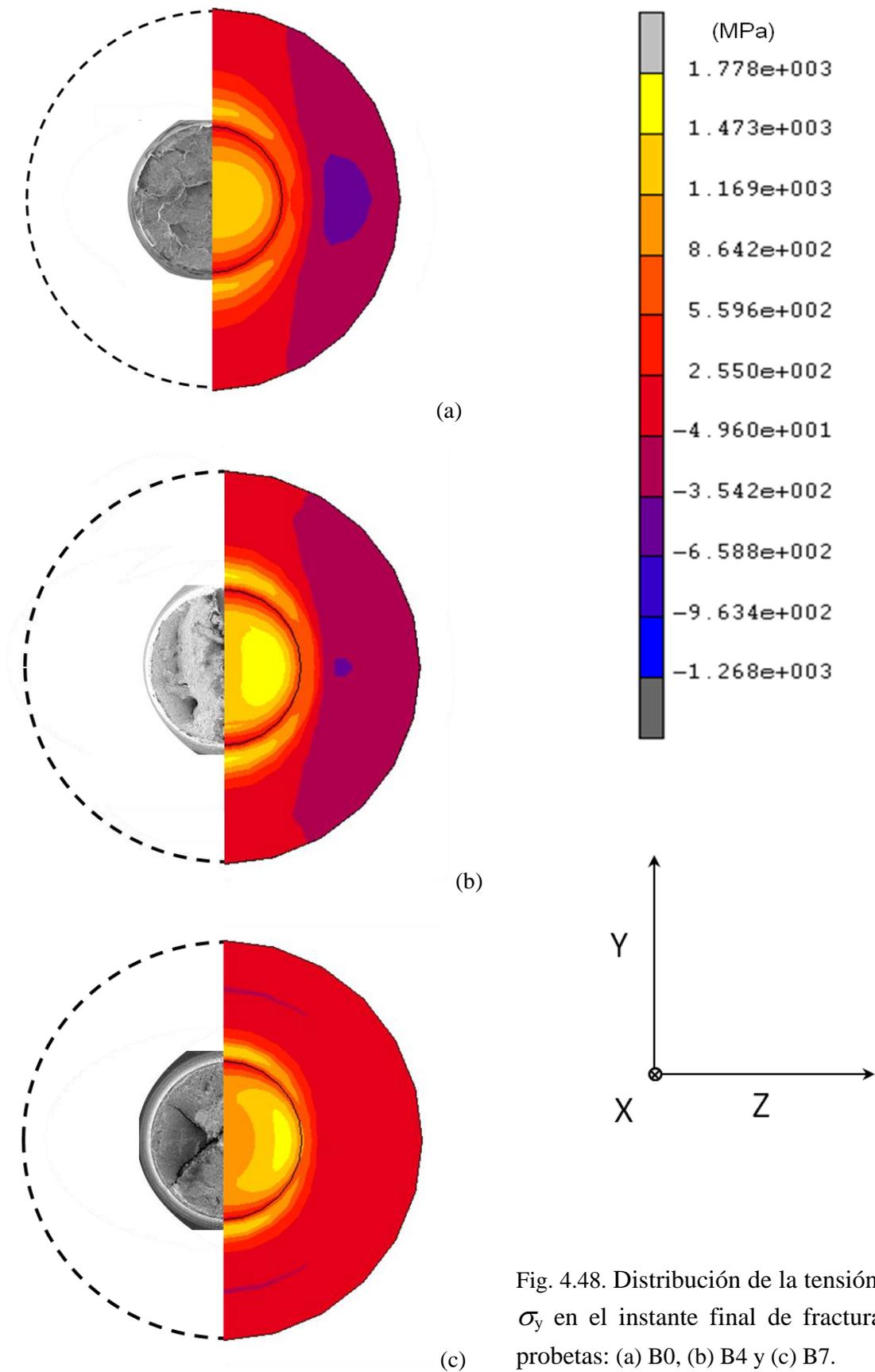


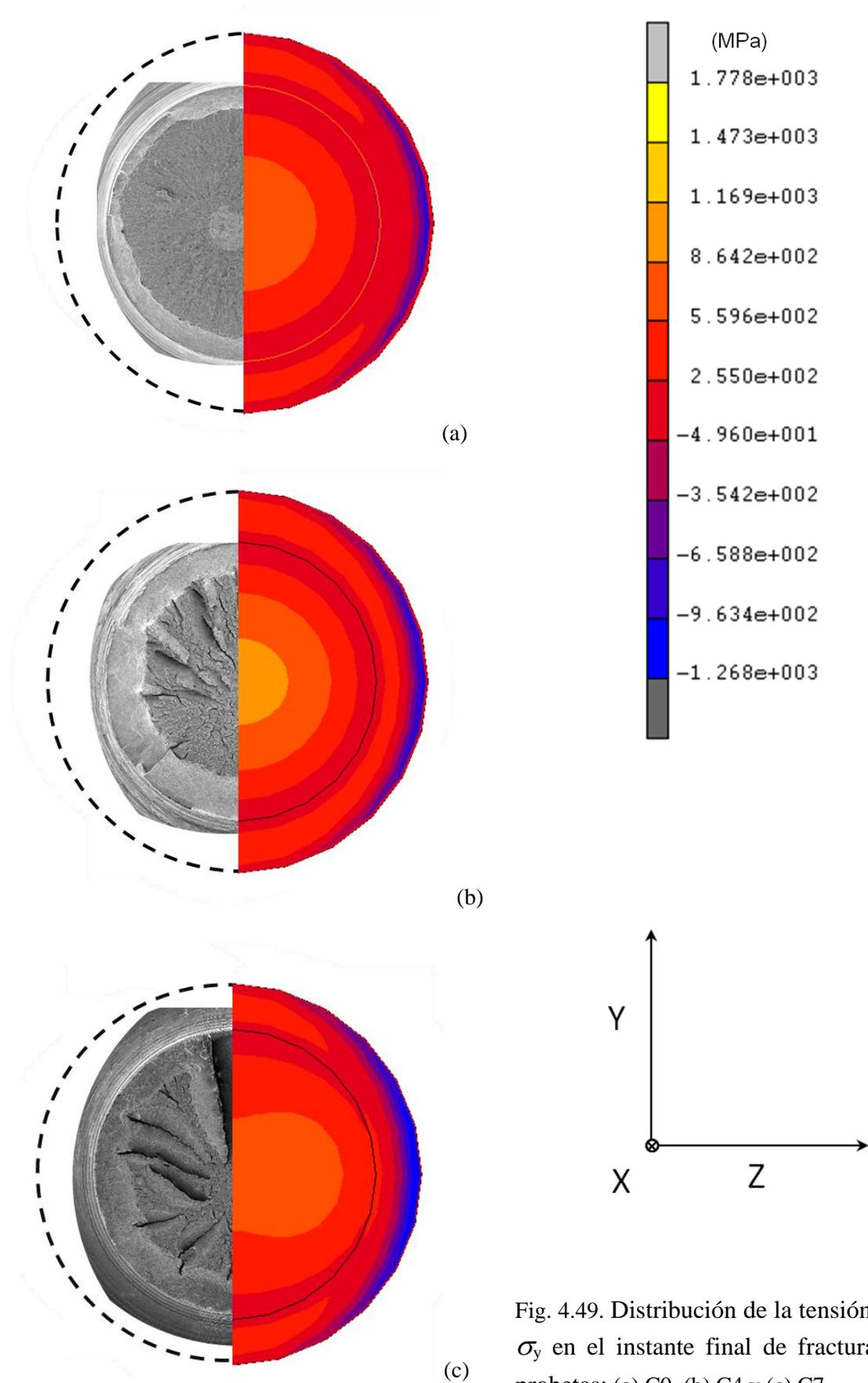
Fig. 4.44. Distribución de la tensión axial σ_x en el instante final de fractura de las probetas: (a) B0, (b) B4 y (c) B7.

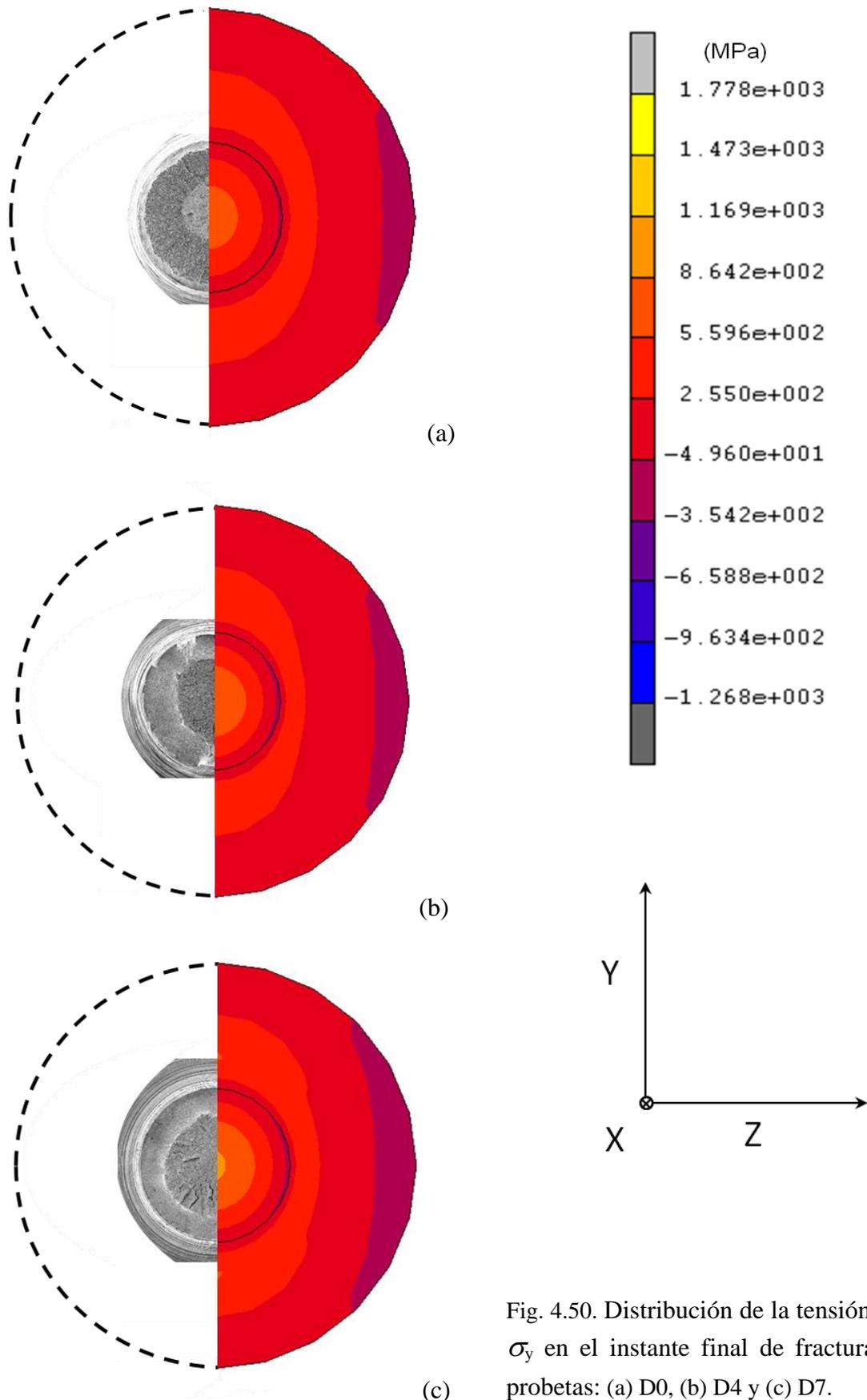


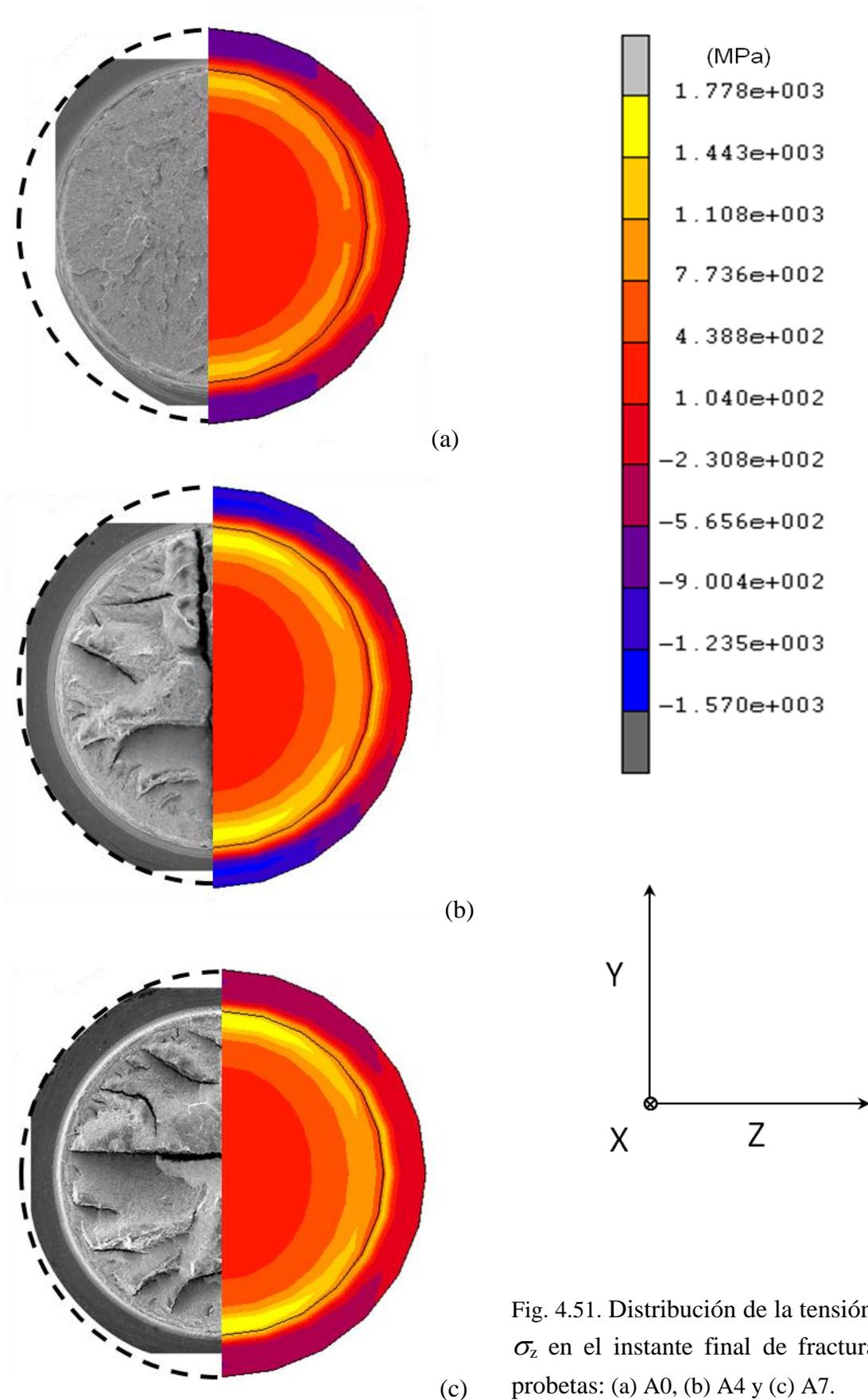


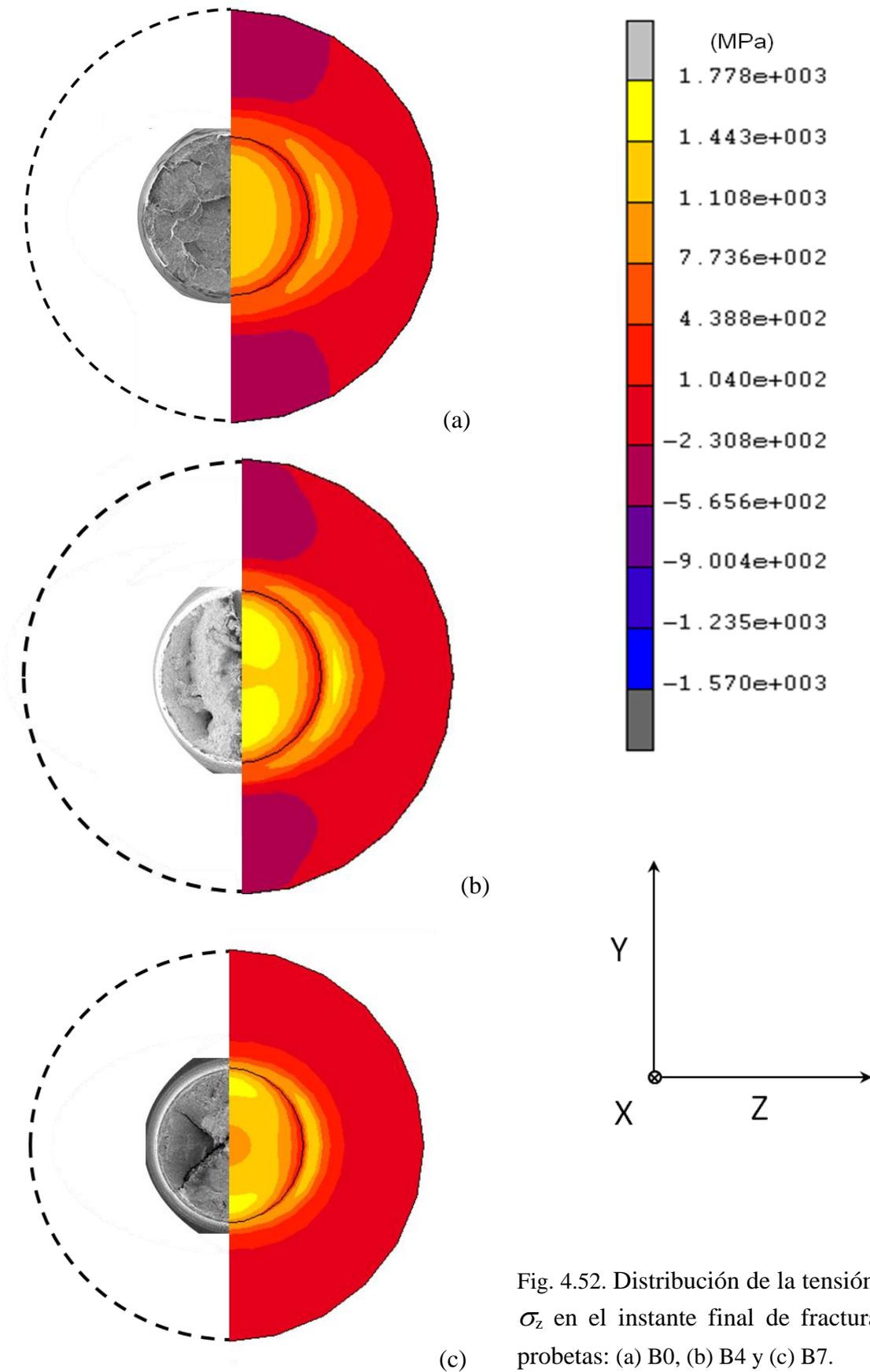


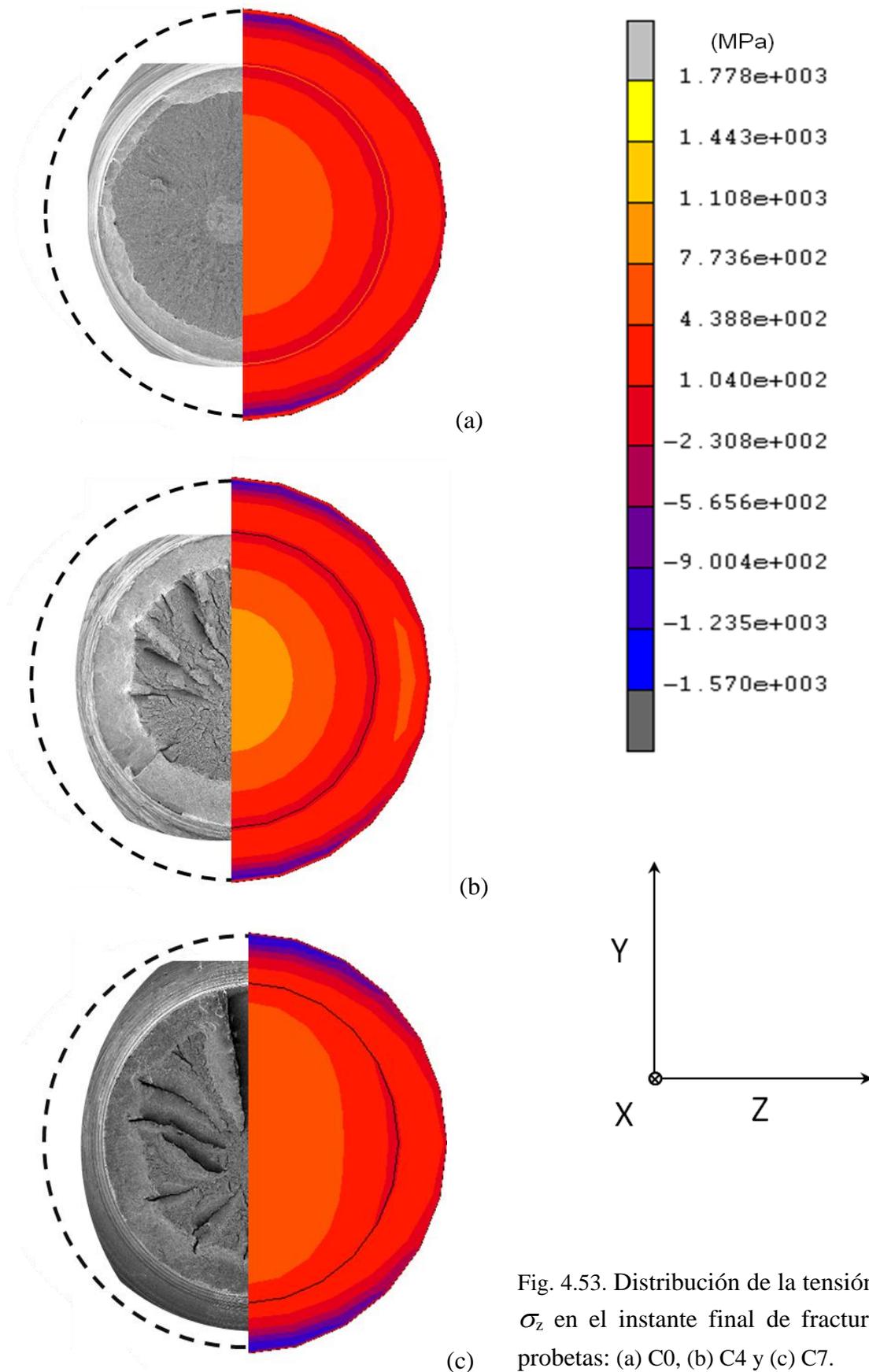


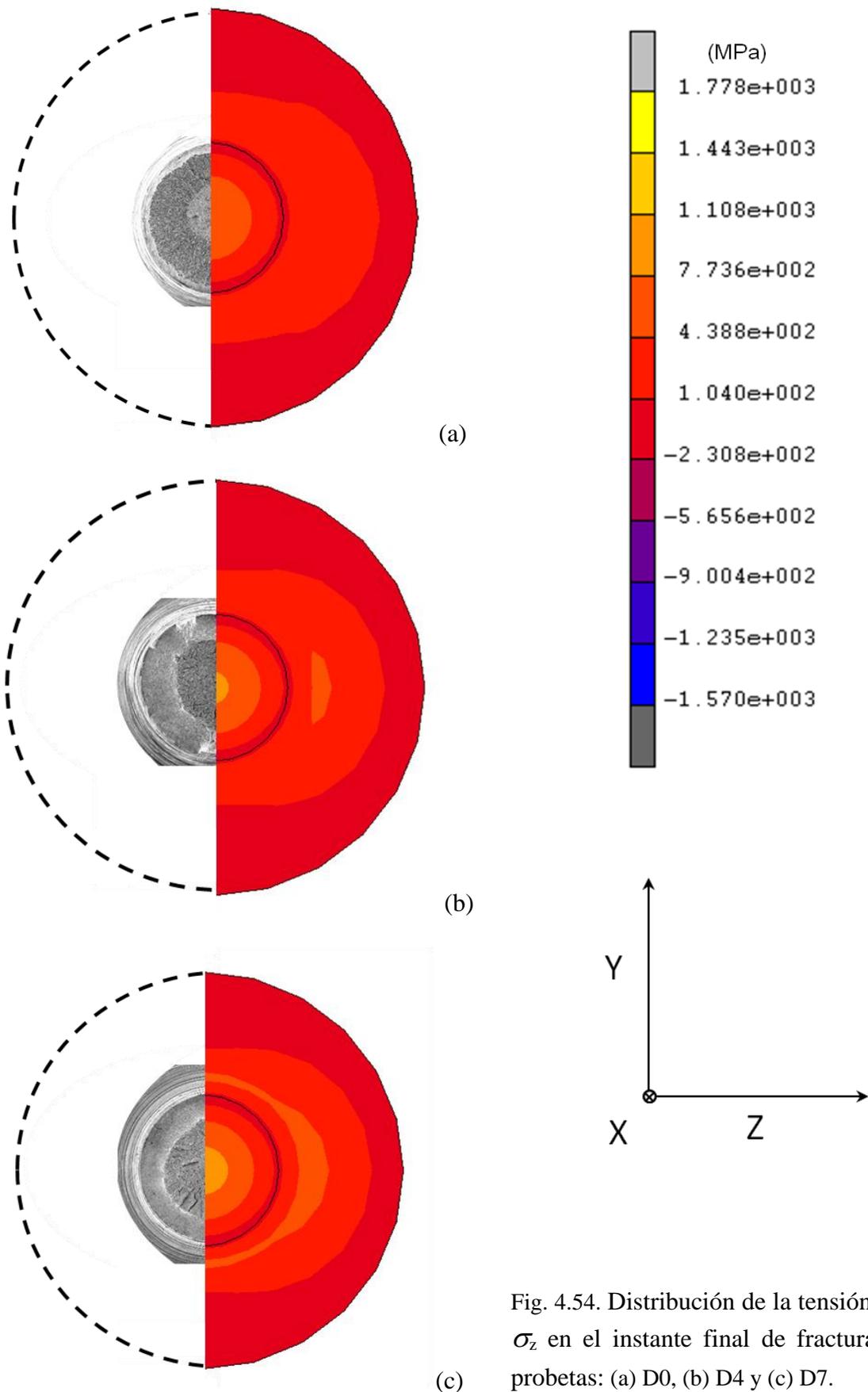












En las Figuras anteriores se muestra, como se ha comentado anteriormente, la distribución de las tensiones normales σ_x , σ_y y σ_z obtenidas de las simulaciones numéricas de las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. En éstas se han mostrado conjuntamente los mapas de contorno de las distintas tensiones, así como la superficie de fractura correspondiente de cada probeta en cuestión.

La distribución de tensión normal en el eje x muestra valores significativamente mayores en las probetas con entallas de tipo A y B (entallas de pequeño radio de curvatura) en éstas los valores máximos se alcanzan en las proximidades de la entalla, Figs. 4.43-4.44. Al contrario sucede en las probetas de tipo C y D (entallas de gran radio de curvatura) en las cuales los máximos valores de la tensión normal en el eje x se alcanzan en la zona central de la sección neta. En todas las probetas analizadas aumentan los valores de ésta tensión a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre, sin embargo, cabe señalar la excepción en la probeta C7, en la cual se observa una disminución significativa de los valores de dicha tensión desde la probeta procedente del alambre del cuarto paso del proceso de trefilado hasta la mecanizada a partir del alambre de pretensado, Fig. 4.45.

En el análisis de la tensión normal en el eje y , σ_y , tal y como se muestra en las Figs. 4.47-4.50, los valores mayores los alcanzan las probetas con entallas de tipo A y B (pequeño radio de curvatura) al igual que sucedía en la tensión normal del eje x . Las probetas con entalla de tipo A y B presentan los máximos valores de dicha tensión en la zona próxima a la entalla, en las de tipo B incluso dichos valores se extienden hacia la zona central de la sección neta (hasta la mitad del radio neto aproximadamente). En el caso de las probetas con entalla de tipo C y D (gran radio de curvatura) los máximos valores de la tensión normal σ_y se han obtenido en el centro de la sección neta. En cuanto a la distribución en función del grado de trefilado de los alambres de procedencia, en este caso también aumentan los valores de la tensión del eje y , cabe señalar la reducción significativa de los valores en la superficie neta observados de las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado final, B7 y C7, en comparación con las probetas con la misma entalla procedentes del alambre del E4, Figs. 4.48-4.49.

La tensión normal σ_z (Figs. 4.51-4.54), se comporta igual en cuanto a la distribución que la tensión normal σ_x , en todas las probetas axisimétricas analizadas. Además los valores de esta tensión también aumentan a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre de procedencia en todas las probetas analizadas, con la excepción de pequeñas disminuciones de dichos valores en las probetas, B7 y C7, en comparación con las probetas B4 y C4, Figs. 4.52-4.53. Cabe señalar que los valores máximos de la tensión normal en el eje x mostrados por las probetas analizadas son muy superiores a los mostrados por las tensiones normales en los ejes y y z , en los cuales los valores son prácticamente iguales.

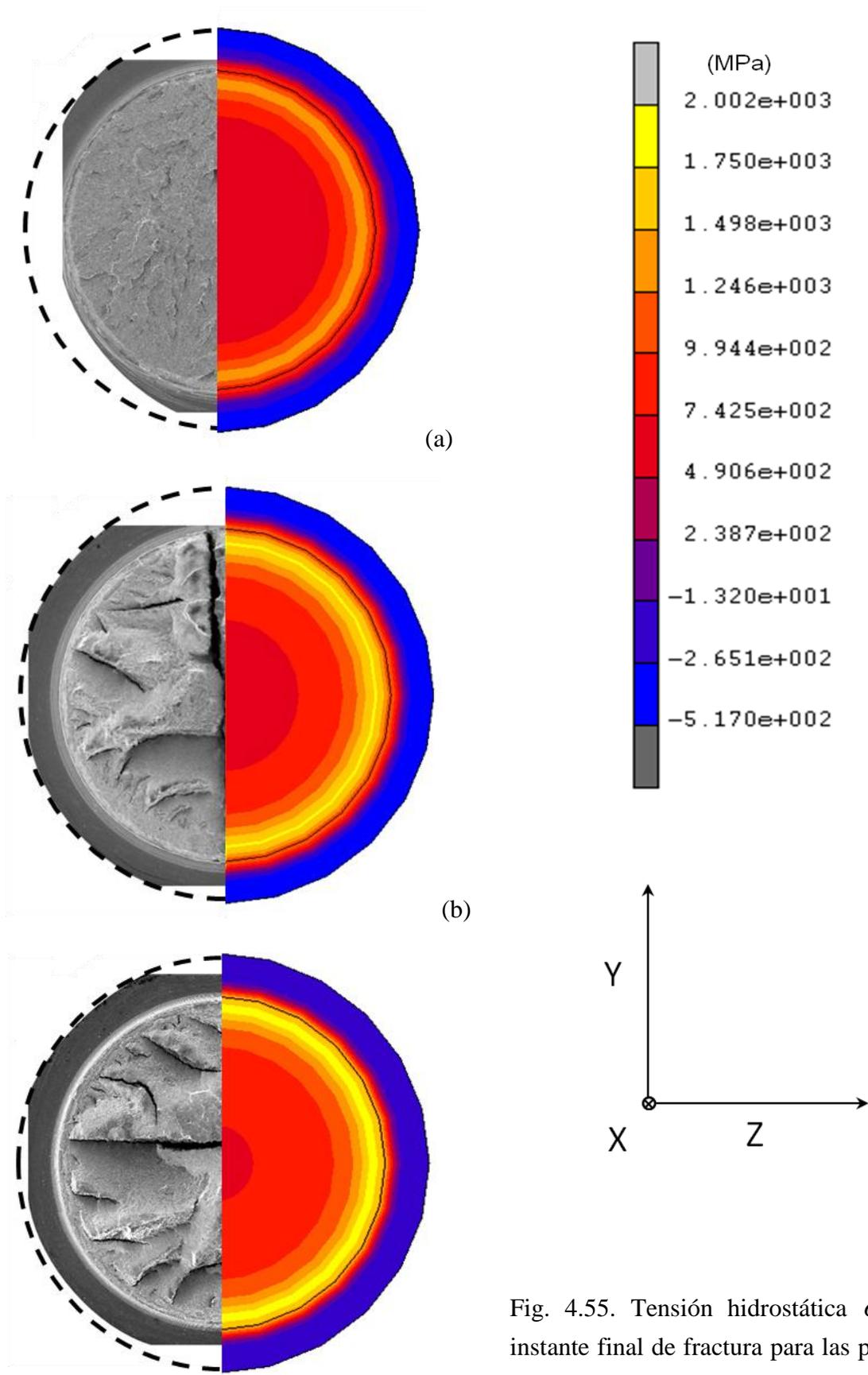
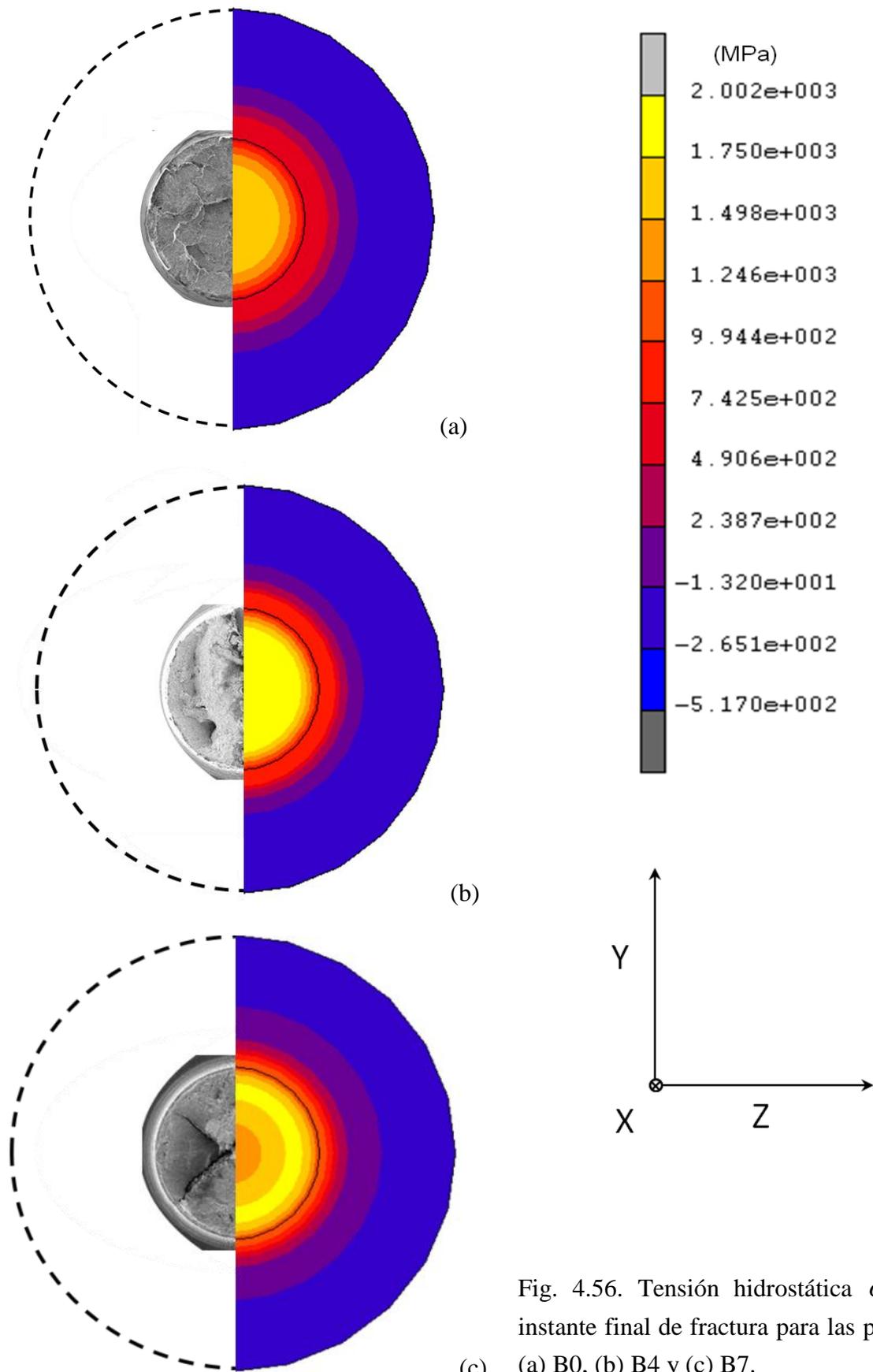
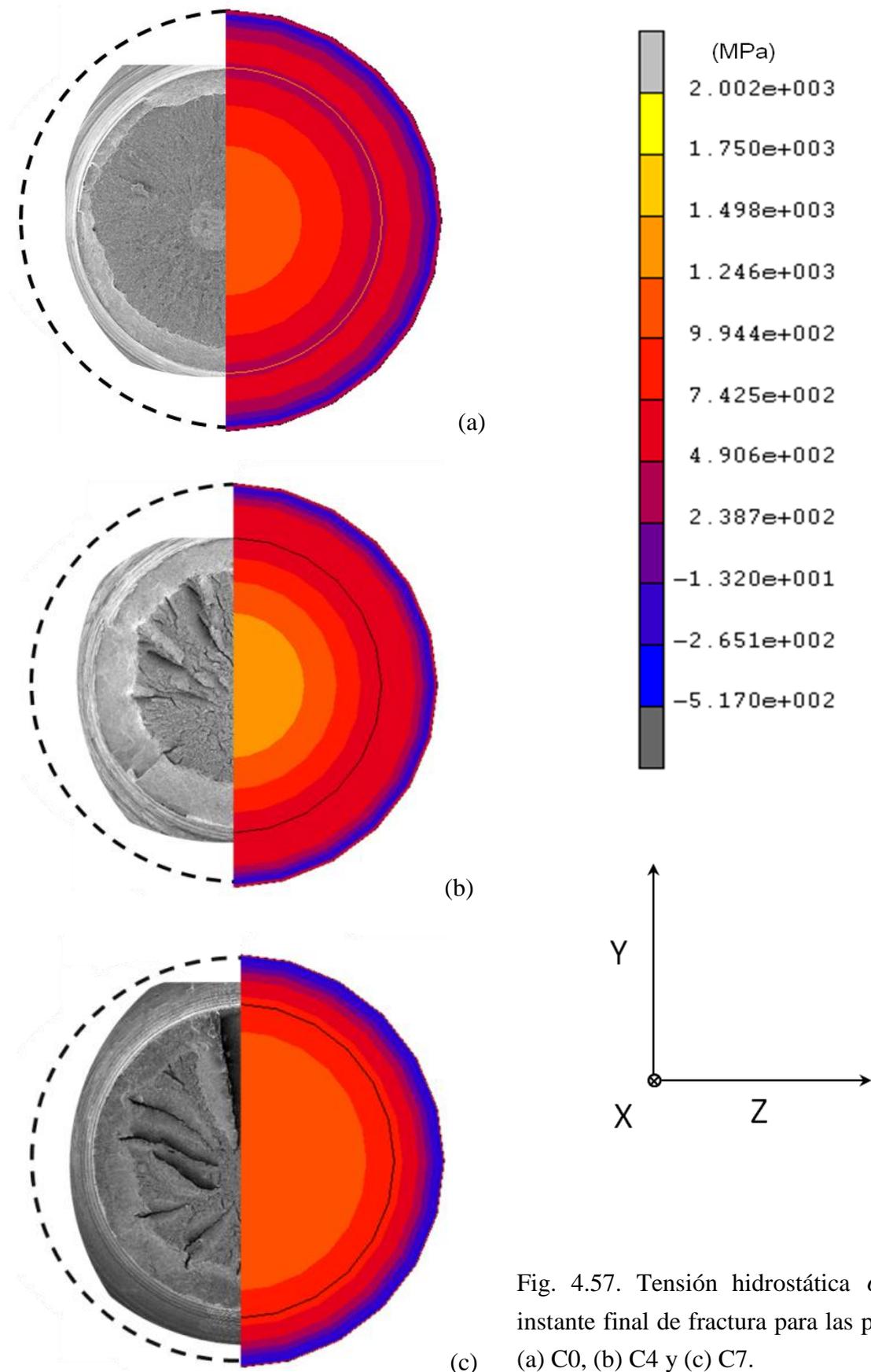
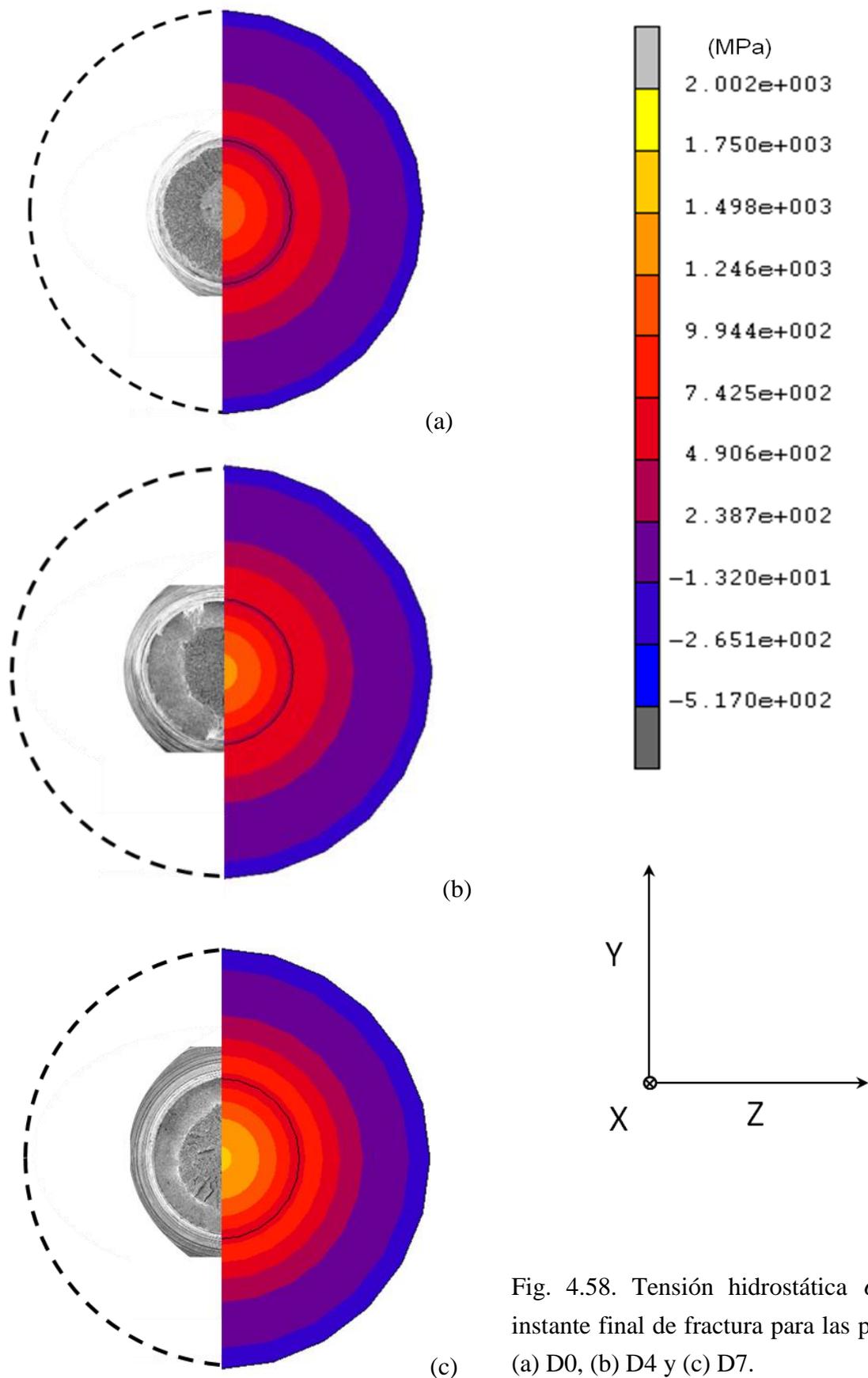


Fig. 4.55. Tensión hidrostática σ en el instante final de fractura para las probetas: (a) A0, (b) A4 y (c) A7.







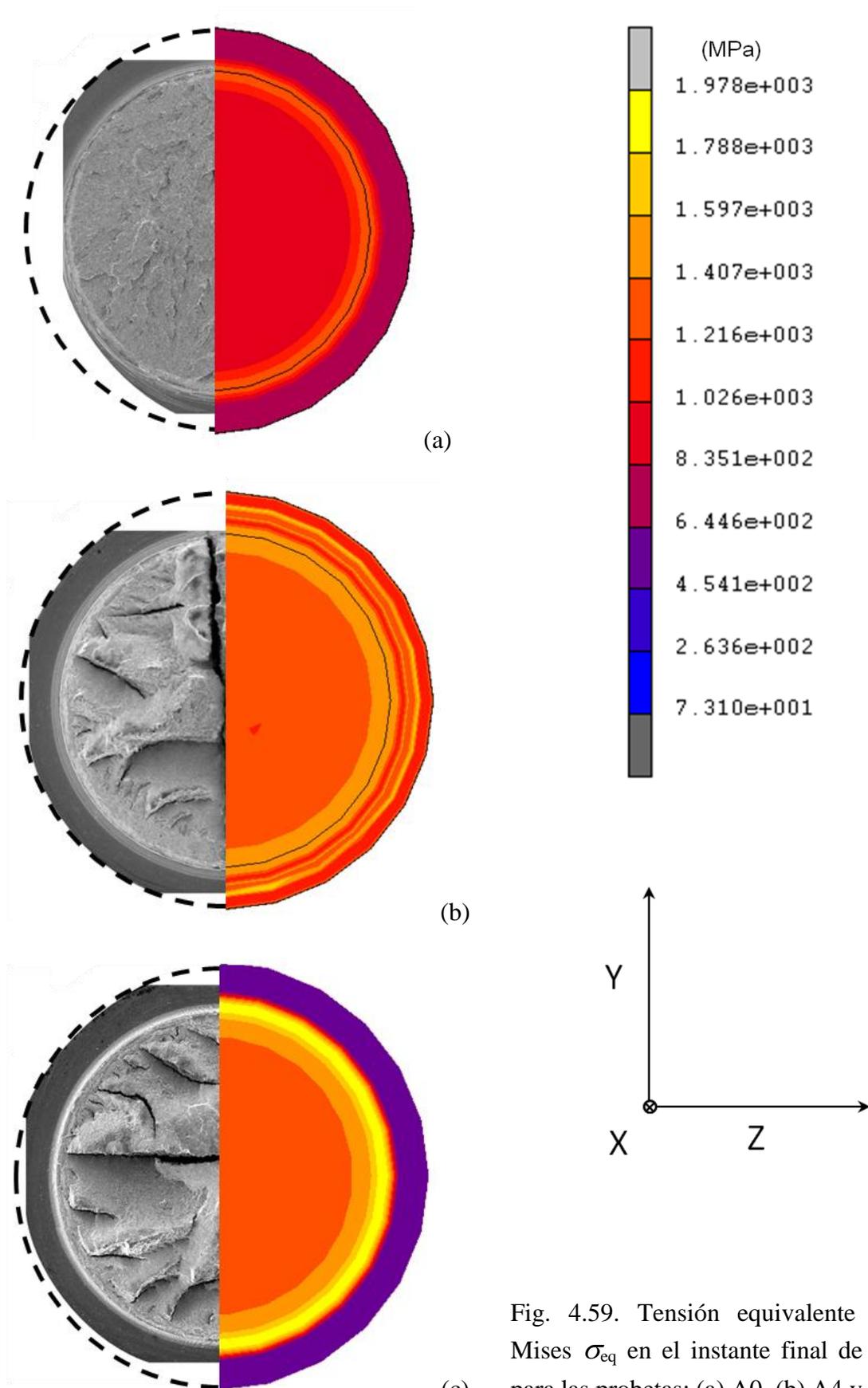


Fig. 4.59. Tensión equivalente de von Mises σ_{eq} en el instante final de fractura para las probetas: (a) A0, (b) A4 y (c) A7.

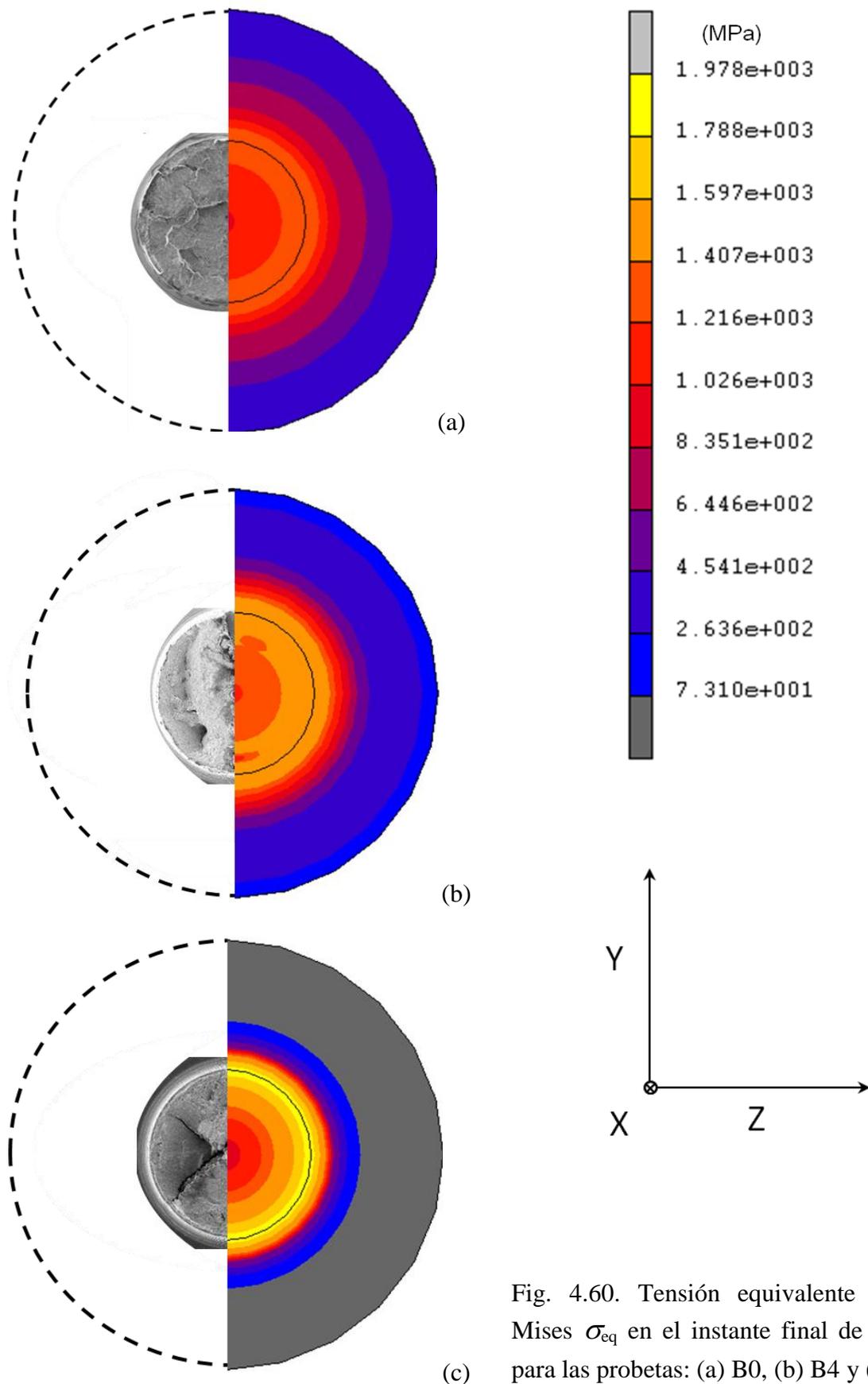


Fig. 4.60. Tensión equivalente de von Mises σ_{eq} en el instante final de fractura para las probetas: (a) B0, (b) B4 y (c) B7.

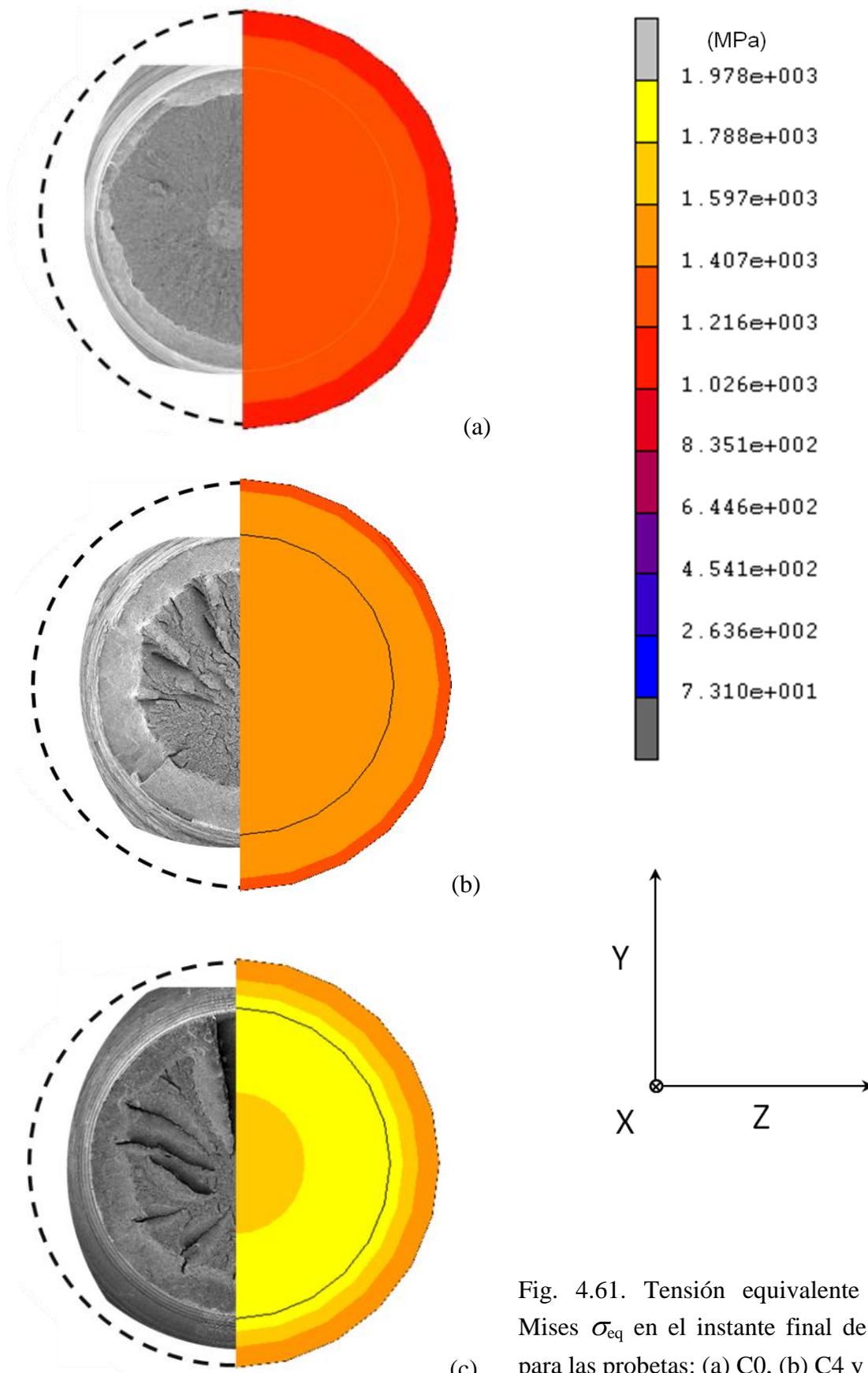


Fig. 4.61. Tensión equivalente de von Mises σ_{eq} en el instante final de fractura para las probetas: (a) C0, (b) C4 y (c) C7.

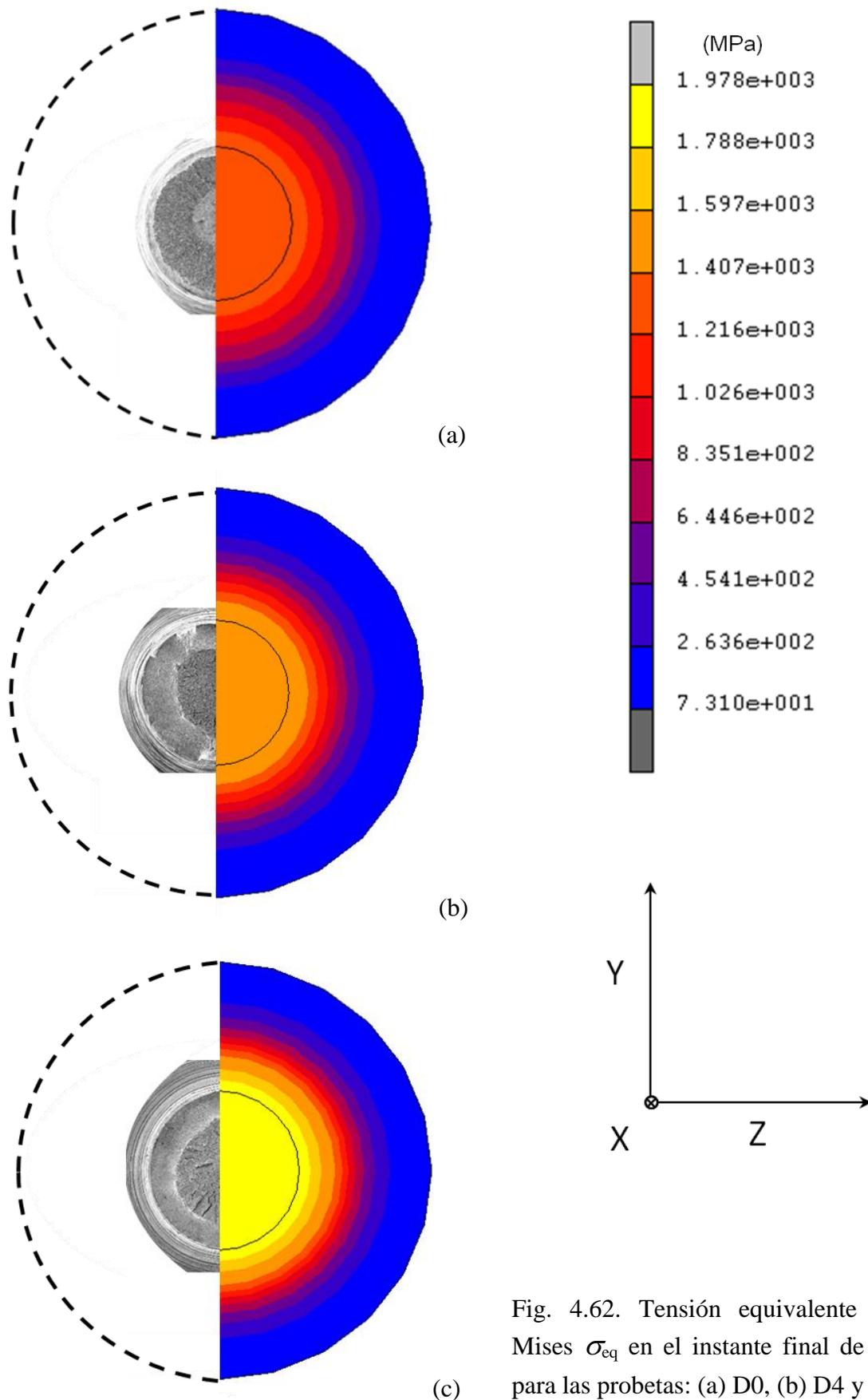


Fig. 4.62. Tensión equivalente de von Mises σ_{eq} en el instante final de fractura para las probetas: (a) D0, (b) D4 y (c) D7.

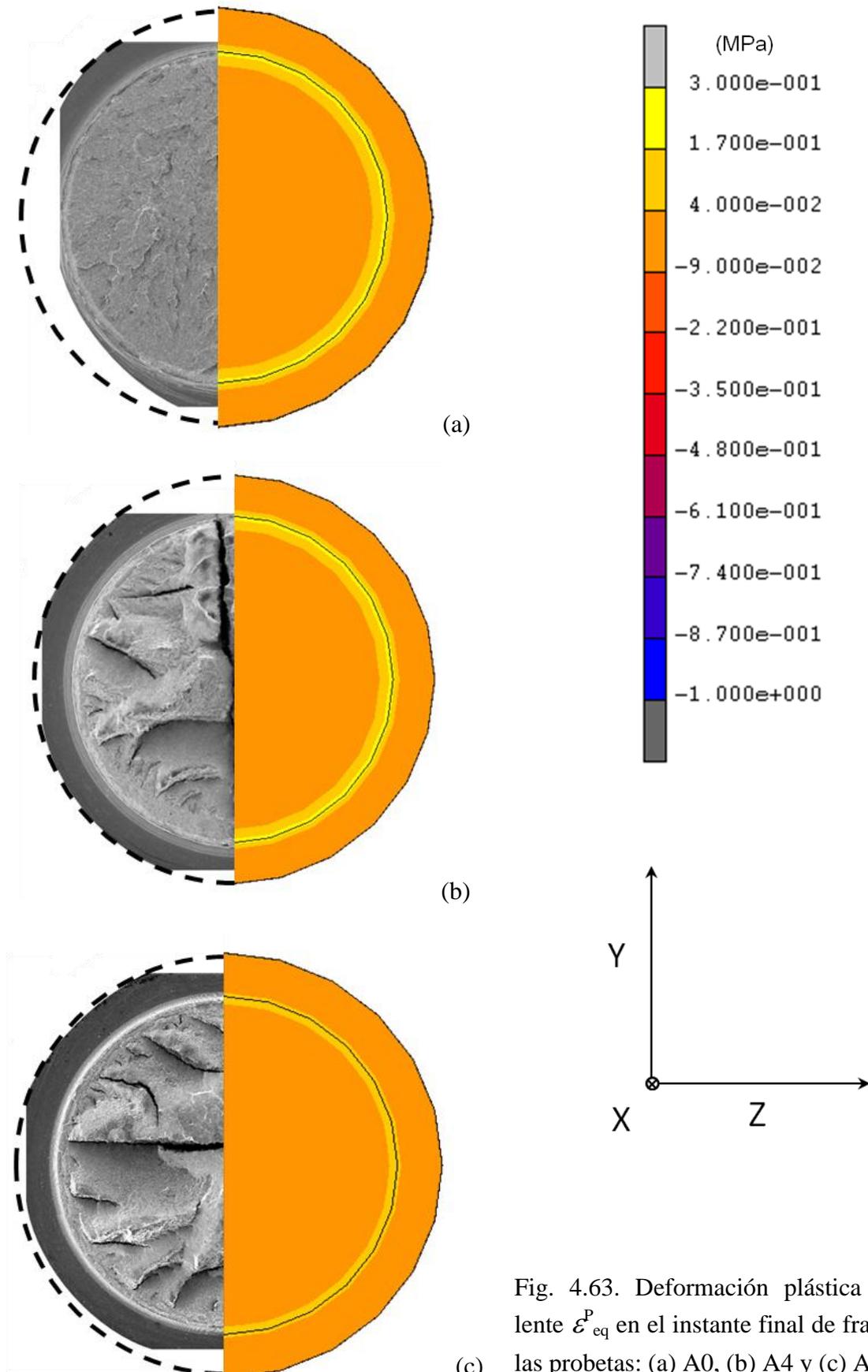
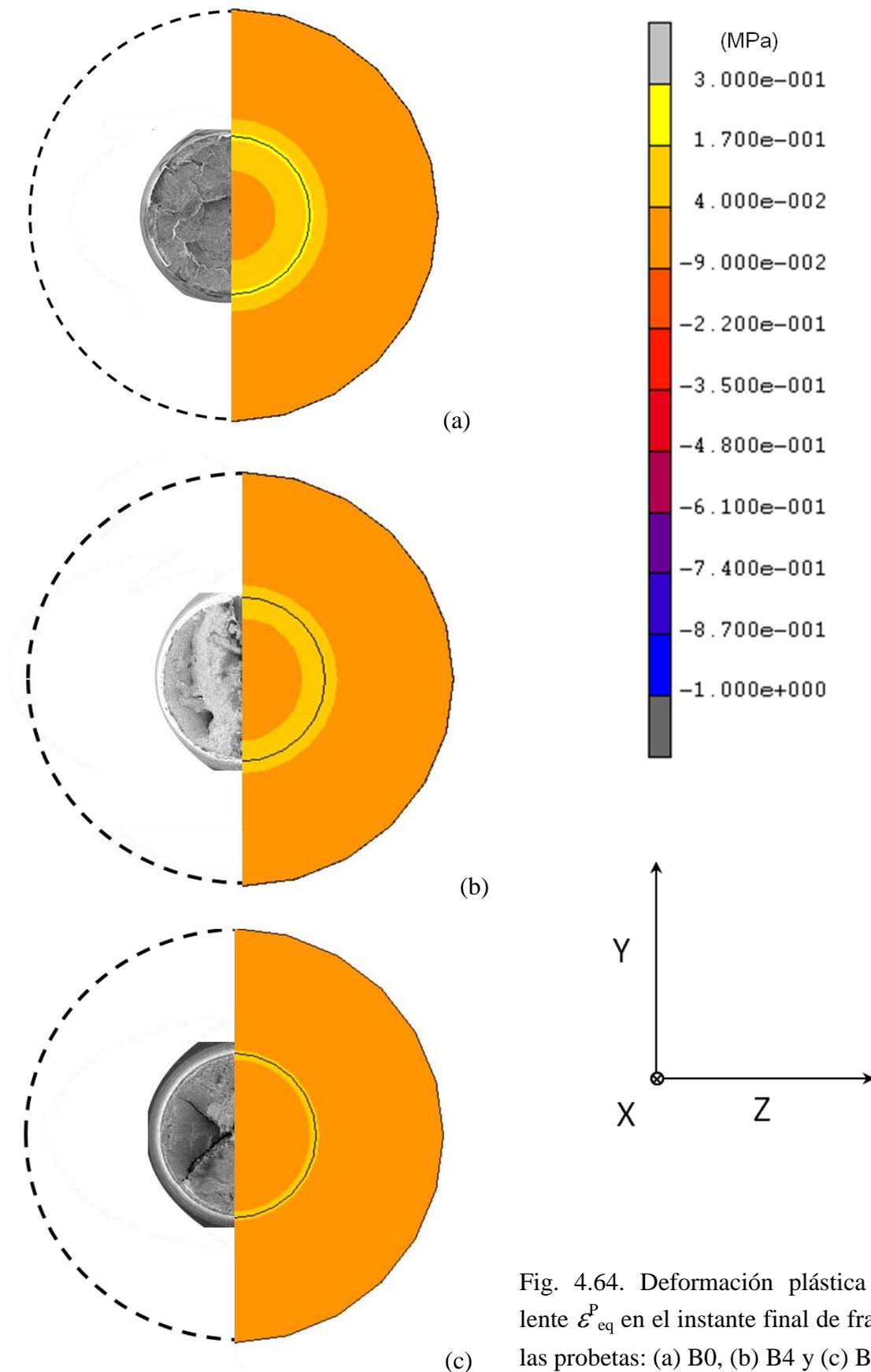
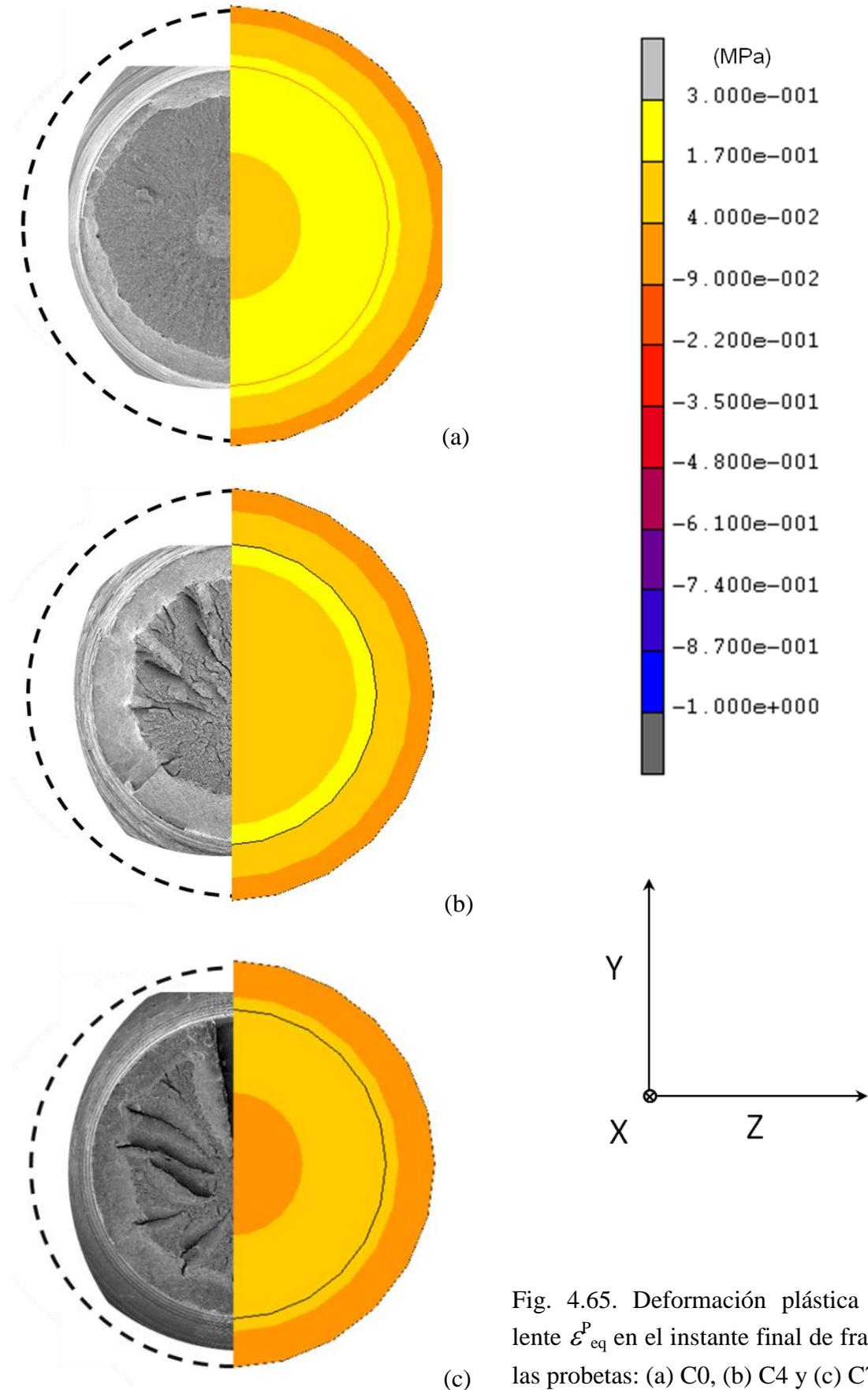
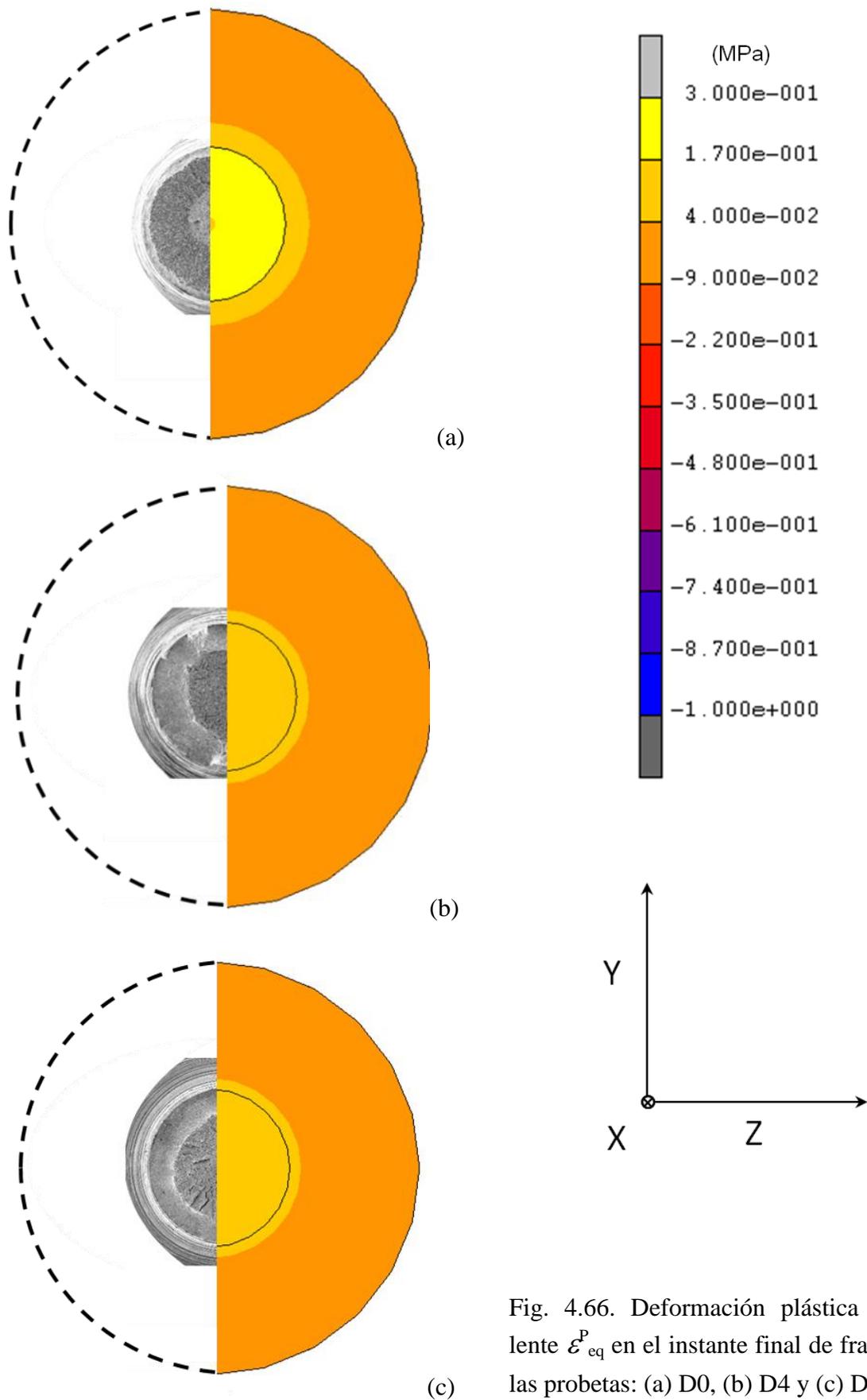


Fig. 4.63. Deformación plástica equivalente \mathcal{E}_{eq}^P en el instante final de fractura de las probetas: (a) A0, (b) A4 y (c) A7.







En las figuras anteriores (Figs. 4.55-4.66) se muestra la distribución de los valores de la tensión hidrostática (σ), tensión de von Mises (σ_{eq}) y deformación plástica equivalente (ϵ^P_{eq}). Éstas, al igual que las figuras de la distribución de las tensiones normales, se han acompañado por las fractografías correspondientes a las superficies de fractura de las probetas estudiadas.

La tensión hidrostática obtenida en las distintas probetas presenta valores mayores en las probetas con entalla de tipo A y B, los cuales están situados en las proximidades de la entalla. (Fig. 4.55-4.56). Cabe señalar que en las probetas de tipo B la superficie con valores máximos ocupa casi totalmente la superficie neta de la probeta. En las probetas con entallas de tipo C y D los valores máximos de ésta tensión se sitúan en la zona central de la sección neta, Figs. 4.57-4.58. En todas las probetas analizadas se ha observado un aumento del valor de dicha variable con el aumento del grado del alambre de procedencia, sin embargo las probetas B7 y C7 muestran una disminución de los valores de todas las tensiones normales y la tensión hidrostática en la superficie neta con respecto a las probetas B4 y C4.

Con respecto al estudio de la distribución de la tensión de von Mises, las probetas con entallas de tipo A, B y C presentan los máximos valores en aquellas procedentes del alambre de pretensado final, siendo en las probetas de entalla de tipo D en las cuales los valores máximos ocupan una mayor superficie de la sección neta. Al igual que sucedía con la tensión hidrostática, las probetas con entallas de tipo A y B presentan los valores máximos en las zonas próximas a la entalla mientras las probetas con entallas de tipo C y D los muestran en el centro de la sección neta, Figs. 4.59-4.62. En éste caso en todas las probetas analizadas se observa que, a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre a partir del cual han sido mecanizadas, aumentan los valores de la σ_{eq} .

En cuanto a las distribuciones de deformación plástica equivalente obtenida en las distintas secciones netas (fondo de entalla) de las probetas modelizadas, éstas presentan valores mayores en las probetas con entalla de tipo C y D. En todas las probetas analizadas los valores máximos se sitúan en los fondos de entalla, dichos valores ocupan cada vez menores superficies a medida que aumenta el grado de trefilado, Figs. 4.63-4.66.

Una vez obtenidas las distribuciones de los valores de las tensiones y la deformación, debido al interés del estudio se ha obtenido el valor de la triaxialidad a lo largo del eje y, (Fig. 4.67). La triaxialidad (t), como se ha comentado en el apartado anterior, se obtiene mediante la expresión $t = \sigma / \sigma_{eq}$, siendo σ la tensión hidrostática y σ_{eq} la tensión equivalente o efectiva de von Mises. En las Figs. 4.68-4.69, se muestra la variación de los valores de la triaxialidad en el eje y para todos los casos de estudio que se han analizado.

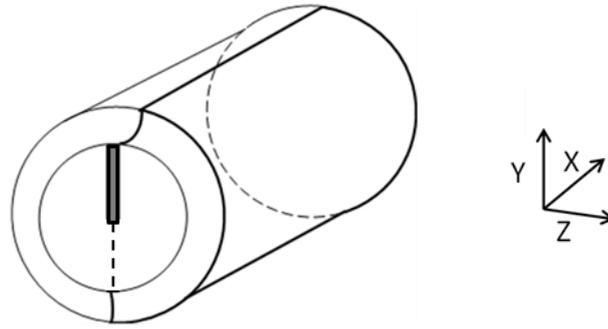


Fig. 4.67. Esquema de la probeta dónde se señala la zona de extracción de datos de las tensiones σ y σ_{eq} .

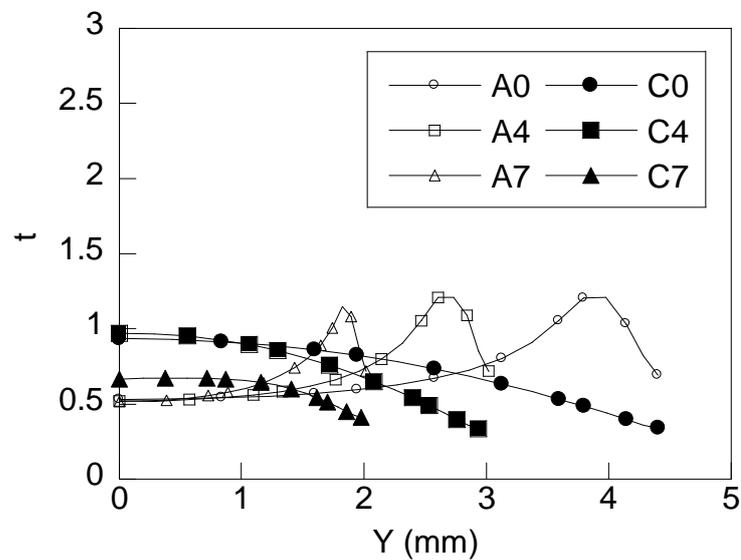


Fig. 4.68. Triaxialidad en las probetas axisimétricas entalladas tipo A y C a lo largo del eje y.

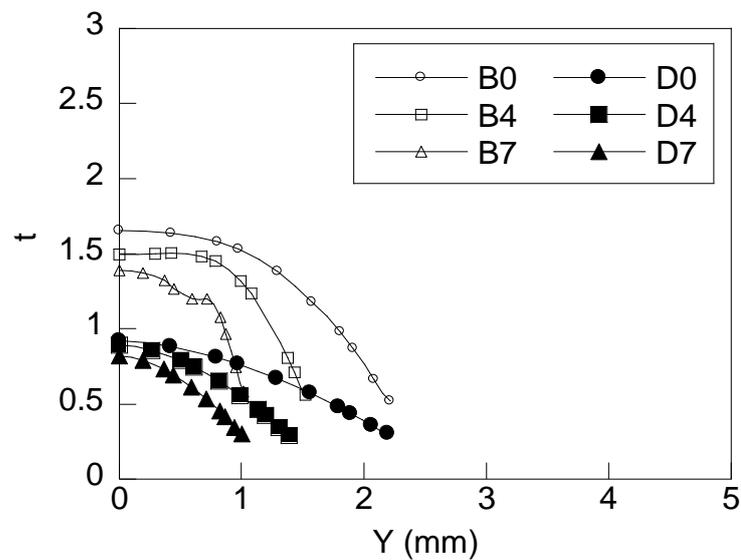


Fig. 4.69. Triaxialidad en las probetas axisimétricas entalladas tipo B y D a lo largo del eje y.

Como se puede observar en la Fig. 4.69, la triaxialidad es mayor en las proximidades de las entallas para las probetas con entalla tipo A (pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad). Para el resto de las probetas examinadas con entallas de tipo B, C y D la triaxialidad alcanza sus máximos valores entre la zona central y el fondo de entalla.

No se ha representado la triaxialidad a lo largo del eje z puesto que los valores en dicha zona son significativamente menores que los alcanzados a lo largo del eje y . Los máximos valores de triaxialidad se han obtenido en las probetas con entalla de tipo B, muy próximos a los valores máximos de triaxialidad que presentan las probetas con entalla de tipo A. Cabe señalar que los valores máximos de triaxialidad en las probetas de tipo C y D son muy similares y que en todos los tipos de probetas estos disminuyen a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre del cual proceden.

2.2. Modelización de micro-defectos generados por inclusiones

Una vez realizadas las modelizaciones numéricas de los ensayos bajo sollicitación de tracción para las distintas probetas entalladas axisimétricas, y una vez obtenidos los resultados de las distribuciones y valores de las distintas variables internas, se ha procedido a introducir en los elementos con mayor triaxialidad los micro-defectos generados por las inclusiones. Para tal fin se ha seguido el procedimiento ya empleado en las modelizaciones de los micro-defectos realizadas en el apartado 1.1 de éste mismo capítulo, en el cual se modelizan numéricamente dichos micro-defectos en las distintas probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. El objetivo principal de estas modelizaciones es cuantificar los cambios morfológicos sufridos por los micro-defectos debidos a las diferentes inclusiones, así como analizar la distribución y valor de las variables internas que imperan en los bordes de éstos micro-defectos.

Las modelizaciones de los micro-defectos generados por inclusiones también se han realizado teniendo en cuenta los resultados de estudios previos de clasificación de inclusiones y sus micro-defectos anteriormente expuesto en el apartado 2.3.1 del capítulo II de la presente Tesis. De esta forma se han modelizado dos tipos de inclusiones, duras y blandas, y como en el apartado 1.1 del presente capítulo se han tomado los factores de forma de los micro-defectos generados por éstas en los distintos alambres del proceso de trefilado, Tabla 4.1. En cuanto al tamaño de los micro-defectos introducidos en las celdas aisladas se ha tomado la media cuantificada, siendo el tamaño de los micro-defectos de 0,002 mm en el eje menor de la elipse, b , y la medida del eje mayor, a ; la correspondiente al factor de forma (a/b) de los micro-defectos analizados en los alambres de los distintos pasos del trefilado a partir de los cuales se han mecanizado dichas probetas axisimétricas.

Los micro-defectos sólo se han modelizado en las zonas con mayor triaxialidad presentes en la sección de la entalla, extrayendo los desplazamientos registrados en los mismos y aplicándolos en los bordes de dicho elemento aislado, ejecutándose de esta forma un cálculo paralelo al ya realizado. Una vez extraídos los elementos y sus desplazamientos resultantes de los ensayos bajo sollicitación de tracción se incorpora en la parte central del mismo los dos tipos de micro-defectos objeto de estudio con las morfologías correspondientes a cada micro-defecto según el de alambre de procedencia, Fig. 4.70.

En las modelizaciones numéricas del elemento con mayor triaxialidad, en los cuales se sitúa el micro-defecto, dicho elemento pasa a ser una celda aislada del cálculo anterior conservando los desplazamientos que durante éste se han obtenido. Al igual que las modelizaciones de celdas aisladas este procedimiento de cálculo, celda aislada, permite la realización de mallas en 3D con un mayor número de elementos lo cual aumenta la fiabilidad de los resultados y optimiza los recursos informáticos, haciendo que sea posible realizar este tipo de modelizaciones numéricas de micro estructuras.

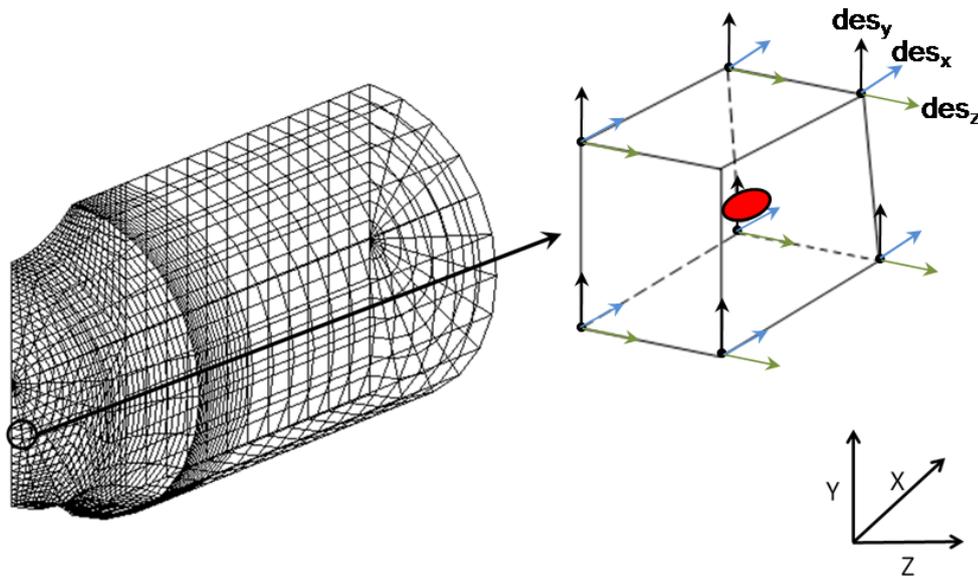


Fig. 4.70. Esquema de extracción de una celda aislada a partir de la malla utilizada en la simulación de un ensayo bajo sollicitación de tracción de una probeta axisimétrica entallada.

En las probetas con entallas de tipo B el elemento extraído para la incorporación de los micro-defectos está ubicado en la zona próxima al fondo de entalla, mientras en el resto de las probetas analizadas se han extraído los elementos ubicados en la zona media de la sección neta entre el centro y el fondo de entalla.

La modelización de micro-defectos generados por inclusiones se ha realizado en las probetas axisimétricas procedentes del alambroón inicial y alambre de pretensado comercial, es decir

alambre sin trefilar y alambre perteneciente al último paso de la cadena de trefilado, de forma que las modelizaciones de éstos micro-defectos engloben el comportamiento en probetas procedentes de alambres pertenecientes a pasos intermedios de la cadena de trefilado.

Para corroborar la fiabilidad de los datos obtenidos, la variación de las tensiones exteriores entre la celda origen (elemento de cálculo de partida) y la celda aislada no puede ser superior al 5%. Para ello se han realizado comprobaciones de la distribuciones y valores de las variables internas en ambos casos, de igual forma que se realizó en el apartado anterior con respecto a la verificación de las modelizaciones de los micro-defectos generados por inclusiones. En todos los casos de los elementos seleccionados (celda aislada) de las probetas axisimétricas se ha observado que la comparativa de los valores de las variables no superan el porcentaje aceptable para la ratificación de los cálculos.

De igual forma que para las modelizaciones de los microdefectos en las probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de tracción, apartado 1.1 de este capítulo, los microdefectos generados por las inclusiones de tipo blando se han realizado sin un material diferente dentro de dicho micro-defecto, puesto que estas inclusiones no oponen resistencia a la deformación del mismo, y debido a la simplificación de los problemas de excesivas deformaciones y malla comentados en apartados anteriores.

En las modelizaciones de los micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro se han incluido, en dicho micro-defecto, inclusiones con morfología esférica separadas de éste 0,0002 mm, para evitar así problemas de contacto iniciales entre la matriz y la inclusión, y se ha supuesto que dicha inclusión de tipo duro posee un modulo de Young de 352 GPa, así como un coeficiente de poisson de 0,24 (YU *et al.*, 2003), de igual forma que el apartado 1.1.

En el presente estudio se ha optado por modelizar las probetas axisimétricas entalladas procedentes del alambroón inicial y el alambre de pretensado final, por ser estos alambres los dos casos extremos de la cadena de trefilado, obteniéndose la variación de factor de forma (ΔS) de los micro-defectos generados por las inclusiones de tipo duro y de tipo blando en los elementos con mayor triaxialidad de los cálculos previos ejecutados. Debido a estos cambios morfológicos de los micro-defectos, los cuales incluyen deformaciones en los tres ejes principales, las mediciones de los factores de forma finales (S') se han realizado en los ejes de la elipse resultante a la cual se ha asemejado el micro-defecto, a' y b' .

Si se toma como factor de forma final $S'=a'/b'$ y como factor de forma inicial $S=a/b$ del micro-defecto generado por la inclusión, la diferencia entre estos (ΔS) representará el cambio morfológico sufrido por dicho micro-defecto durante el ensayo bajo sollicitación de tracción al

cual han sido sometidas las probetas axisimétricas objeto de estudio. A continuación se muestran los resultados obtenidos de la diferencia entre los factores de forma finales y iniciales de los micro-defectos para ambos tipos inclusiones analizadas, Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Diferencia de los factores de forma (ΔS) de los micro-defectos.

PROBETA	INCLUSIÓN DURA	INCLUSIÓN BLANDA
A0	0.07	0.14
A7	0.20	0.28
B0	0.09	0.14
B7	0.09	0.15
C0	0.35	0.84
C7	0.19	0.62
D0	0.40	0.95
D7	0.52	1.10

Como se ha podido observar en los distintos factores de forma analizados, los mayores cambios morfológicos se producen en los micro-defectos presentes en las probetas axisimétricas con entalla de tipo D (gran radio de curvatura y profundidad) siendo mayor el cambio morfológico generado en los micro-defectos modelizados correspondientes a las inclusiones de tipo de tipo blando para las probetas D7, Fig. 4.71.

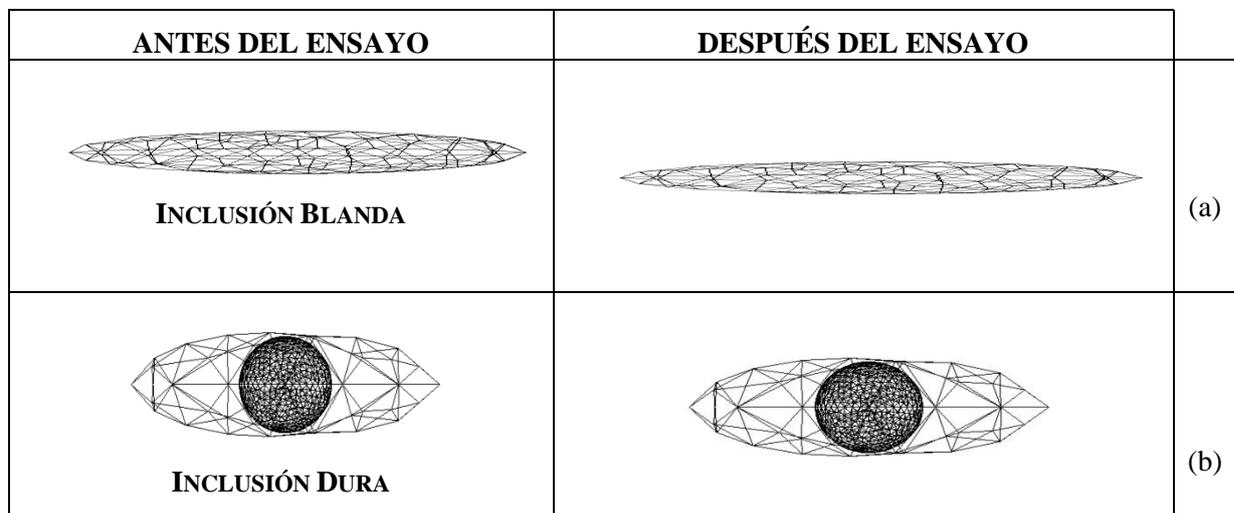


Fig. 4.71. Micro-defectos origen y cambios de factor de forma de éstos en la probeta D7 generados por inclusiones de: (a) tipo blanda y (b) de tipo duro.

En todos los micro-defectos analizados el factor de forma experimenta mayores variaciones para los generados por inclusiones de tipo blando. Cabe señalar la menor variación de factor de forma que experimentan los micro-defectos de las probetas con entallas A y B procedentes del alambroón inicial. Sin embargo en las probetas con entallas de tipo C y D se producen

variaciones de factor de forma superiores al resto, en éstas la mayor variación se experimenta para las probetas de tipo D en las que se han mecanizado a partir del alambre de pretensado (D7) mientras en las probetas con entallas de tipo C las mayores variaciones del factor de forma de los micro-defectos las experimentan las probetas procedentes del alambroón inicial, alambre sin trefilar (C0).

El cambio morfológico del factor de forma lleva consigo mayores tensiones producidas en los bordes de los micro-defectos. Sin embargo, cabe señalar que las mayores variaciones de tensiones vienen producidas por la resistencia a la deformación del micro-defecto que generan las inclusiones de tipo duro. Con los cortes sobre los planos principales realizados sobre las modelizaciones de dichos micro-defectos se ha observado cómo tanto la tensión de von Mises como la hidrostática poseen distribuciones similares en todos los casos estudiados, independientemente de la ubicación y del tipo de micro-defecto, siendo dicha distribución con valores mayores en la zona central del micro-defecto en el plano $y-z$, y disminuyendo dichos valores gradualmente a ambos lados de la misma hasta hacerse mínimos en los extremos, como se observa en la Fig. 4.72-4.73, correspondiente a diferentes planos de corte del micro-defecto simulado en la probeta en la zona de mayor triaxialidad.

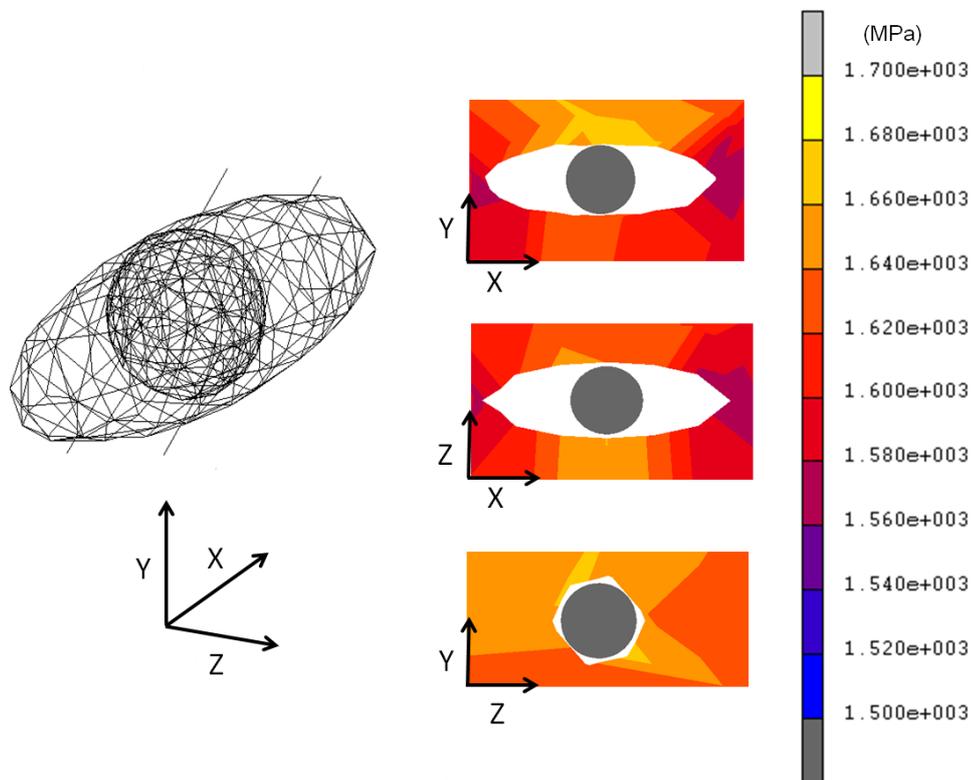


Fig. 4.72. Distribución de los valores de la tensión de σ_{eq} en el micro-defecto generado por una inclusión de tipo duro en la zona de la entalla perteneciente a la probeta A7.

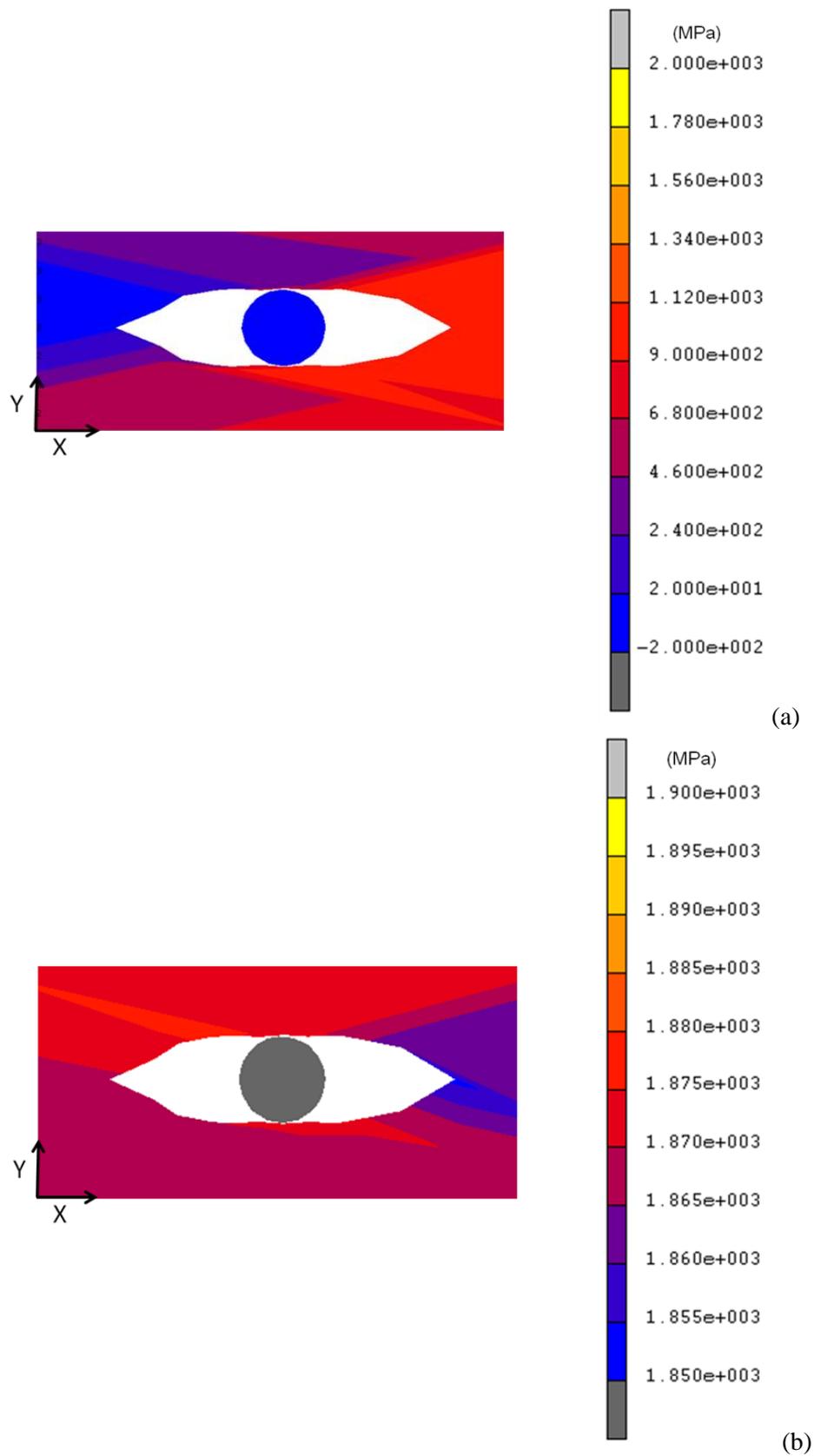


Fig. 4.73. Distribución de las tensiones: (a) σ_y y (b) σ_{eq} en micro-defectos de tipo duro en la probeta B7.

Las mayores variaciones de tensiones obtenidas en los bordes de los micro-defectos en comparación con las tensiones presentes en las caras externas de la *celda aislada*, corresponden a los micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro. Puesto que dichos micro-defectos generan las mayores tensiones, debido a la resistencia a la deformación de las inclusiones de tipo duro, éstos se considera que tendrán una mayor relevancia como concentradores de tensiones.

Los valores mayores registrados con respecto a la celda origen, así como en la comparativa con los valores obtenidos del resto de modelizaciones de microdefectos, son los pertenecientes a las probetas con entalla de tipo B generados por inclusiones de tipo duro. A continuación se han extraído diferentes planos de corte de en los cuales se muestran la distribución de los valores de la tensión de von Mises y la tensión hidrostática en los generados por las inclusiones de tipo duro en la probeta B7, Fig. 4.73.

3. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURA A FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS EN PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS.

3.1. Modelización como medio continuo

En el capítulo anterior de la presente Tesis se ha estudiado el comportamiento del material en fractura para dos tipos de entallas prismáticas sometidas a ensayos de sollicitación de flexión por cuatro puntos, PA y PC, en función de las *variables externas*. En éste apartado se realiza un estudio por medio de la utilización del MEF, el cual va a permitir el cálculo de *variables internas* (tensiones y deformaciones) de dichas probetas.

Para la obtención de las variables internas que imperan en este tipo de probetas durante el ensayo de flexión se ha empleado el programa de cálculo (MARC®) el cual se fundamenta en el MEF.

Al igual que sucedía en la modelización numérica de los ensayos bajo sollicitación de tracción de las probetas prismáticas y axisimétricas entalladas, en estas simulaciones también se consideran dos no linealidades dentro del problema objeto de cálculo. Por un lado la no linealidad se introduce en el análisis para incluir el comportamiento elastoplástico del material durante el ensayo bajo sollicitación de flexión y por otro parte la segunda no linealidad se debe a considerar en el análisis las grandes deformaciones que se producen en la probeta durante dicho ensayo (concretamente en aquellas zonas cercanas a la entalla).

De igual forma, para la realización de la simulación numérica mediante MEF de los ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos de probetas entalladas se ha introducido el comportamiento plástico del alambcón inicial, de los alambres pertenecientes al tercer y cuarto paso del proceso y alambre de pretensado comercial, dependiendo del caso de estudio a analizar, así como el modulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν), la curva de comportamiento plástico y el criterio de plastificación (tipo von Mises).

La modelización de las distintas probetas estudiadas (PA y PC), se ha realizado teniendo en cuenta las medidas originales de las mismas, es decir incorporando a dichas geometrías los errores cometidos durante el proceso de mecanizado, anexo II. La geometría de las probetas objeto de estudio posee dos planos de simetría de modo que se ha representado 1/4 de la probeta de partida para todos los tipos de entalla analizados tal y como se muestra en la siguiente Fig. 4.74.

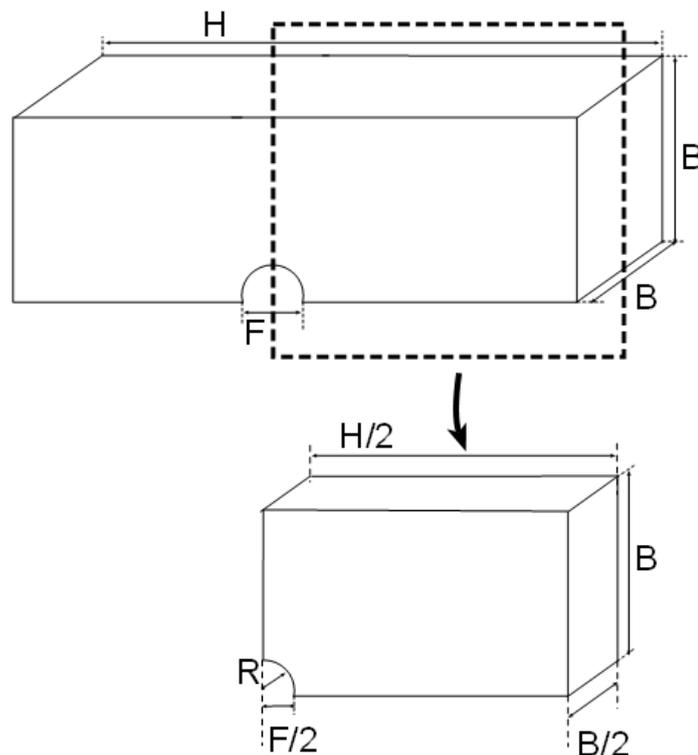


Fig. 4.74. Secciones utilizadas para el cálculo mediante MEF de las probetas prismáticas.

Una vez seleccionadas las secciones geométricas de cálculo, se aplica a éstas las condiciones de contorno debidas a la geometría de partida, Fig. 4.75. En dicha figura se muestra un desplazamiento impedido en la dirección del eje y y situado en la fibra neutra de la probeta, Fig. 4.75 (a); otro de los desplazamientos impedidos, en este caso en el eje x , ha sido impuesto en la sección de corte de dicha probeta, sección media de la entalla, Fig. 4.75 (b), y los desplazamientos impedidos en todos los ejes principales aplicados al rodillo inferior

(suponiéndose éste como un sólido rígido dentro de todas las simulaciones numéricas). Por último se ha impuesto la condición de desplazamiento en el eje y del rodillo superior, el cual se desplazará según el registro obtenido en cada uno de los ensayos de flexión modelizados, Fig. 4.75(c). Cabe señalar que el rodillo inferior también ha sido considerado en las modelizaciones numéricas como un sólido rígido con desplazamientos impedidos en los ejes x y z , Fig. 4.75 (d).

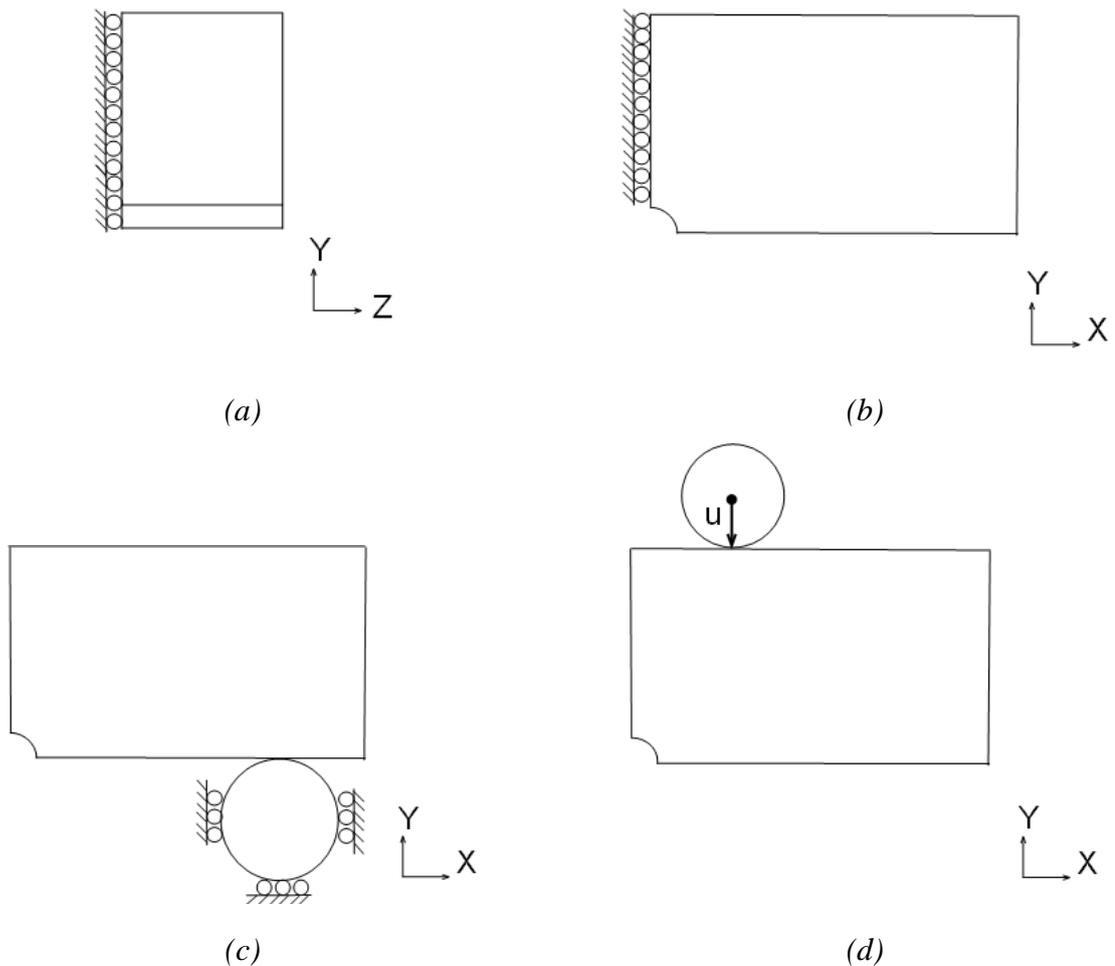


Fig. 4.75. Condiciones de contorno en la simulación numérica de las probetas prismáticas a flexión: desplazamientos impedidos (a) en el eje y y de fibra neutra, (b) en el eje x , (c) en el rodillo inferior y (d) eje y y condición de ensayo u .

Para corroborar el grado de aproximación es necesario realizar dos tipos de convergencias en los cálculos: la primera de ellas en referencia al número de elementos denominada *convergencia de malla* y la segunda a la discretización del tiempo de cálculo denominada *convergencia numérica*. Para llevar a cabo las convergencias se ha optado por realizar éstas en el alambroón inicial y en el alambre de pretensado comercial, de igual forma que en el caso de la modelización de las probetas prismáticas y asiximétricas entalladas, teniendo en cuenta

que la validez de las mallas y tiempos de cálculo en estas simulaciones numéricas implica la validación de las mismas en los alambres intermedios, en este caso del tercer y cuarto paso del proceso de trefilado. Como conclusiones de la realización de dichas convergencias, las cuales implican la variación del número de elementos que conforman la malla de la probeta y la variación de los incrementos de tiempo en los cuales se dividen los cálculos, se ha optado por utilizar mallas compuestas por 12000 elementos y 500 incrementos de tiempo.

Tras la realización de los distintos cálculos mediante el MEF, modelizando numéricamente los ensayos objeto de estudio para ambos tipos de entallas, se procedió a la segunda verificación de los mismos, la cual consiste en comparar las curvas $F-u$ obtenidas de los ensayos, curvas experimentales, con las con las curvas $F'-u'$ obtenidas en las simulaciones correspondientes, curvas numéricas. Las comparaciones entre ambos tipos de curvas (Figs. 4.76-4.77) se han representado para las probetas prismáticas mecanizadas a partir del alambroón (PA0 y PC0), a partir de un paso intermedio del proceso del trefilado (PA4 y PC4) y a partir del alambre de pretensado comercial o producto final del trefilado (PA7 y PC7).

Las figuras que se exponen a continuación ratifican los cálculos de los ensayos realizados mediante MEF, observándose en éstas como las curvas $F-u$ experimentales obtenidas de los ensayos realizados bajo sollicitación deflexión por cuatro puntos coinciden con las curvas $F'-u'$ numéricas extraídas de las modelizaciones realizadas. Como se puede observar en dichas figuras, las curvas (experimental y numérica) son prácticamente idénticas en muchos de los casos expuesto, observándose las mayores diferencias entre ambas en las probetas obtenidas del alambroón inicial.

Una vez verificadas las modelizaciones numéricas de los ensayos de ambos tipos de probetas prismáticas, no sólo con la realización de convergencias sino complementándose éstas con la comparativa de las curvas experimental y numérica de estos ensayos, se ha procedido a extraer las siguientes variables internas en el instante final de la fractura; tensiones normales (σ_x , σ_y , σ_z), tensión equivalente de von Mises (σ_{eq}), tensión hidrostática (σ) y deformación plástica acumulada (ϵ_{eq}^P). A continuación se exponen las fractografías de las probetas tipo de cada terna analizada, para ambos tipos de entalla, acompañadas de los mapas de contorno de las variables internas extraídas de las modelizaciones numéricas correspondientes a cada una de las probetas en cuestión, Figs. 4.78-4.89, correspondientes al momento del ensayo en el cual ocurre la fractura total por separación de superficies de las probetas entalladas. En dichas figuras se observa la distribución de las diferentes variables analizadas, así como el cambio morfológico sufrido por superficie de fractura de la probeta sometida a ensayo de flexión por cuatro puntos.

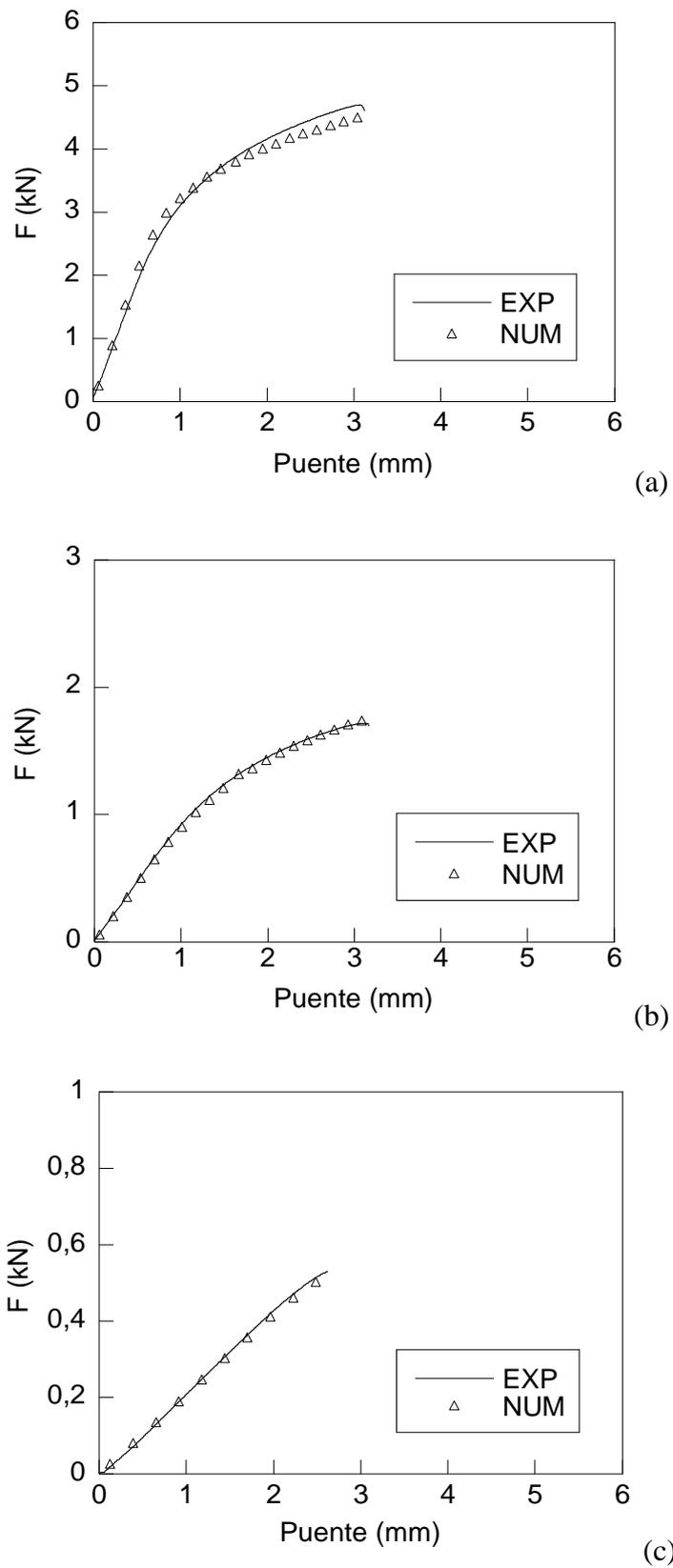


Fig. 4.76. Curvas carga-desplazamiento (experimental vs numérica) para las probetas prismáticas: (a) PA0, (b) PA4 y (c) PA7.

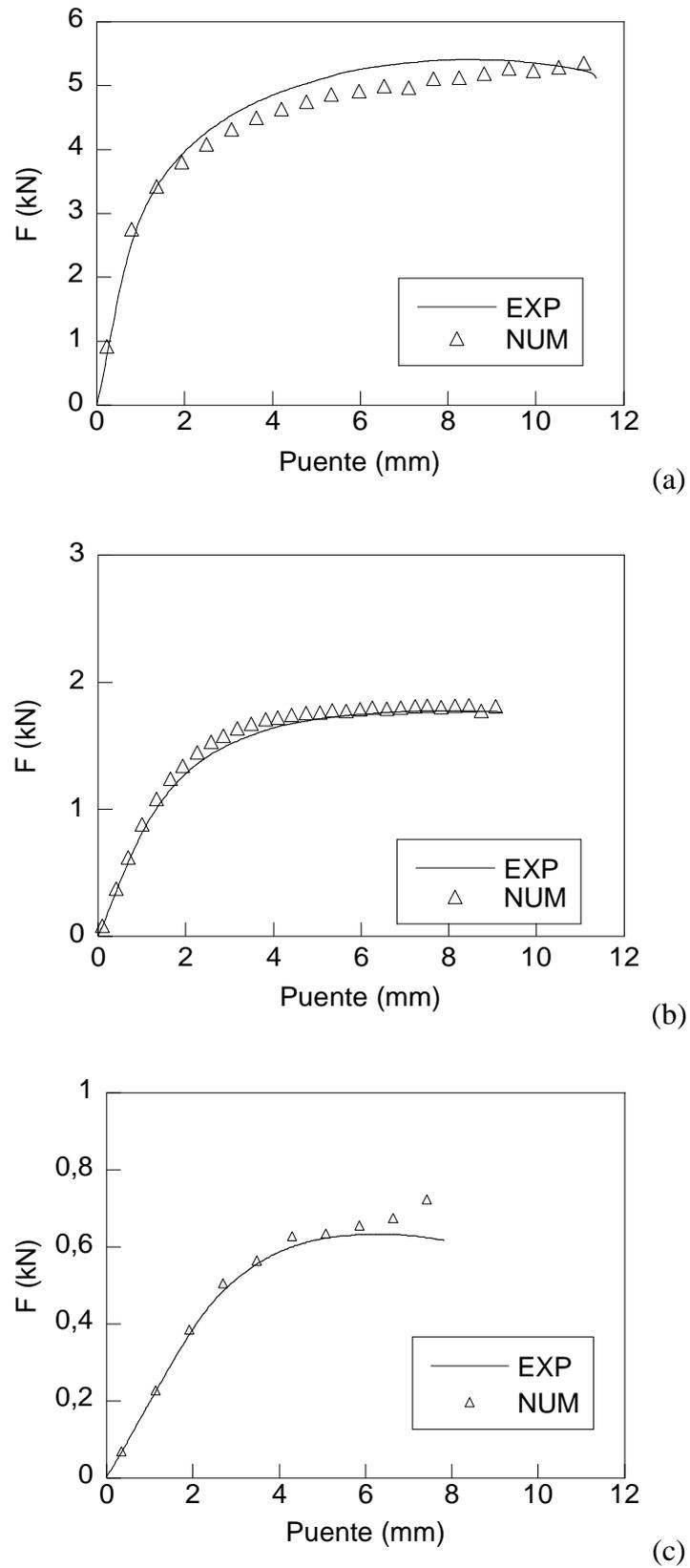


Fig. 4.77. Comparativa curva experimental vs numérica probetas: (a) PC0, (b) PC4 y (c) PC7.

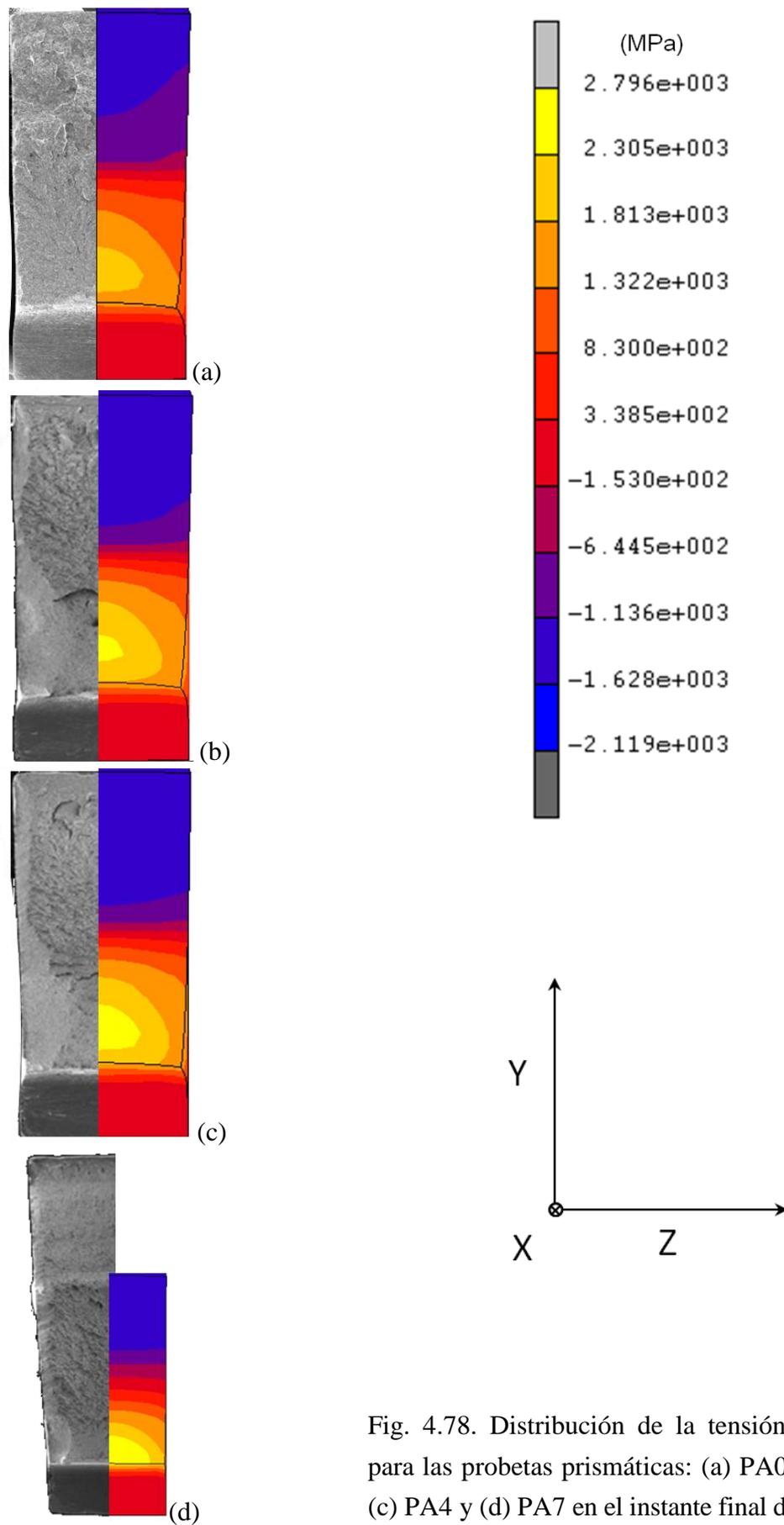


Fig. 4.78. Distribución de la tensión axial σ_x , para las probetas prismáticas: (a) PA0, (b) PA3, (c) PA4 y (d) PA7 en el instante final de fractura.

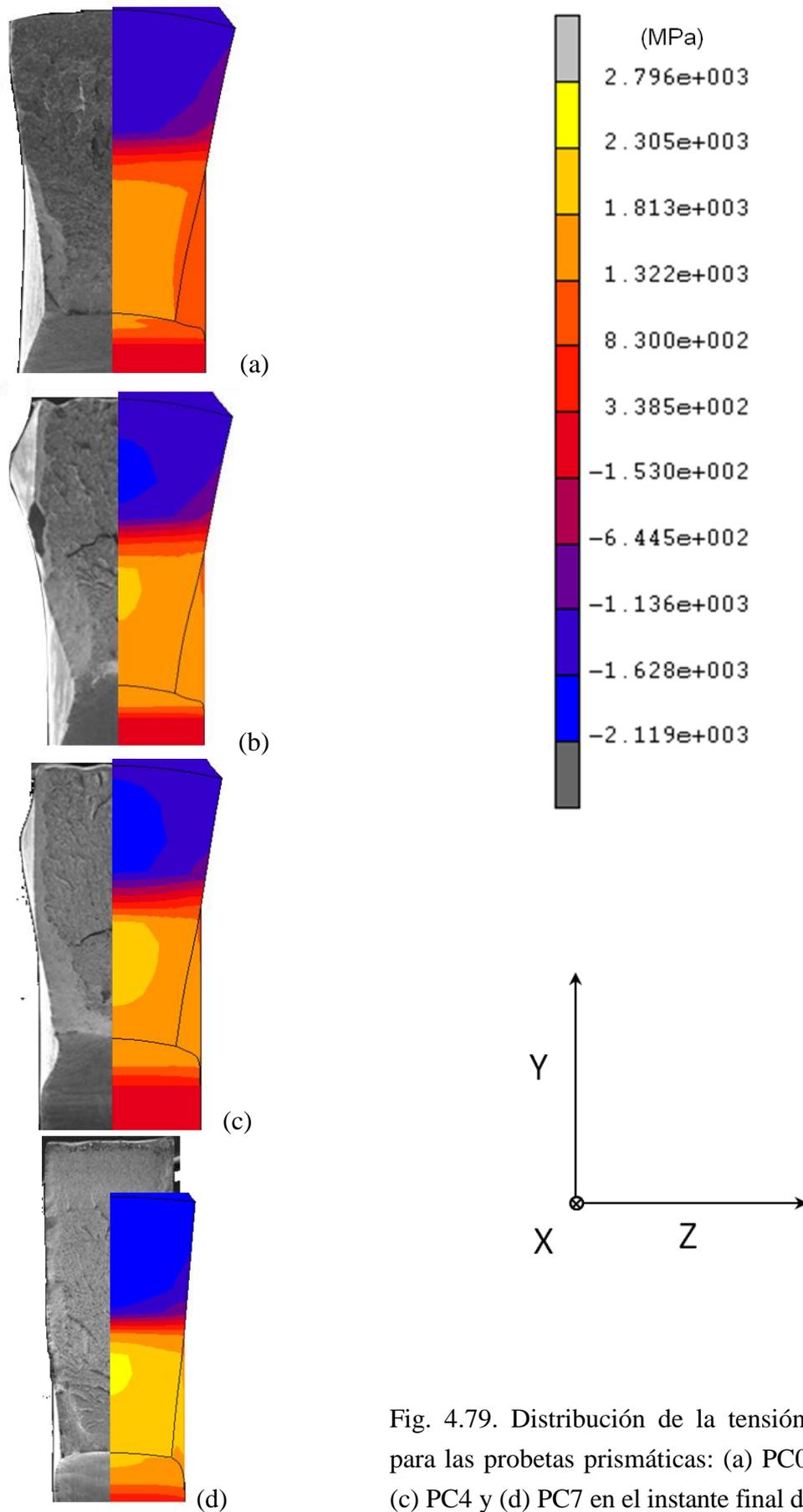


Fig. 4.79. Distribución de la tensión axial σ_x , para las probetas prismáticas: (a) PC0, (b) PC3, (c) PC4 y (d) PC7 en el instante final de fractura.

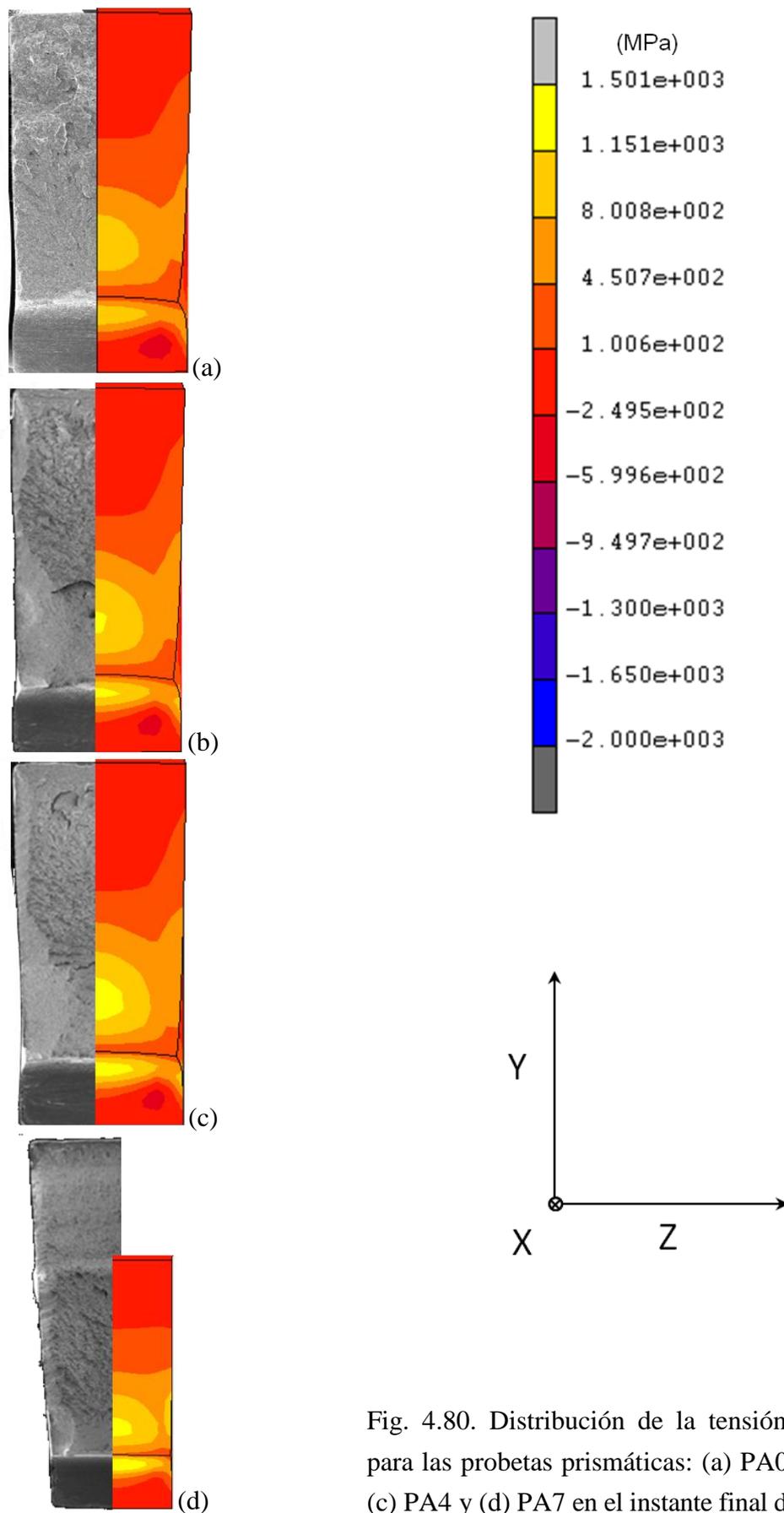


Fig. 4.80. Distribución de la tensión axial σ_y , para las probetas prismáticas: (a) PA0, (b) PA3, (c) PA4 y (d) PA7 en el instante final de fractura.

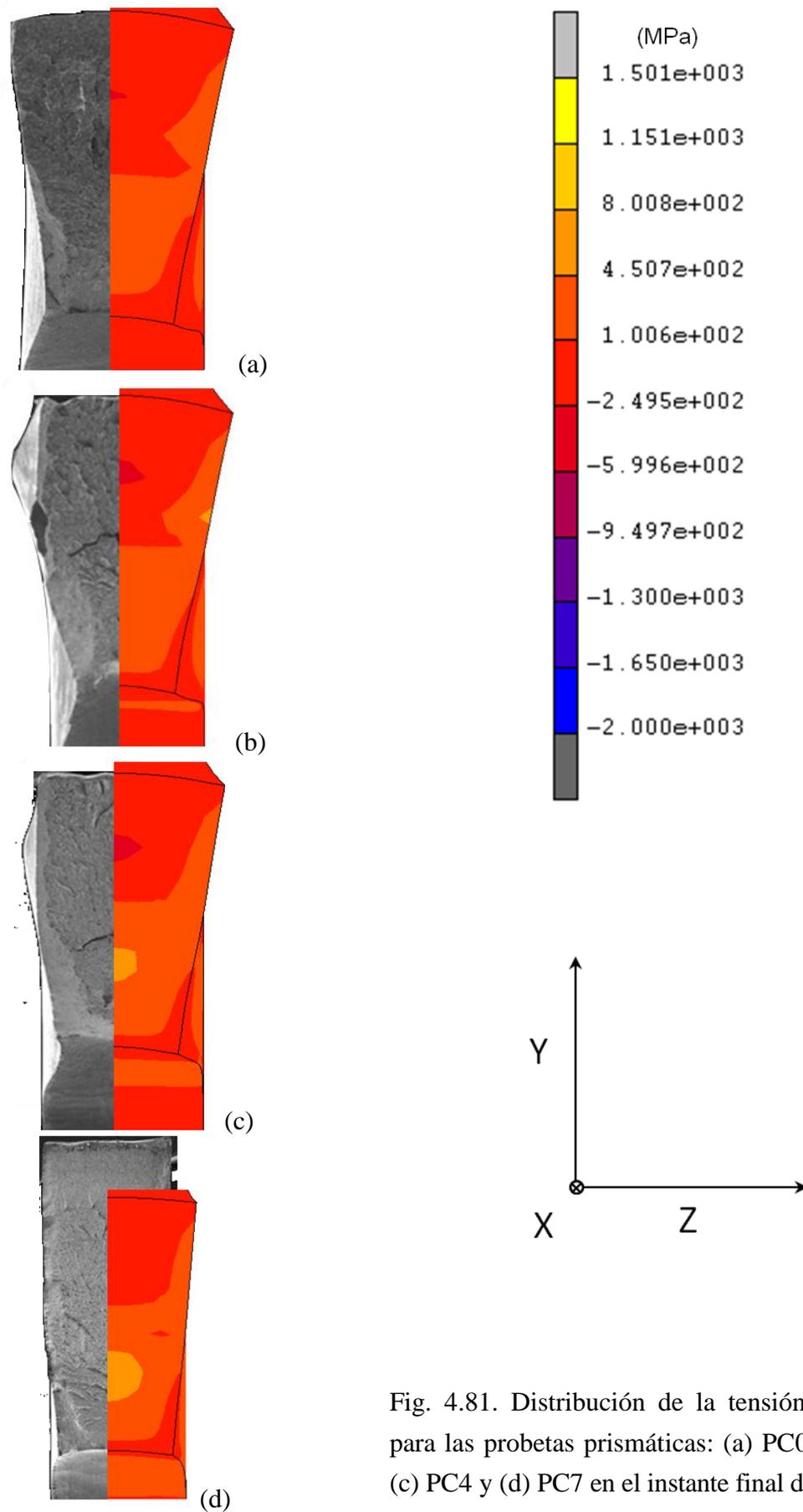


Fig. 4.81. Distribución de la tensión axial σ_y , para las probetas prismáticas: (a) PC0, (b) PC3, (c) PC4 y (d) PC7 en el instante final de fractura.

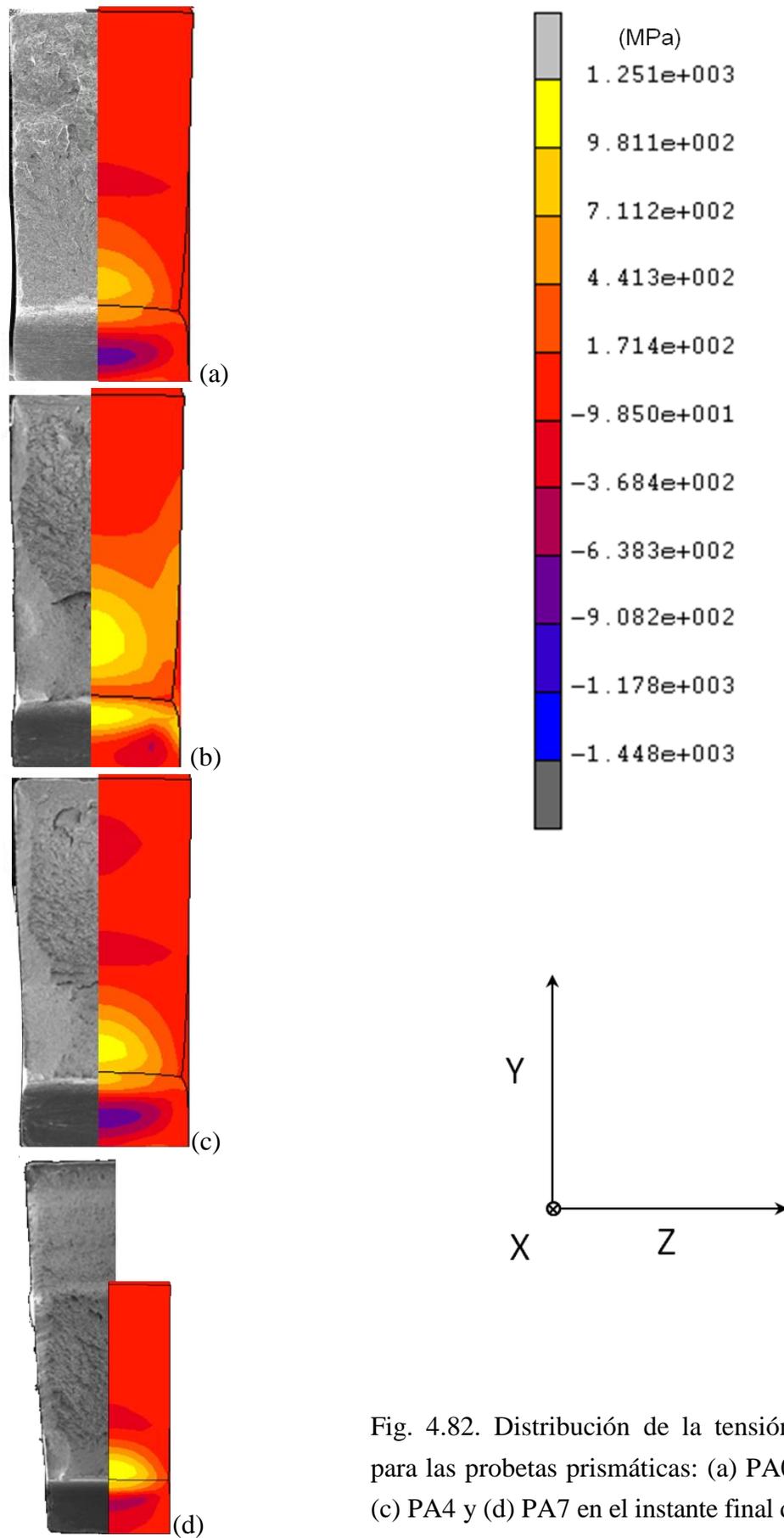


Fig. 4.82. Distribución de la tensión axial σ_z , para las probetas prismáticas: (a) PA0, (b) PA3, (c) PA4 y (d) PA7 en el instante final de fractura.

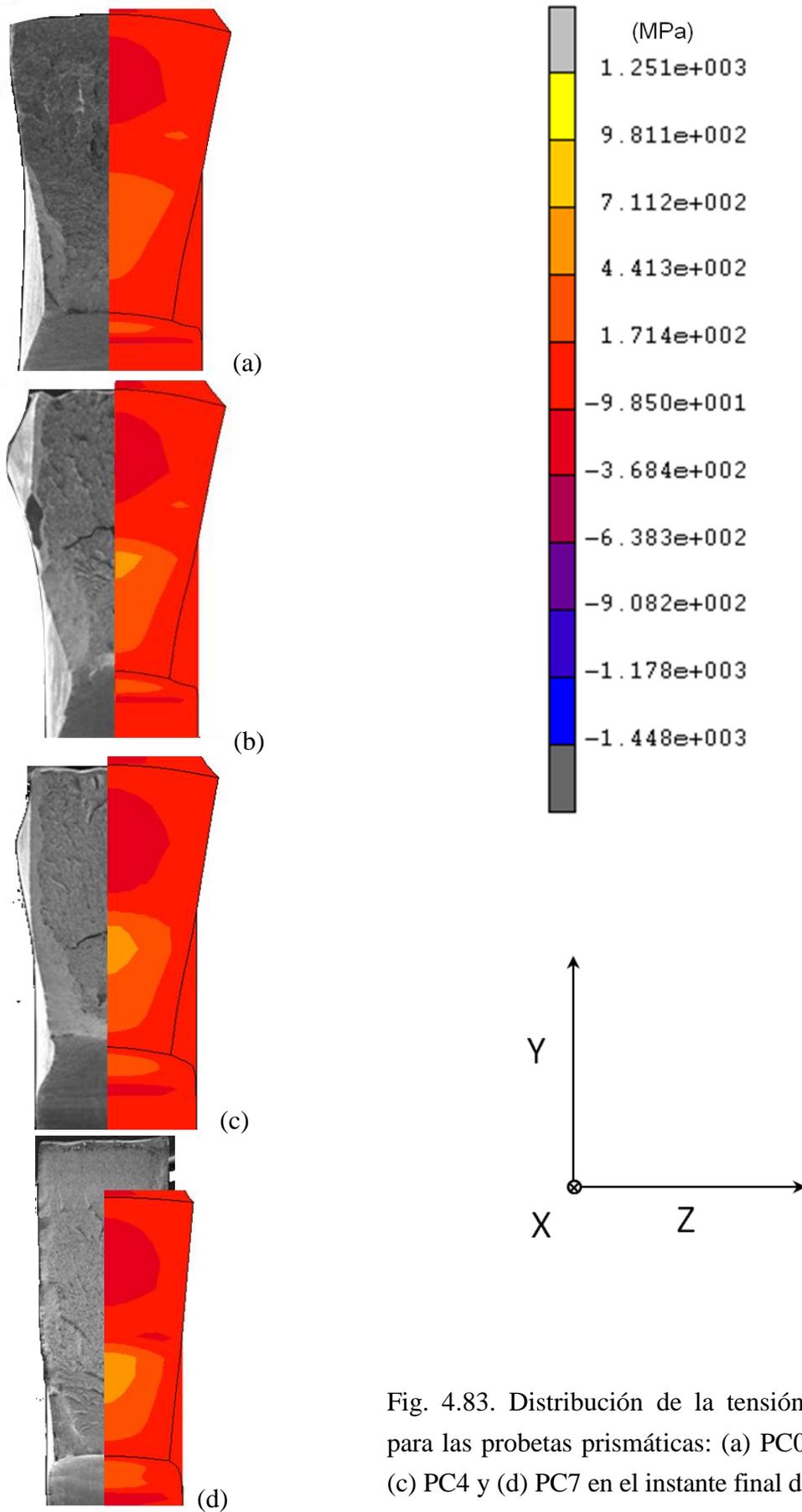


Fig. 4.83. Distribución de la tensión axial σ_z , para las probetas prismáticas: (a) PC0, (b) PC3, (c) PC4 y (d) PC7 en el instante final de fractura.

En las figuras anteriores se muestra, como se ha comentado, la distribución de las tensiones normales σ_x , σ_y y σ_z obtenidas de las simulaciones numéricas de las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación deflexión por cuatro puntos. En éstas se ha mostrado conjuntamente los mapas de contorno de las distintas tensiones, en la sección media de la probeta, así como la superficie de fractura correspondiente a cada probeta en cuestión.

La distribución de tensión normal en el eje x muestra valores significativamente mayores en las probetas con entallas de tipo A, en éstas los valores máximos se alcanzan en las proximidades de la entalla, Fig. 4.78. Al contrario sucede en las probetas prismáticas con entalla de tipo C en las cuales los máximos valores de tensión principal en el eje x se alcanzan en la zona central inferior de la sección neta, Fig. 4.79. En todas las probetas analizadas aumenta los valores de ésta tensión a medida que avanza el proceso de trefilado. Cabe señalar que en las probetas con entalla de tipo A pertenecientes al alambre de pretensado la zona de máximos valores de σ_x se extiende hasta el fondo de entalla. También se puede observar como los valores de la tensión principal en el eje x son negativos, de compresión, en las zonas superiores de la superficie para todas las probetas analizadas sometidas a éste tipo de ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos.

En el análisis de la tensión normal en el eje y , σ_y , tal y como se muestra en las Figs. 4.80-4.81, se alcanzan los valores mayores en las probetas con entalla de tipo A, al igual que sucedía en la tensión principal del eje x . Las probetas con entalla de tipo A presentan los máximos valores de dicha tensión en la zona próxima a la entalla. En las probetas con entalla de tipo C los valores máximos de σ_y se presentan en la zona central de la superficie. En ambos tipos de probetas entalladas aumentan los valores de esta tensión a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre. La σ_y también presenta valores negativos en todas las probetas analizadas en la zona superior de dichas superficies.

La tensión normal σ_z , se comporta igual en cuanto a la distribución que la tensión σ_x y σ_y , habiéndose obtenido en ésta los máximos valores en las probetas con entalla de tipo A, además de presentarse los máximos valores en las zonas próximas a la entalla, Figs. 4.82. De forma análoga las probetas con entalla de tipo C presentan sus valores máximos en la zona central de la superficie neta, Figs. 4.83. Además dichos valores también aumentan a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre de procedencia y se presentan valores negativos de dicha tensión en la zona superior de éstas.

Cabe señalar que los valores máximos y mínimos de la tensión normal en el eje x mostrados por las probetas analizadas son superiores a los mostrados por las tensiones normal en los ejes y y z , en los cuales los valores son prácticamente iguales.

En las figuras siguientes, Figs. 4.84-4.89, se muestra la distribución de los valores de la tensión hidrostática (σ), tensión de von Mises (σ_{eq}) y deformación plástica equivalente (ϵ_{eq}^p) justo en el momento de producirse la fractura de las mismas durante los ensayos de flexión, acompañado por las fractografías que muestran las superficies de fractura de las probetas.

La tensión hidrostática obtenida en las distintas probetas presenta valores mayores en las probetas con entalla de tipo A, los cuales están situados en las proximidades de la entalla, Fig. 4.84. En las probetas con entallas de tipo C la superficie con valores máximos se sitúa en la zona central de la superficie, Fig. 4.85. En ambos tipos de probetas analizadas se han obtenido valores mayores de esta tensión cuanto mayor es el grado del alambre trefilado. Ambos tipos de probetas prismáticas entalladas muestran valores negativos en la zona superior de la superficie, los cuales también aumentan a medida que aumenta el grado de trefilado de los alambres originales. Como hecho significativo, el cual también ocurría en la distribución de la tensión normal en el eje x , se ha observado como la zona de máximos valores en la probeta PA7 se sitúa en el fondo de entalla y no sólo en las inmediaciones, como ocurre en el resto de las probetas con este mismo tipo de entalla.

Con respecto al estudio de la distribución de la tensión de von Mises, las probetas con entallas de tipo A presentan los máximos valores, estando éstos situados en las proximidades de los fondos de entalla, Fig. 4.86. Como se ha examinado en el resto de las tensiones analizadas hasta el momento en las probetas prismáticas, las que poseen entalla de tipo C muestran los máximos valores de ésta tensión en la zona central de la entalla, Fig. 4.87. En todos los casos analizados los valores de la tensión de von Mises aumentan a medida que aumenta el paso de trefilado del alambre originario de la probeta en cuestión.

En cuanto a las distribuciones de deformación plástica equivalente obtenidas en las distintas superficies de las probetas modelizadas, éstas presentan valores mayores en las probetas con entalla de tipo C. En todas las probetas analizadas los valores máximos se sitúan en los fondos de entalla, dichos valores ocupan cada vez menores superficies a medida que aumenta el grado de trefilado, Figs. 4.88-4.89.

Una vez obtenidas las distribuciones de los valores de las tensiones y la deformación plástica acumulada, debido al interés del estudio se ha obtenido el valor de la triaxialidad a lo largo del eje y , Fig. 4.90. La triaxialidad (t), como se ha comentado en los apartados anteriores, es una medida del constreñimiento al que se encuentra sometido el material debido a la presencia de las entallas e influye claramente en el propio proceso de fractura. Se obtiene mediante la expresión $t = \sigma / \sigma_{eq}$, siendo σ la tensión hidrostática y σ_{eq} la tensión equivalente o efectiva de von Mises, anteriormente mencionadas.

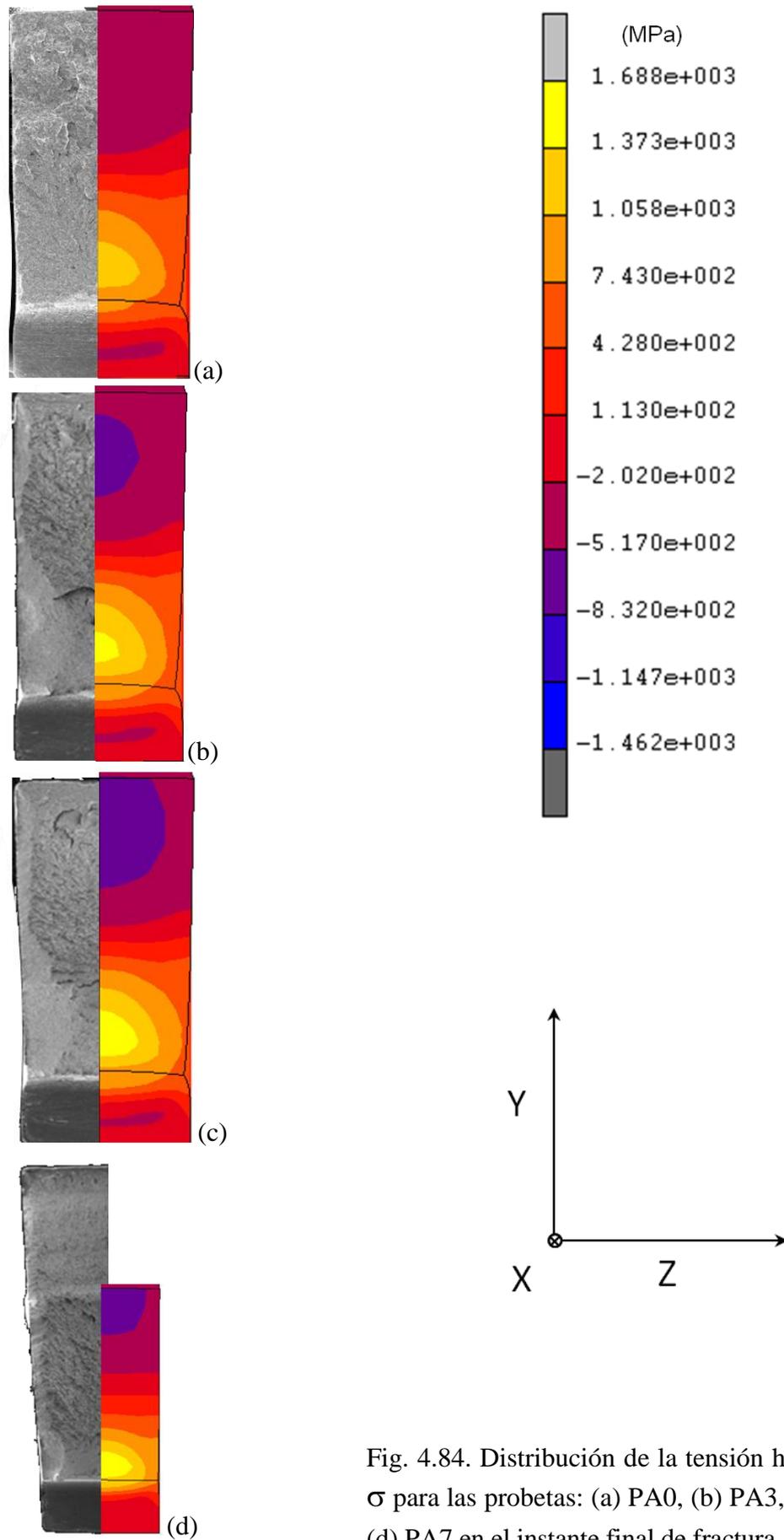


Fig. 4.84. Distribución de la tensión hidrostática σ para las probetas: (a) PA0, (b) PA3, (c) PA4 y (d) PA7 en el instante final de fractura.

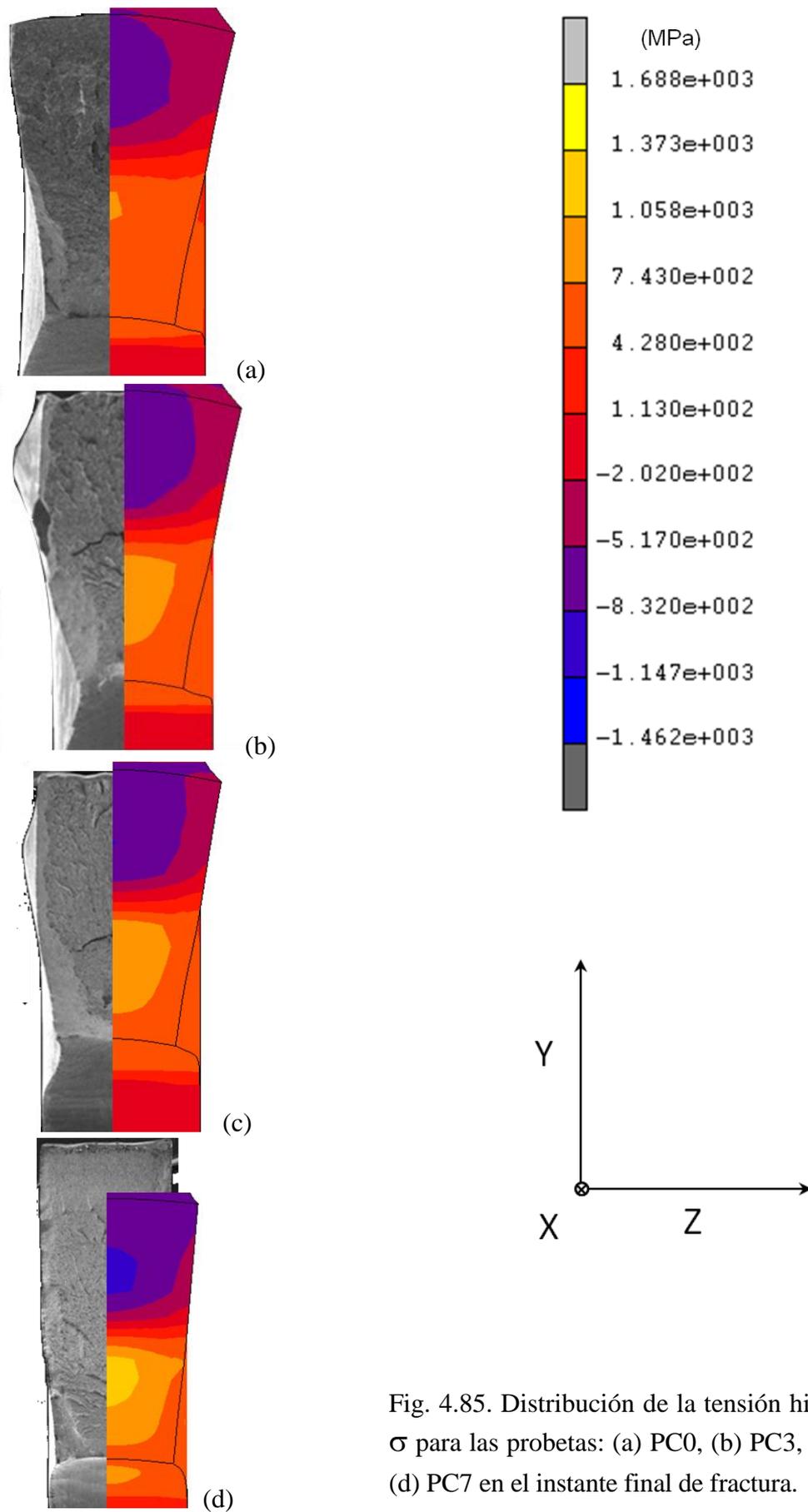


Fig. 4.85. Distribución de la tensión hidrostática σ para las probetas: (a) PC0, (b) PC3, (c) PC4 y (d) PC7 en el instante final de fractura.

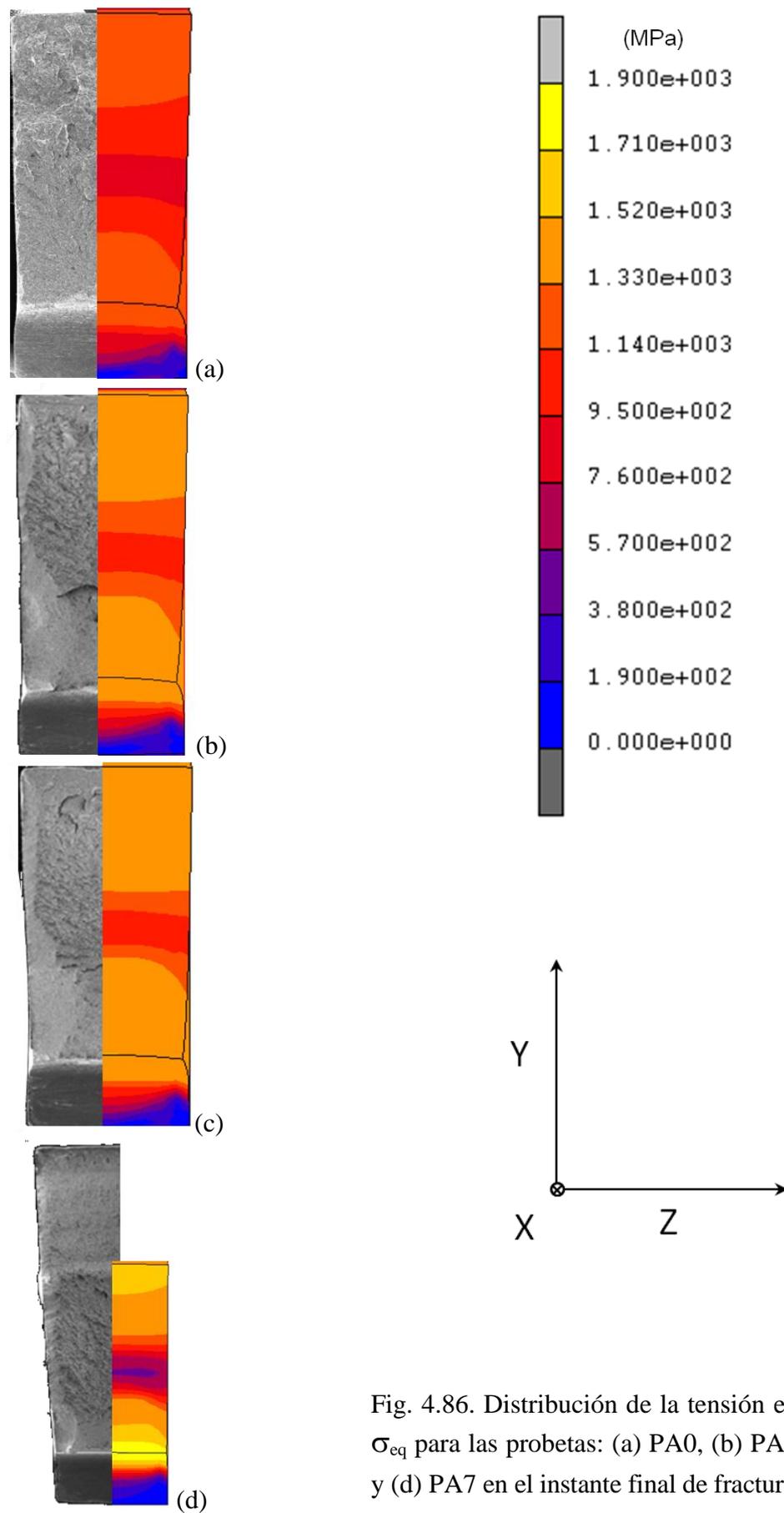


Fig. 4.86. Distribución de la tensión equivalente σ_{eq} para las probetas: (a) PA0, (b) PA3, (c) PA4 y (d) PA7 en el instante final de fractura.

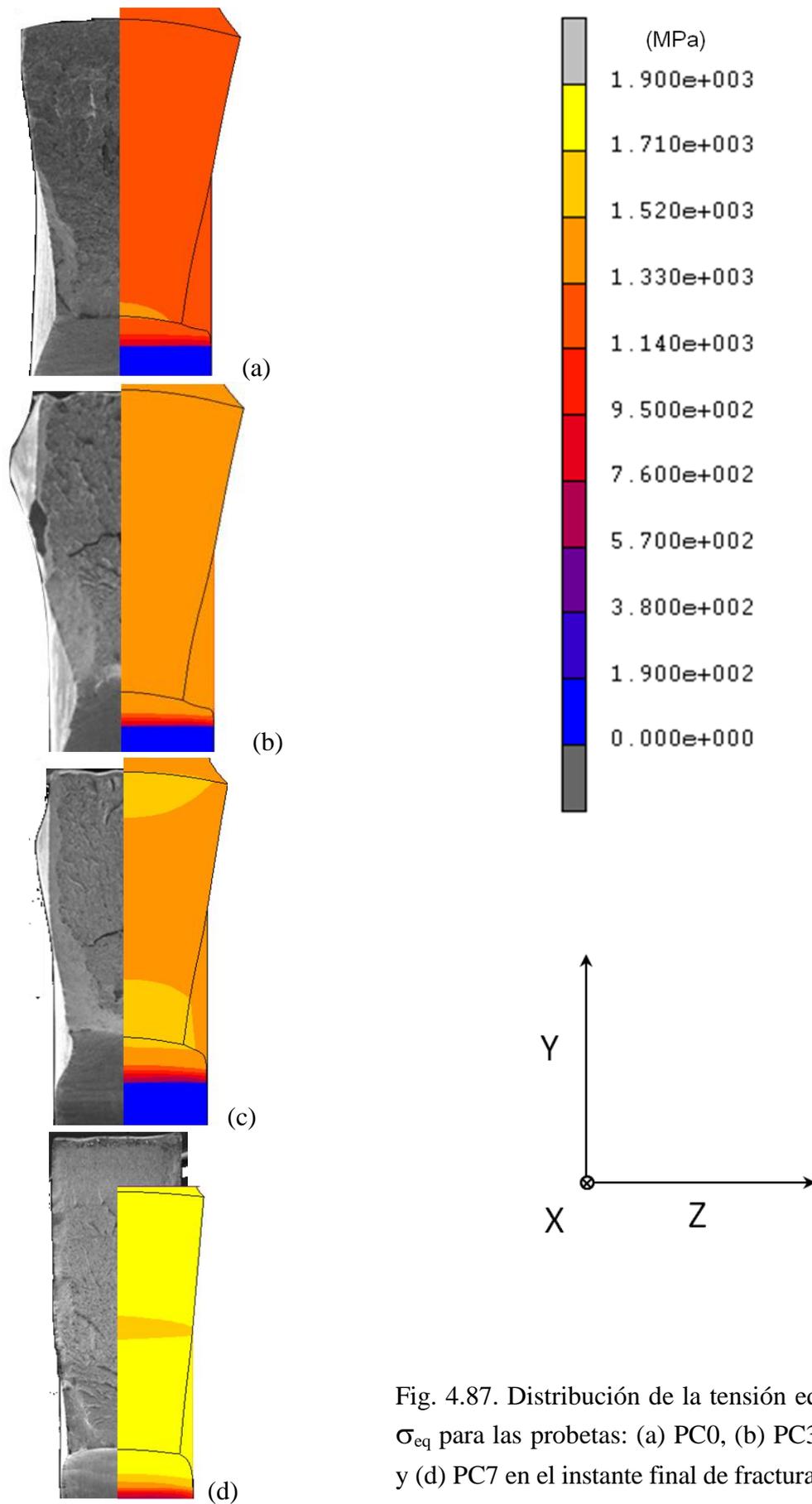


Fig. 4.87. Distribución de la tensión equivalente σ_{eq} para las probetas: (a) PC0, (b) PC3, (c) PC4 y (d) PC7 en el instante final de fractura.

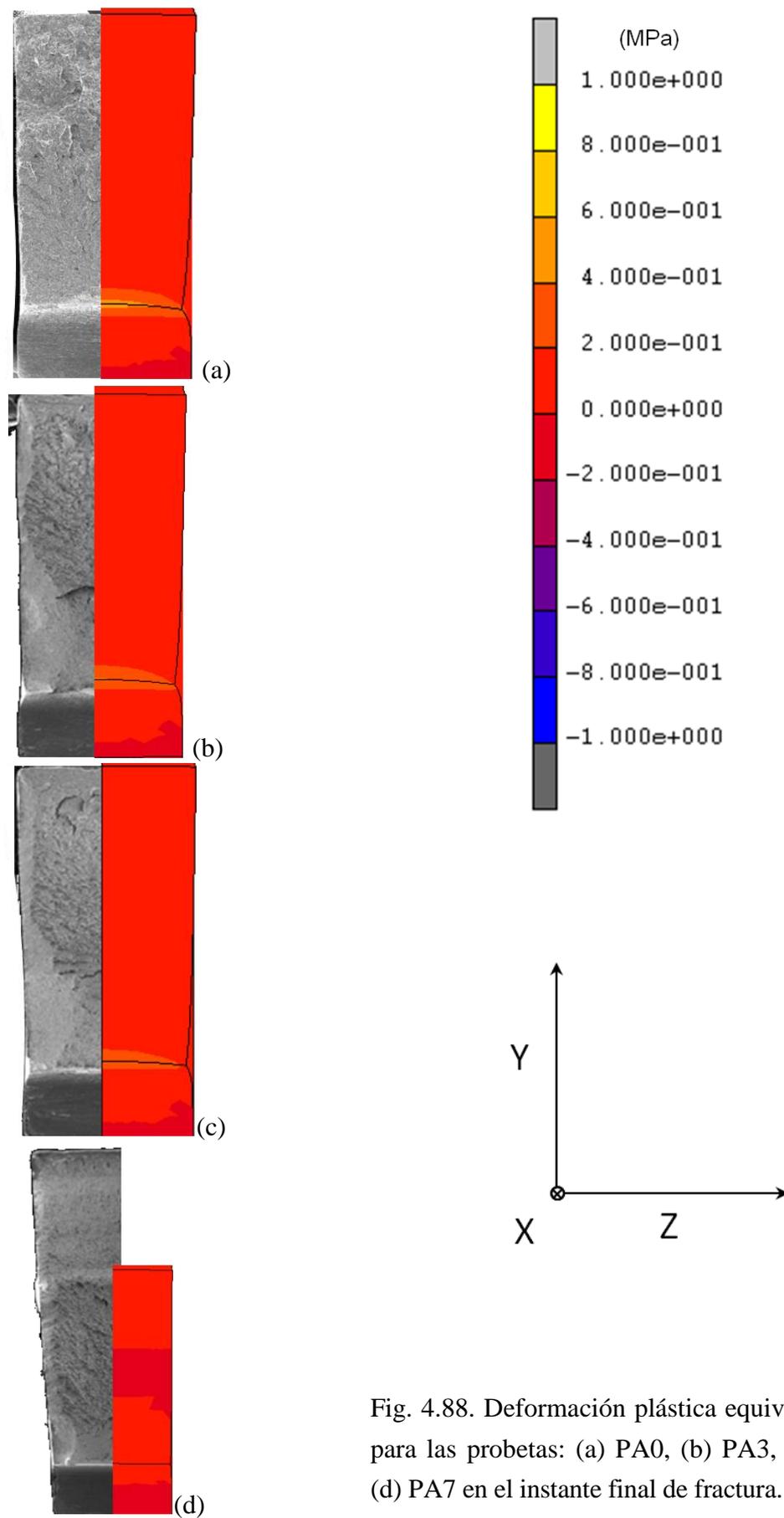


Fig. 4.88. Deformación plástica equivalente ε_{eq}^P para las probetas: (a) PA0, (b) PA3, (c) PA4 y (d) PA7 en el instante final de fractura.

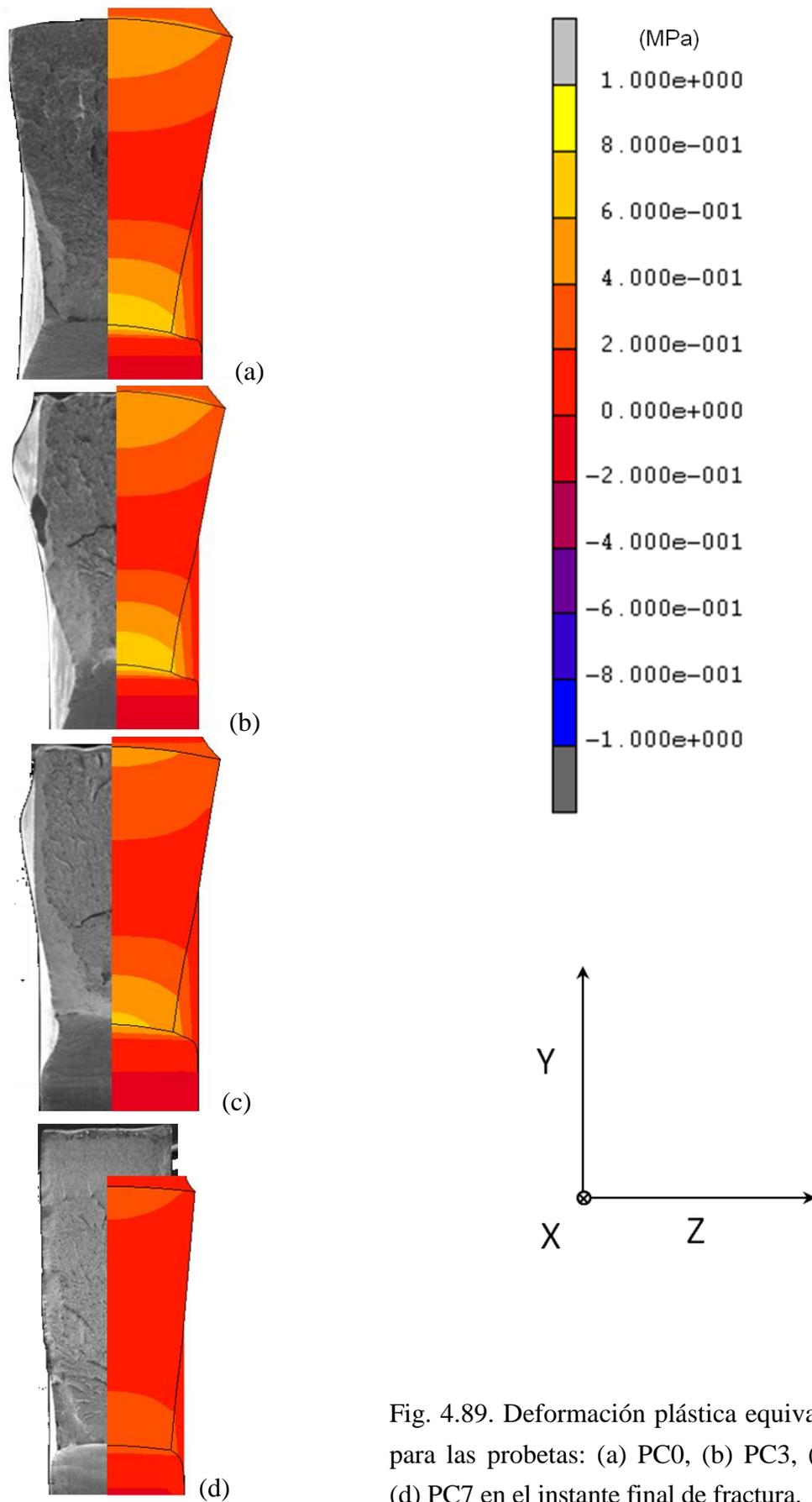


Fig. 4.89. Deformación plástica equivalente ε^P_{eq} para las probetas: (a) PC0, (b) PC3, (c) PC4 y (d) PC7 en el instante final de fractura.

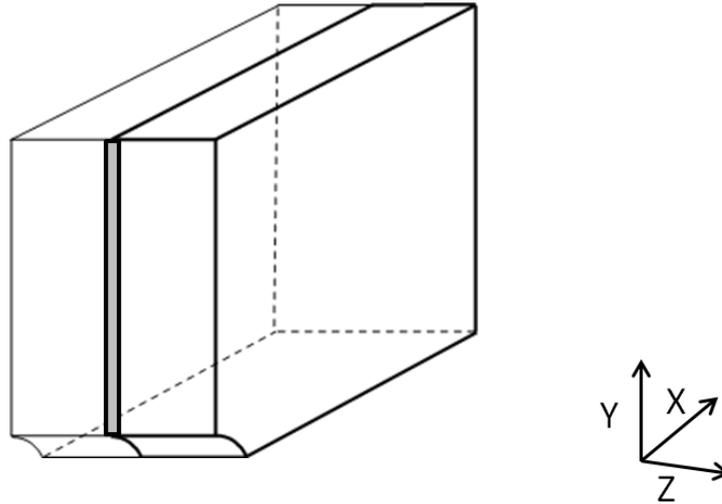


Fig. 4.90. Zona de extracción de datos en la sección neta de las probetas prismáticas.

A continuación se han representado los distintos valores de triaxialidad obtenidos para los distintos tipos de probetas prismáticas estudiadas, Fig. 4.91. Como se puede observar en dicha figura, la triaxialidad es mayor en las proximidades de las entallas para las entallas de tipo A. Las probetas con entallas de tipo A muestran los máximos valores de triaxialidad similares para todos los alambres de los distintos pasos del proceso de trefilado a partir del los cuales han sido mecanizadas. En las probetas con entalla de tipo C la zona de máximos valores de triaxialidad está más alejada del fondo de entalla que para las de tipo A (menor radio de curvatura). En ambos tipos los máximos valores de triaxialidad son similares entre probetas con el mismo tipo de entalla.

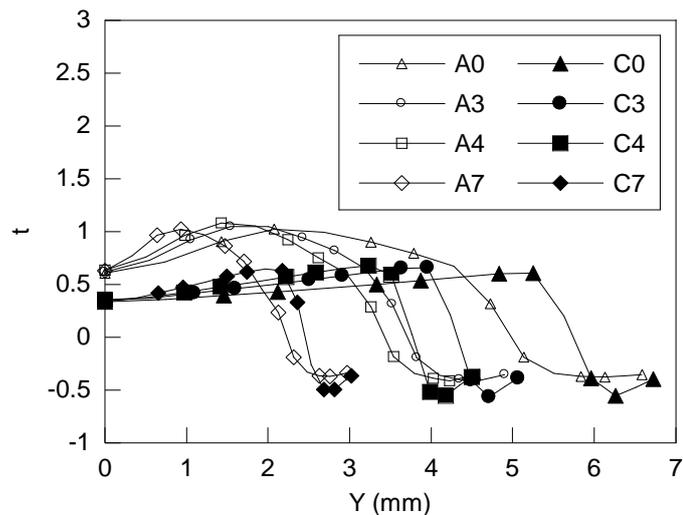


Fig. 4.91. Triaxialidad para las probetas prismáticas a lo largo del eje y.

3.2. Modelización de microdefectos generados por inclusiones

Una vez realizadas las modelizaciones numéricas de los ensayos bajo sollicitación de flexión de las probetas prismáticas entalladas, y una vez obtenidos los resultados de las distribuciones y valores de las distintas variables internas, se ha procedido a introducir en los elementos con mayor triaxialidad de dichas probetas los microdefectos generados por las inclusiones. Para tal fin se ha seguido el procedimiento ya empleado en las modelizaciones realizadas en los apartados 1.1 y 2.1 de éste mismo capítulo, en los cuales se modelizan numéricamente dichos microdefectos en las distintas probetas prismáticas y axisimétricas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. El objetivo principal de estas modelizaciones es cuantificar los cambios morfológicos sufridos por los microdefectos debidos a las diferentes inclusiones, así como analizar la distribución y valor de las variables internas, tensión equivalente de von Mises (σ_{eq}), tensión hidrostática (σ) y deformación plástica acumulada (ϵ_{eq}^P), que imperan en los bordes de éstos microdefectos.

Las modelizaciones de los microdefectos generados por inclusiones también se han realizado teniendo en cuenta los resultados de estudios previos de clasificación de inclusiones y sus microdefectos anteriormente expuestos en el apartado 2.3.1 del capítulo II de la presente Tesis. De esta forma se han modelizado dos tipos de inclusiones duras y blandas y, como en los apartados 1.1 y 2.2 del presente capítulo, se han tomado los factores de forma de los microdefectos generados por éstas en los distintos alambres del proceso de trefilado, Tabla 4.5. En cuanto al tamaño de los microdefectos introducidos en las celdas aisladas se ha tomado la media cuantificada, siendo el tamaño de los microdefectos de 0,002 mm en el eje menor de la elipse, b , y la medida del eje mayor, a ; la correspondiente al factor de forma $S=a/b$ de los microdefectos analizados en los alambres de los distintos pasos del trefilado a partir de los cuales se han mecanizado dichas probetas axisimétricas.

Tabla 4.5. Factor de forma aproximados (S) de los microdefectos.

ACERO	DURAS	BLANDAS
E0	1.4	3.3
E7	3	12

Los microdefectos sólo se han modelizado en los elementos con mayor triaxialidad presentes en la sección de la entalla, extrayendo los desplazamientos registrados en cada uno de sus nodos y aplicándolos en los nodos del elemento aislado, ejecutándose de esta forma un cálculo paralelo al ya realizado. Una vez extraídos los elementos y sus desplazamientos resultantes, de los distintos ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos, se incorporan en la parte central del mismo los dos tipos de microdefectos objeto de estudio, con las morfologías correspondientes a cada microdefecto según el de alambre de procedencia,

Fig. 4.92. Las modelizaciones numéricas del elemento con mayor triaxialidad, en el cual se ha situado el microdefecto, pasan a ser modelizaciones numéricas con una celda aislada del cálculo origen conservando los desplazamientos que durante éste se han obtenido. Al igual que las modelizaciones de celdas aisladas realizadas en los apartados anteriores, éstas también permiten la realización de mallas en 3D con un mayor número de elementos, lo cual aumenta la fiabilidad de los resultados y optimiza los recursos informáticos.

La modelización de microdefectos generados por inclusiones se ha realizado en las probetas prismáticas entalladas, PA y PC, procedentes del alambroón inicial y del alambre de pretensado comercial, es decir alambre sin trefilar y alambre perteneciente al último paso de la cadena de trefilado. Realizando la simulación numérica de los microdefectos en las probetas PA0, PA7, PC0 y PC7, se consigue englobar el comportamiento de los microdefectos en las probetas restantes, por ser éstas pertenecientes a alambres de pasos intermedios del proceso de trefilado. En las probetas de tipo PA el elemento extraído para la incorporación de los microdefectos está ubicado en la zona próxima al fondo de entalla, mientras en las probetas de tipo PC se han extraído los elementos ubicados en la zona central de la superficie neta.

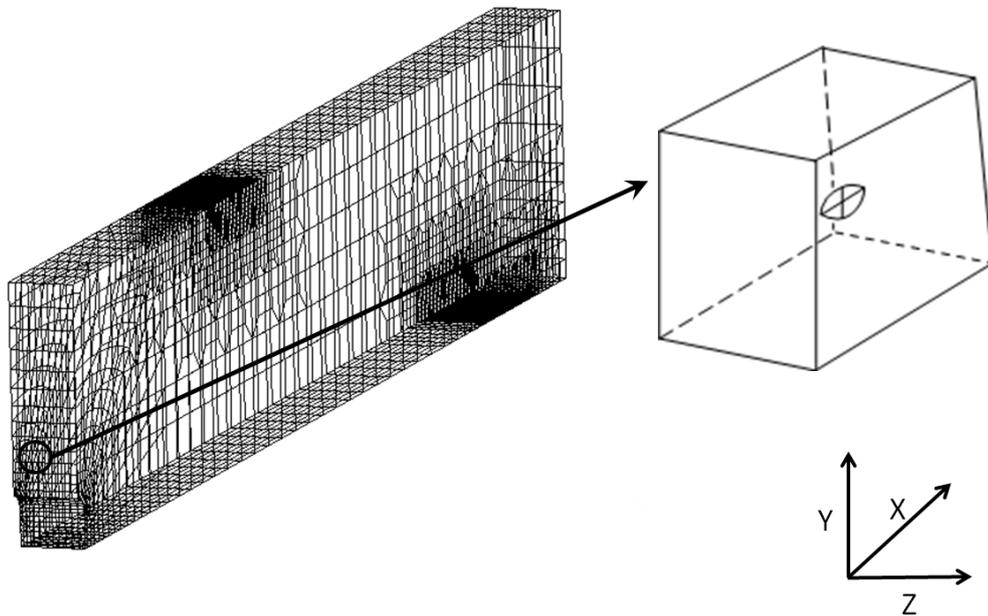


Fig. 4.92. Esquema de extracción de celdas de cálculos de flexión previos.

De igual forma que sucedía en los cálculos de microdefectos analizados en los apartados anteriores, la fiabilidad de los datos obtenidos se ha ratificado mediante la cuantificación de la variación de las tensiones exteriores del elemento de origen y la celda aislada modelizada a partir de éste. Para constatar la validez de los resultados de las modelizaciones de los

microdefectos, las variaciones entre los valores analizados en las dos simulaciones numéricas no puede ser superior al 5%. En todas las modelizaciones realizadas de los microdefectos en las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión se han obtenido resultados que cumplen el criterio establecido, anexo IV.

Como en los casos de modelización de microdefectos anteriormente analizados en probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, tanto prismáticas como axisimétricas, en las modelizaciones de las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión también se ha optado por representar los microdefectos generados por inclusiones de tipo blando sin un material diferente dentro de los mismos, puesto que estas inclusiones no oponen una resistencia significativa, con respecto a las inclusiones de tipo duro, a la deformación del mismo. En la modelización de los microdefectos generados por inclusiones de tipo duro se han incluido en dicho microdefecto inclusiones con morfología esférica separadas de éste 0,0002 mm, para evitar así problemas de contacto iniciales entre la matriz y la inclusión, y se ha supuesto que dicha inclusión de tipo duro posee un modulo de Young de 352 GPa así como un coeficiente de poisson de 0,24 basándose en estudios ya realizados.

De ambos tipos de probetas prismáticas entalladas se ha modelizado el alambroón inicial y el alambre de pretensado comercial, obteniéndose la variación de factor de forma de los microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro y de tipo blando en los elementos con mayor triaxialidad tensional. Debido a los cambios morfológicos producidos en las modelizaciones numéricas de los micro-defectos, los cuales incluyen deformaciones en los tres ejes principales, las mediciones de los factores de forma finales se han realizado extrayendo los datos de los extremos más alejados, tanto en la dirección del eje x como en el eje y de las morfologías de partida.

Si se toma como factor de forma inicial, $S=a/b$, y como factor de forma final, $S'=a'/b'$ (del microdefecto generado por la inclusión) la diferencia entre éstos representará el cambio morfológico sufrido por dicho microdefecto durante el ensayo bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos al cual han sido sometidas las probeta axisimétricas objeto de estudio. A continuación se muestran los resultados obtenidos de la diferencia entre los factores de forma iniciales y finales de los microdefectos para ambos tipos inclusiones analizadas, Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Diferencia de los factores de forma de los micro-defectos ($S'-S$).

$\Delta S=S'-S$	DURA	BLANDA
PA0	0,06	0,33
PA7	0,05	0,29
PC0	0,89	2,99
PC7	0,69	2,92

Como se ha podido observar en los distintos factores de forma analizados, los mayores cambios morfológicos se producen en los microdefectos presentes en las probetas prismáticas con entalla de tipo C (gran radio de curvatura). Cabe señalar que la mayor variación para ambos tipos de probetas analizadas se produce en las probetas procedentes del alambrión inicial en los dos tipos de microdefectos analizados.

El mayor cambio morfológico se produce en los microdefectos correspondientes a las inclusiones de tipo blando en las probetas PC0, Fig. 4.93. En todos los microdefectos analizados el factor de forma de la inclusión experimenta mayores variaciones para aquellos generados por inclusiones de tipo blando. Los cambios del factor de forma experimentados por los microdefectos en las probetas con entalla de tipo A son significativamente menores, e incluso despreciables, como es el caso de los generados por las inclusiones de tipo duro, con respecto a los obtenidos en las probetas con entalla de tipo C.

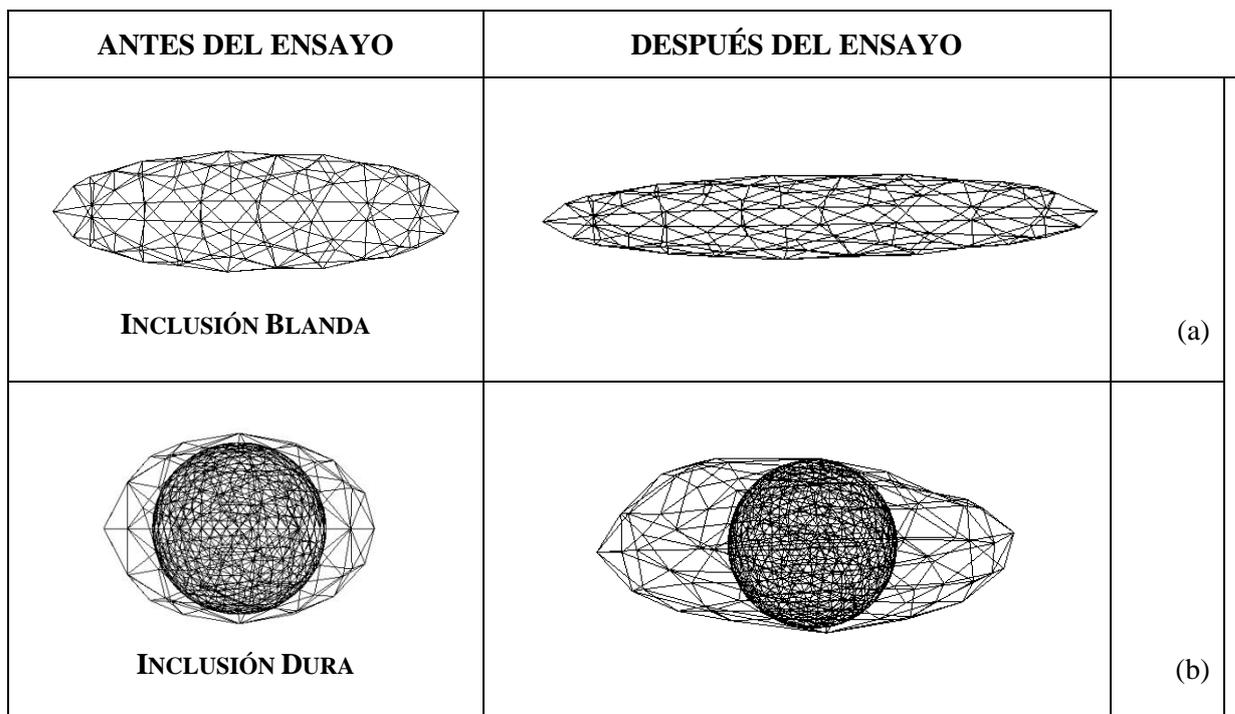


Fig. 4.93. Microdefectos origen y cambios de factor de forma de éstos en la probeta C0 generados por inclusiones de: (a) tipo blanda y (b) de tipo duro.

El cambio morfológico del factor de forma lleva consigo mayores tensiones producidas en los bordes de los microdefectos; sin embargo, cabe señalar que las mayores variaciones de tensiones vienen producidas, al igual que sucedía en las modelizaciones de microdefectos anteriormente realizadas en las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, por la resistencia a la deformación del microdefecto que generan las inclusiones de tipo duro. Con los cortes sobre los planos principales realizados sobre las modelizaciones de dichos

microdefectos se ha observado cómo tanto la tensión de von Mises como la hidrostática poseen distribuciones similares en casi todos los casos estudiados, independientemente del tipo de microdefecto, presentando esta distribución mayores valores en la zona central del microdefecto en el plano yz y disminuyendo gradualmente a ambos lados de la misma hasta hacerse mínimos en los extremos, Fig. 4.94.

La excepción a dichas distribuciones se ha observado en los microdefectos generados por inclusiones de tipo duro en las probetas con entalla de tipo C. Dichas entallas con un mayor radio producen mayores deformaciones que conllevan el aumento de los cambios morfológicos producidos en los microdefectos, sumándose a este particular la resistencia opuesta por la inclusión de tipo duro, la cual hace que entre los extremos del microdefecto se produzcan deformaciones en sentidos opuestos con respecto al eje y , Figs. 4.95-4.96.

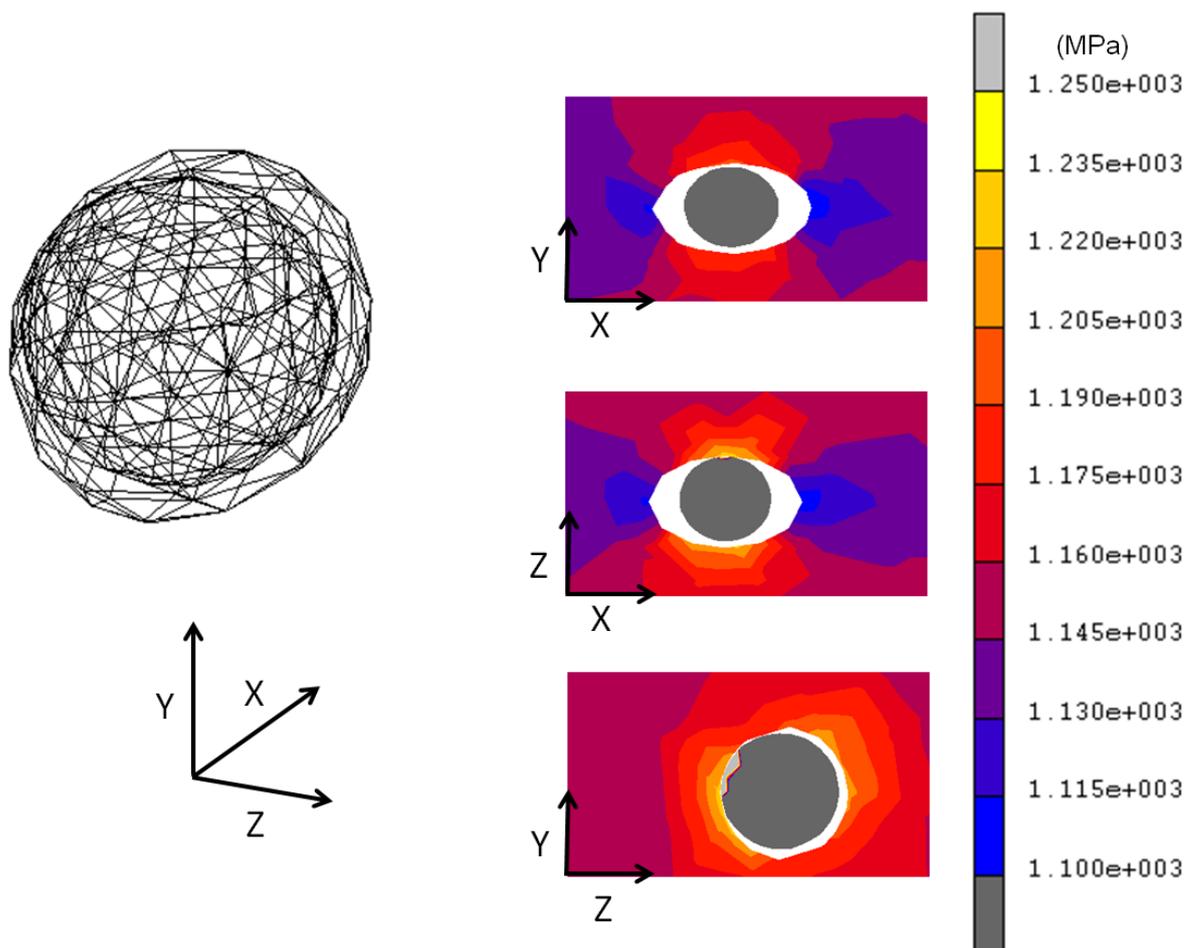


Fig. 4.94. Distribución de los valores de la tensión equivalente o efectiva de von Mises σ_{eq} en el microdefecto de PA0.

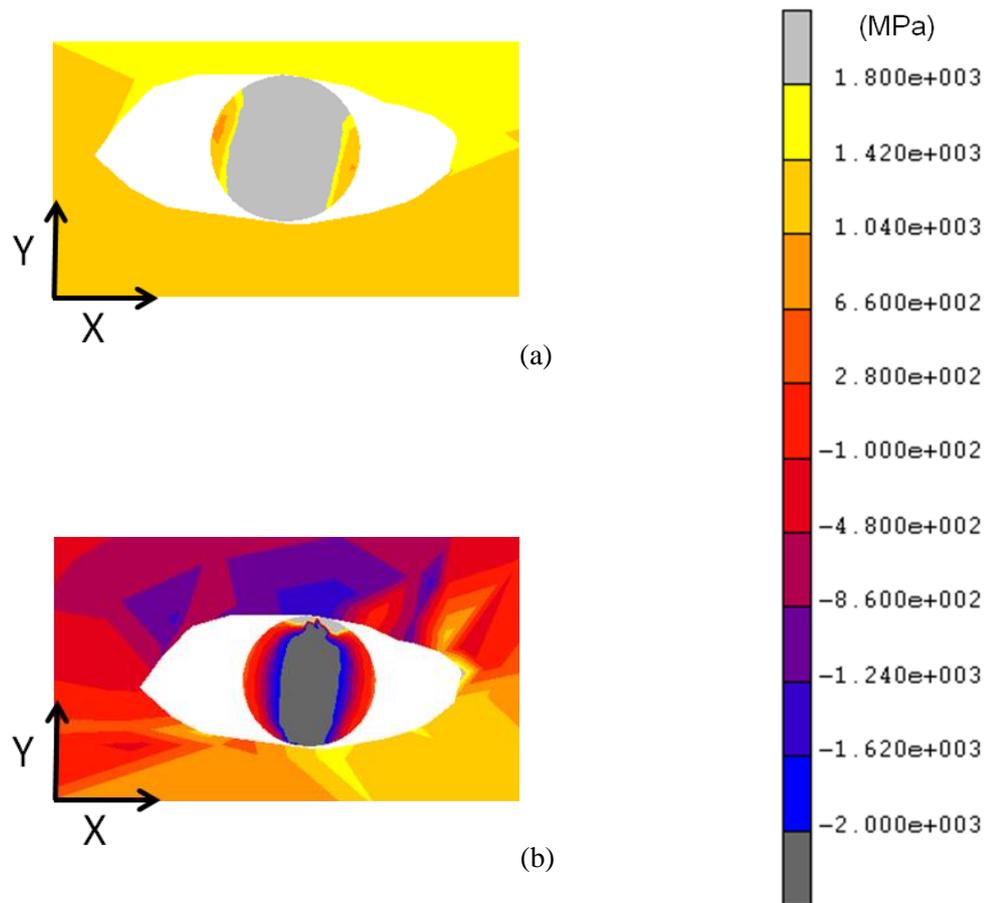


Fig. 4.95. Distribución de las tensiones: (a) σ_{eq} y (b) σ en los microdefectos de tipo duro en la probeta PC0.

Los microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro se ha determinado que tienen una mayor relevancia global, puesto que en las modelizaciones numéricas realizadas se han obtenido valores similares a los superiores analizados en el elemento tanto de tensión de von Mises como hidrostática, siendo la tensión hidrostática la que mayores variaciones presenta.

Los máximos valores registrados con respecto a la celda origen, así como en la comparativa con los valores obtenidos del resto de modelizaciones de microdefectos, son los pertenecientes a las probetas con entalla de tipo C generados por inclusiones de tipo duro.

Las Figs. 4.95-4.96 se han realizado tras extraer diferentes planos de corte en los cuales se muestra la distribución de los valores de la tensión equivalente de von Mises y la tensión hidrostática en los microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro en las probetas objeto de estudio en este apartado.

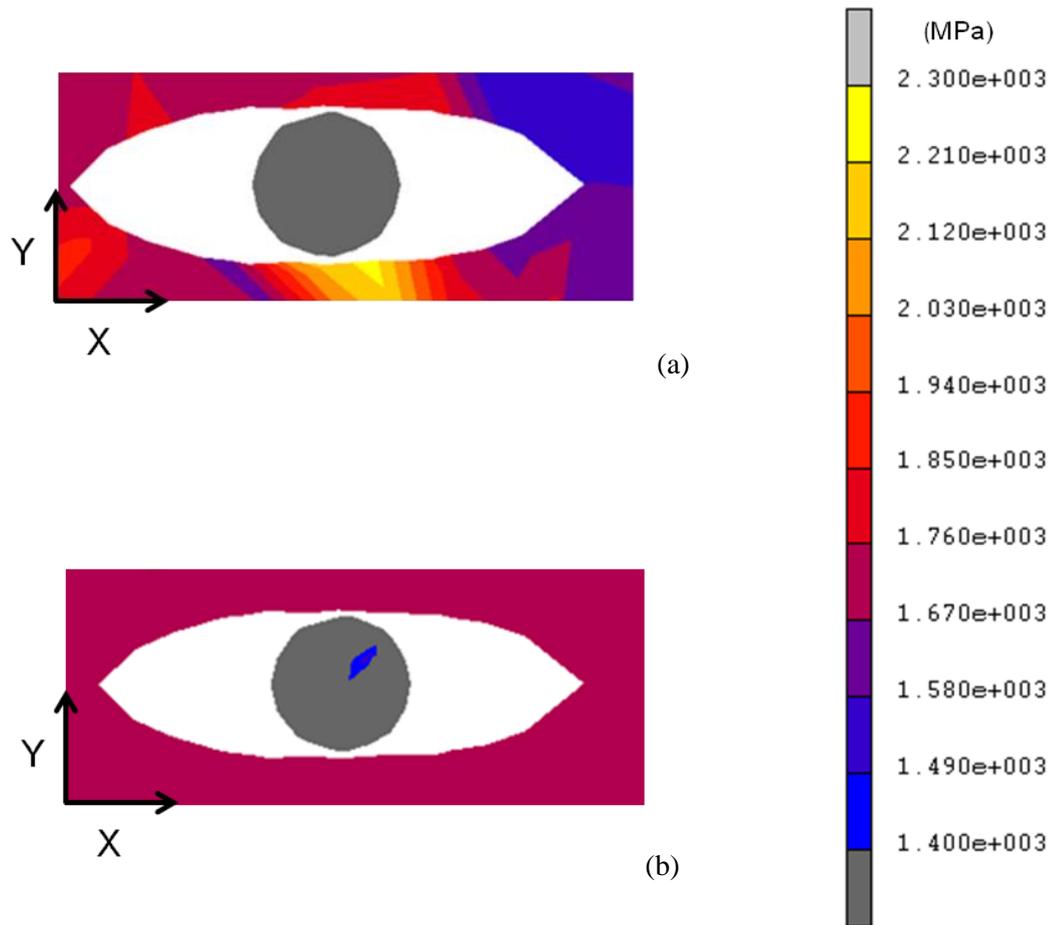


Fig. 4.96. Distribución de las tensiones: (a) σ_{eq} y (b) σ en los microdefectos de tipo duro en la probeta PC7.

V. DISCUSIÓN

En la presente Tesis se ha realizado una revisión exhaustiva del daño microestructural presente en la fabricación de aceros de pretensado, haciendo un análisis micrográfico de los microdefectos encontrados en los diferentes alambres de acero perlítico que conforman la cadena real de trefilado. Entre los principales microdefectos analizados cabe señalar el producido por las *pseudocolonias perlíticas*, el generado por las *inclusiones* presentes en este tipo de acero, así como los generados en las propias colonias de perlita y entre las mismas. Además de los microdefectos generados durante la fabricación del acero de pretensado, también se han analizado éstos y su evolución en los sucesivos ensayos a los cuales han sido sometidos las probetas mecanizadas a partir de estos alambres.

El objetivo de la mecanización de probetas con distintos tipos de entallas a partir de los alambres de la cadena de trefilado ha sido generar estados tenso-deformacionales diferentes. Dichas probetas poseen, como se ha visto en capítulos anteriores, radios de curvatura y profundidades de entalla distintos, además éstas se han mecanizado guardando la

proporcionalidad con los alambres originales, lo cual permite la comparación entre los mismos. La mecanización de las probetas se ha basado en estudios ya realizados por el GIFIE de la USAL. Las probetas axisimétricas y prismáticas entalladas han sido sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, mientras las probetas prismáticas de una sola entalla han sido ensayadas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos. Los distintos tipos de probetas y los ensayos realizados sobre éstas, así como el posterior análisis macro y microfractográfico, permiten establecer comportamientos de fractura según el estado tenso-deformacional generado por las mismas, así como analizar la influencia de los microdefectos observados tanto en la fabricación como en el transcurso de los ensayos.

1. MICRODAÑOS Y EVOLUCIÓN

Los microdefectos analizados en el acero perlítico y la evolución de los mismos durante el proceso de trefilado han sido el objetivo fundamental de la presente Tesis. No sólo se ha realizado el estudio de éstos en los distintos alambres que componen la cadena real de trefilado, sino que también se ha analizado la presencia y evolución de los mismos en las distintas probetas ensayadas. Las probetas prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, así como las probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos de sollicitación de flexión por cuatro puntos, se han mecanizado a partir de dichos alambres pertenecientes a los distintos pasos de la cadena de trefilado.

De los estudios realizados se han extraído los microdefectos más significativos producidos durante el proceso de fabricación del acero de pretensado y durante los distintos ensayos hasta fractura de las probetas entalladas. Las micrografías pertenecientes a las probetas entalladas ensayadas se han realizado en las inmediaciones de la entalla. Uno de los microdefectos que requiere mayor consideración, debido a la posible influencia del mismo en el comportamiento en fractura de este acero, es el generado por las *pseudocolonias de perlita*. Las pseudocolonias son colonias de perlita cuyas láminas, de cementita y ferrita, no se han orientado a favor de la dirección de trefilado, mostrando orientaciones cuasi-perpendiculares a dicha dirección del proceso de trefilado y un espaciado interlamina anómalo.

En el análisis de las pseudocolonias perlíticas en los alambres de los distintos pasos de la cadena de trefilado se ha observado como, a medida que avanza el proceso de trefilado, éstas aumentan su esbeltez, a favor de la dirección del proceso, y su espaciado interlamina, se ha cuantificado en el capítulo II de este trabajo. Éstas son fácilmente identificables puesto que debido a la constricción de las colonias adyacentes, las cuales poseen láminas orientadas a favor de la dirección del trefilado, sus láminas de cementita se presentan con grandes curvaturas, las cuales aumentan con el grado de trefilado del alambre. Las pseudocolonias

perlíticas se consideran microdefectos debidos a la disposición anómala de sus láminas, lo cual hace que éstas muestren una menor resistencia a la fractura. Debido a esa menor resistencia sus láminas de cementita aparecen curvadas y fragmentadas en los alambres pertenecientes a los últimos pasos del proceso de trefilado. Las pseudocolonias de perlita son identificables en los alambres a partir del tercer y cuarto paso del proceso de trefilado.

Las micrografías para el estudio de las pseudocolonias se han realizado, como se ha comentado, también en todas las probetas estudiadas. Dichas probetas han sido sometidas a los distintos tipos de ensayo sin llegar a la fractura del alambre, es decir a partir de las probetas sometidas a ensayos interrumpidos. Cabe señalar que los distintos tipos de probetas ensayadas poseen entallas con diferentes radios de curvatura, obteniéndose distintos estados tenso-deformacionales.

En las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción se han estudiado dos tipos de probetas; PAA (pequeño radio de curvatura) y PCC (gran radio de curvatura). Dentro de las probetas axisimétricas ensayadas bajo sollicitación de tracción se han analizado cuatro tipos de probetas las cuales se han clasificado por el radio de curvatura y profundidad de la entalla; A y B (pequeño radio de curvatura) y C y D (gran radio de curvatura), siendo las probetas con entallas de tipo B y D las que presenten mayor profundidad de entalla.

En cuanto a las probetas prismáticas, con una sola entalla, sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión, se han estudiado dos tipos de probetas entalladas con distintos radios de curvatura; PA (pequeño radio de curvatura) y PC (gran radio de curvatura). Para poder establecer una comparativa de los resultados de las pseudocolonias perlíticas, a continuación se exponen las micrografías más significativas de los alambres de la cadena de trefilado y de las probetas, mecanizadas y ensayadas, correspondientes a los mismos, Figs. 5.1-5.2.

En las micrografías pertenecientes a las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos se observa como, a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre, las pseudocolonias perlíticas muestran mayor esbeltez y mayores curvaturas en las láminas que las conforman.

En las micrografías pertenecientes a las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado, último paso del proceso, la microestructura se observa de forma menos clara debido a la gran deformación plástica producida en éste durante el proceso, la cual provoca un mayor constreñimiento en las colonias de perlita y por lo tanto en sus láminas.

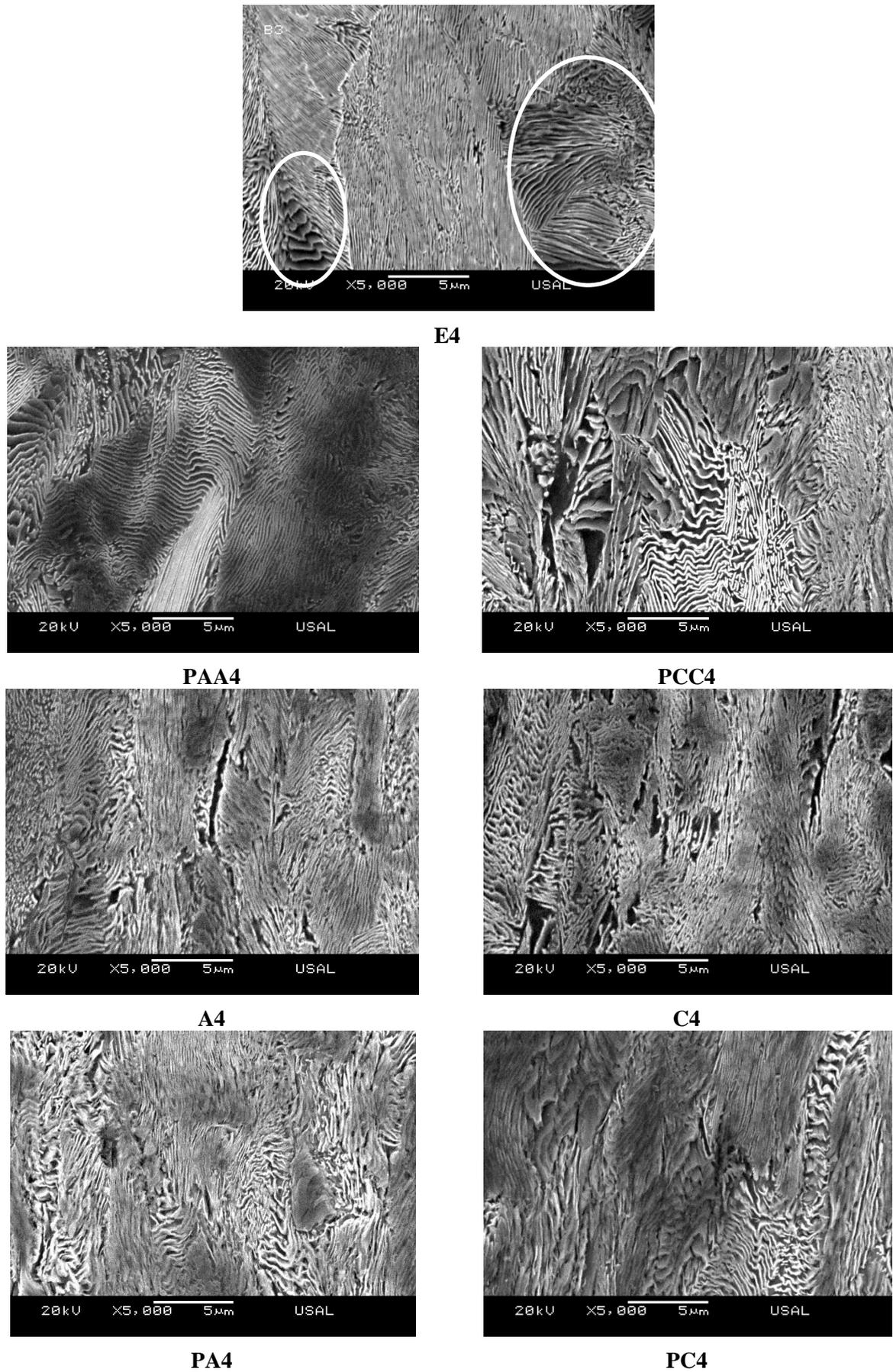


Fig. 5.1. Pseudocolonias perlíticas pertenecientes al alambre del cuarto paso de trefilado.

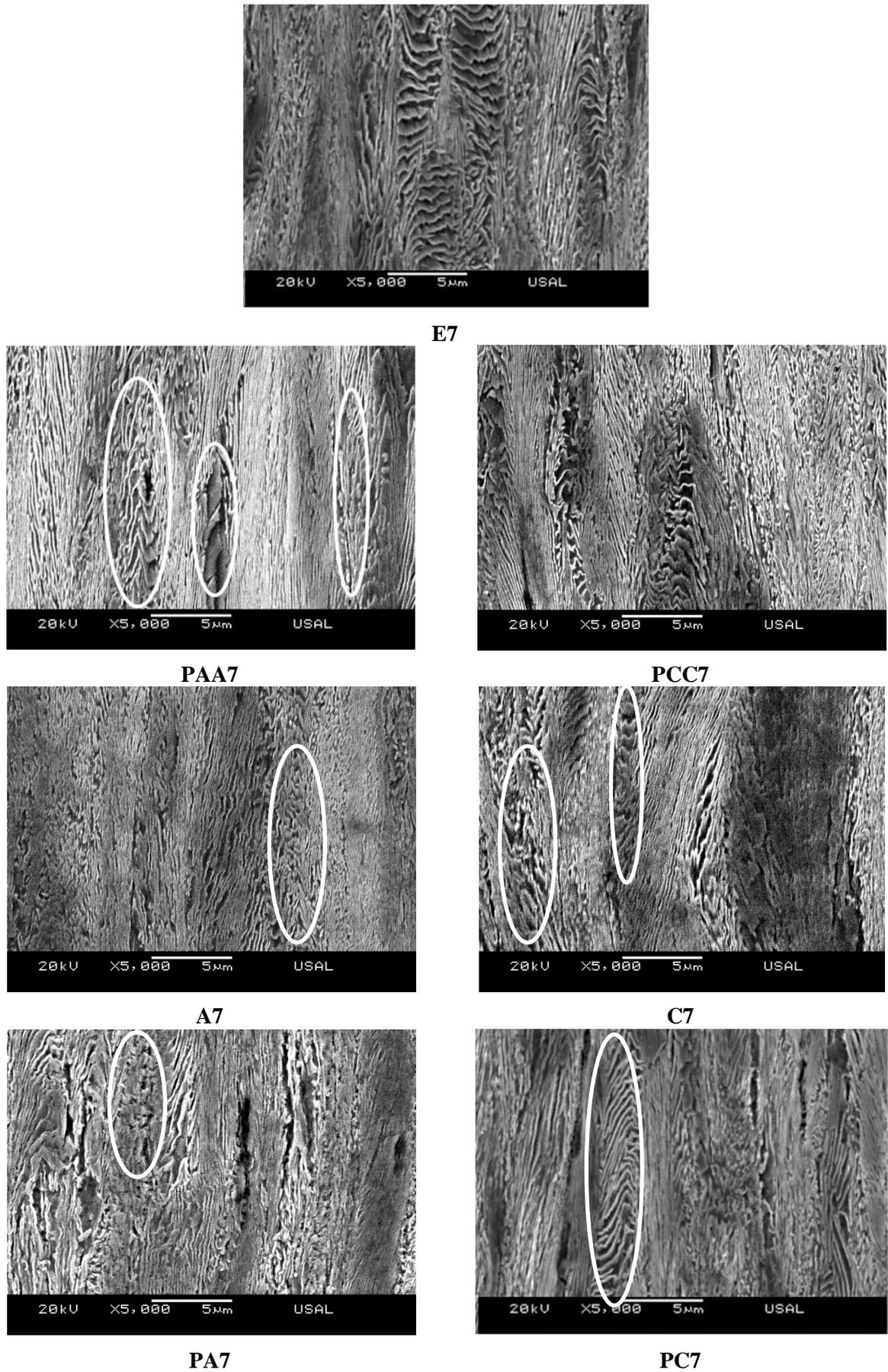


Fig. 5.2. Pseudocolonias perlíticas pertenecientes al alambre de pretensado.

En las micrográficas correspondientes a las probetas prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a sollicitación de tracción sí se ha observado una mayor curvatura de las láminas de cementita que las mostradas en el alambre de procedencia. En las probetas PCC, C y D (pertenecientes a las distintas probetas prismáticas y axisimétricas entalladas) las pseudocolonias perlíticas muestran láminas de cementita con grandes curvaturas. Estas probetas poseen entallas con grandes radios de curvatura, mayores deformaciones durante el ensayo. Este hecho se puede analizar en los alambres procedentes del cuarto y último paso del proceso de trefilado, observándose más claramente en el alambre de pretensado final.

En las probetas ensayadas bajo sollicitación de tracción con entallas con menores radios de curvatura, entallas tipo A (pequeño radio y pequeña profundidad), se han observado pseudocolonias perlíticas cuyas láminas presentan menores curvaturas, además de observarse éstas más fragmentadas que en el resto de las probetas analizadas, las cuales poseen un mayor radio de curvatura.

En las probetas ensayadas bajo sollicitación de flexión también se han observado comportamientos semejantes de las láminas de cementita que componen las pseudocolonias perlíticas. En dichas probetas, tanto en las pertenecientes al alambre del cuarto paso del proceso como al alambre de pretensado final, las probetas con menor radio de curvatura poseen láminas de cementita con menores curvaturas y más fragmentadas.

Otro de los micro-daños producidos durante el proceso de trefilado es la *rotura por curvatura* de las láminas de cementita. Dicho microdefecto se observa claramente en los alambres pertenecientes al tercer y cuarto paso del proceso de trefilado, y también se ha observado en las probetas entalladas sometidas a ensayos de tracción y flexión por cuatro puntos procedentes de dichos alambres, Fig. 5.3. En las probetas entalladas mecanizadas a partir de los alambres pertenecientes al último paso de trefilado, al igual que sucedía en el estudio de las pseudocolonias perlíticas, dichos microdefectos no son fácilmente identificables debido a la gran deformación a la cual han sido sometidos durante el proceso.

El microdefecto denominado *rotura por curvatura* se ha observado claramente en las micrográficas pertenecientes a los alambres de los pasos intermedios del proceso de trefilado, debido a que en éstos es donde se está produciendo la reorientación de las láminas de cementita a favor de la dirección del proceso de trefilado. Estas láminas que se orientan ejercen tal constricción sobre las colonias adyacentes que provocan la curvatura y rotura de las láminas menos orientadas, pudiéndose producir que una misma colonia posea fragmentos de láminas que se han orientado a favor del proceso y otros que formarán parte de posibles pseudocolonias perlíticas.

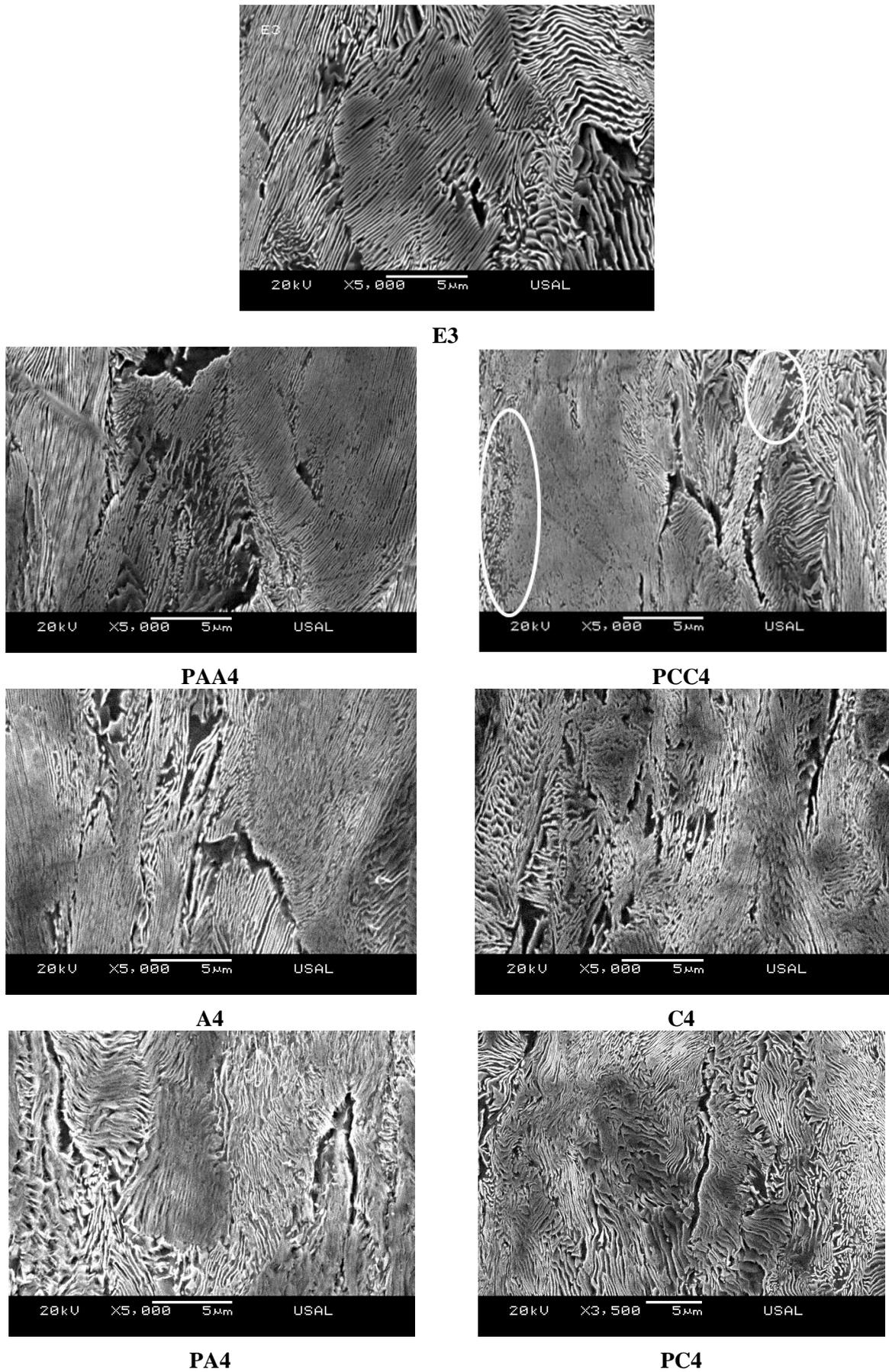


Fig. 5.3. Microdefecto de rotura por curvatura.

En las micrografías de las probetas objeto de estudio no se ha observado otro de los micro-daños presentes en los alambres de los primeros pasos del proceso de trefilado, como es el micro-daño denominado *piel de leopardo*. La razón no es otra que este micro-daño sólo se ha podido observar en los alambres pertenecientes a los primeros pasos del proceso de trefilado, de los cuales no se han realizado ensayos interrumpidos. Sin embargo la evolución de los microdefectos de piel de leopardo, *garras de leopardo*, si se ha analizado en las probetas de los ensayos bajo sollicitación de tracción interrumpidos, Fig. 5.4. Aunque como sucede con el resto de microdefectos, éstas son más difíciles de visualizar en las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado, último paso del proceso, debido a la gran deformación microestructural que éste posee. Cabe señalar que en las micrografías realizadas a las probetas sometidas a ensayos de flexión interrumpidas no se han observado los microdefectos de *garras de leopardo*, hecho que no es de extrañar puesto que éstos microdefectos se generan en colonias con láminas muy orientadas y son producto de la tensión de tracción, fuerza de tirado durante el proceso de trefilado o en ensayos bajo dicha sollicitación. Aunque en los ensayos sometidos a flexión por cuatro puntos la mitad inferior de la probeta está sometida a esfuerzos de tracción, éstos son mucho menores que los producidos durante los ensayos bajo sollicitación de tracción y durante el proceso de trefilado, por ello no se observa de forma tan acentuada dicho microdefecto en las micrografías de éstas.

Los microdefectos producidos por *micro-descolonización*, separación entre colonias generada a partir de microhuecos, se han observado en los alambres pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado y en las distintas probetas ensayadas tanto en las sometidas a sollicitaciones de tracción como de flexión por cuatro puntos Fig.5.5. En las probetas sometidas a ensayos de flexión se han encontrado menos microdefectos de este tipo, además de presentarse éstos con menor anchura. En muchos de los casos las microdescolonizaciones han estado acompañadas de microdaños generado por inclusiones, como se observa en la micrografía de la probeta B7.

Los microdefectos producidos en las colonias de perlita evolucionan a lo largo del proceso de trefilado así como de los ensayos, en los alambres y probetas mecanizadas a partir de éstos, a *desgarros intercoloniales e intracoloniales*, aunque en algunos casos éstos han evolucionado como la combinación de ambos, Figs. 5.6-5.7.

En las micrografías de las probetas entalladas bajo distintos tipos de sollicitación se ha observado de forma mayoritaria la evolución de microdefectos a *desgarros intercoloniales*. En algunos de los casos si se ha podido observar algún *desgarro intracoloniales*, aunque los mismos son más visibles en algunos de los avances de las microfisuras previas a fractura, como se verá en los apartados sucesivos.

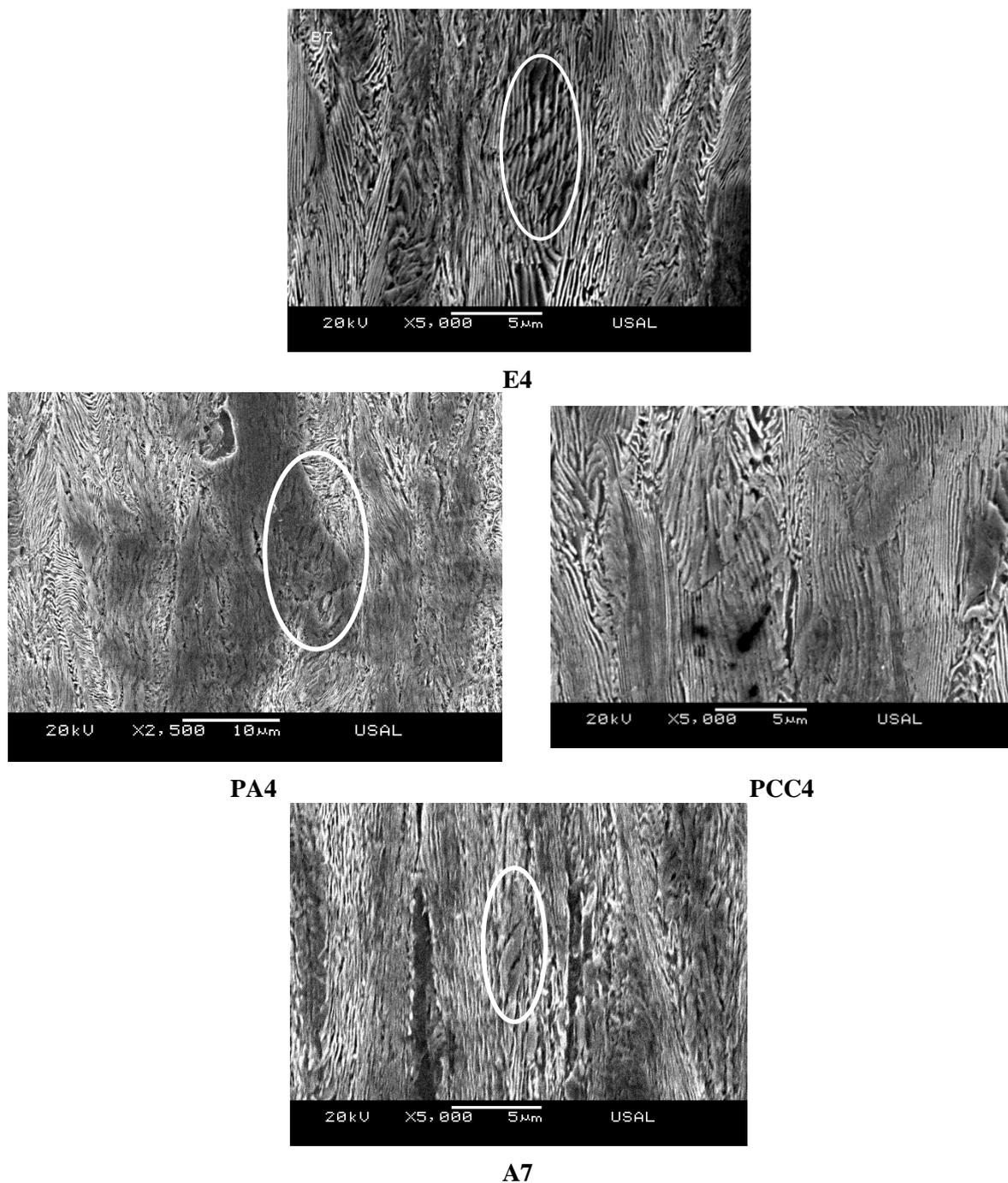


Fig. 5.4. Microdefecto de garra de leopardo

En las siguientes micrografías, Fig. 5.7, se han mostrado algunos de los microdefectos por *desgarros intercoloniales*. Éstos se han observado en todas las probetas sometidas a ensayos interrumpidos, tanto bajo sollicitaciones de tracción como de flexión por cuatro puntos. De igual forma que sucedía con el resto de microdefectos analizados, éstos se observan con menor claridad en las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado.

Los desgarros intercoloniales se han presentado en todas las probetas objeto de estudio como la evolución mayoritaria de los distintos microdefectos presentes en las mismas.

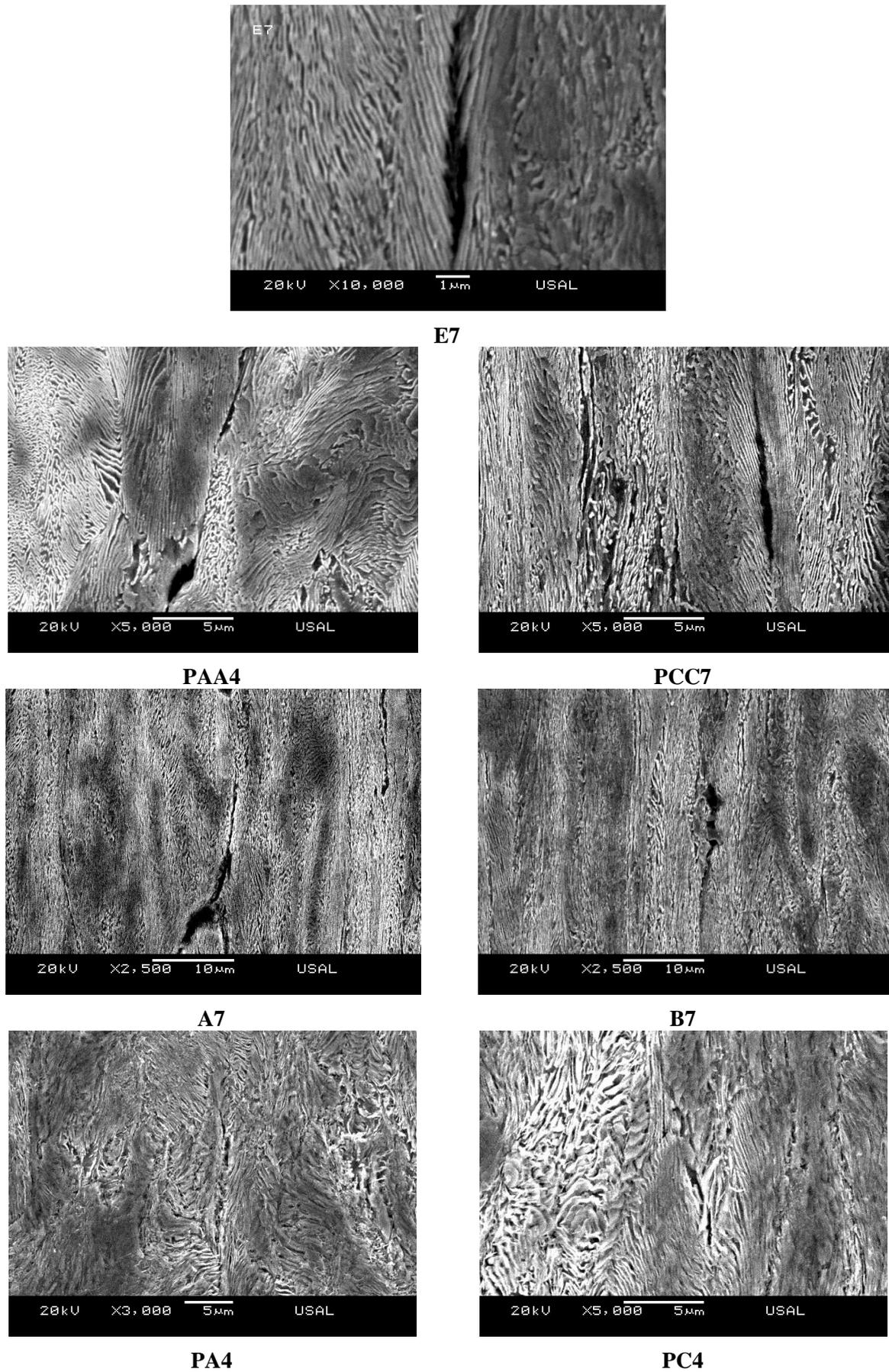


Fig. 5.5. Microdescolonizaciones.

En los sucesivos apartados de la presente Tesis se han analizado la presencia de microdefectos en los distintos alambres que componen la cadena de trefilado así, como en las probetas sometidas a distintos tipos de sollicitaciones mecanizadas a partir de los mismos. Cabe señalar la mayor presencia de microdefectos en las zonas próximas a la entalla en todas las probetas entalladas con *menor radio de curvatura* sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. Por el contrario los microdefectos encontrados en las probetas entalladas con *mayor radio de curvatura* se situaban en la zona central de la sección neta de la entalla, a excepción de las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos, en las cuales los microdefectos analizados se han obtenido de las inmediaciones de la entalla para ambos tipos de entalla analizados.

Los microdaños encontrados se han situado, como se ha visto en las modelizaciones numéricas de los ensayos de las distintas probetas del capítulo III de la presente Tesis, en las zonas dónde se han acumulado los valores más elevados de las tensiones normales (σ_x , σ_y y σ_z). Cabe señalar que, tanto en las probetas con entallas prismáticas como axisimétricas mecanizadas a partir del alambre de pretensado final, la zona donde se han observado la mayor acumulación de los distintos microdaños se sitúa en las proximidades de las entallas.

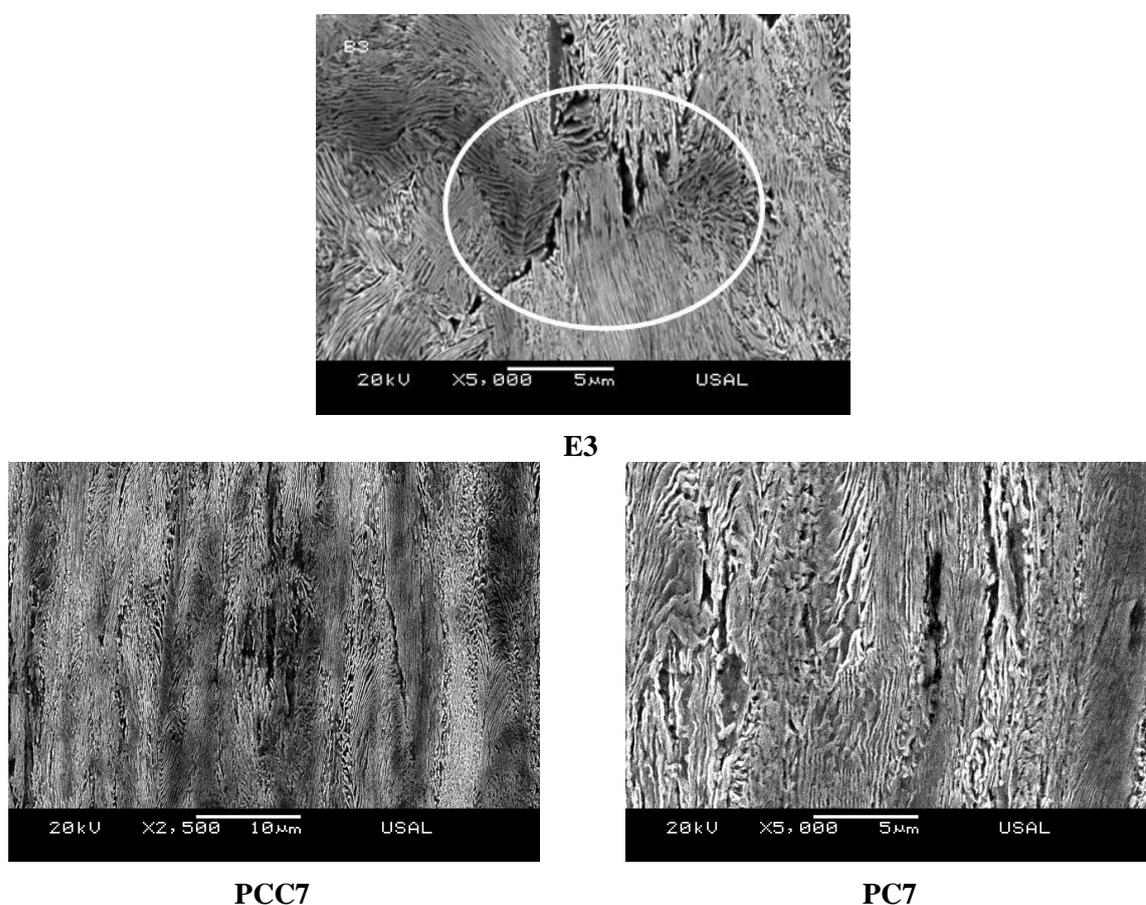


Fig. 5.6. Desgarros intracoloniales.

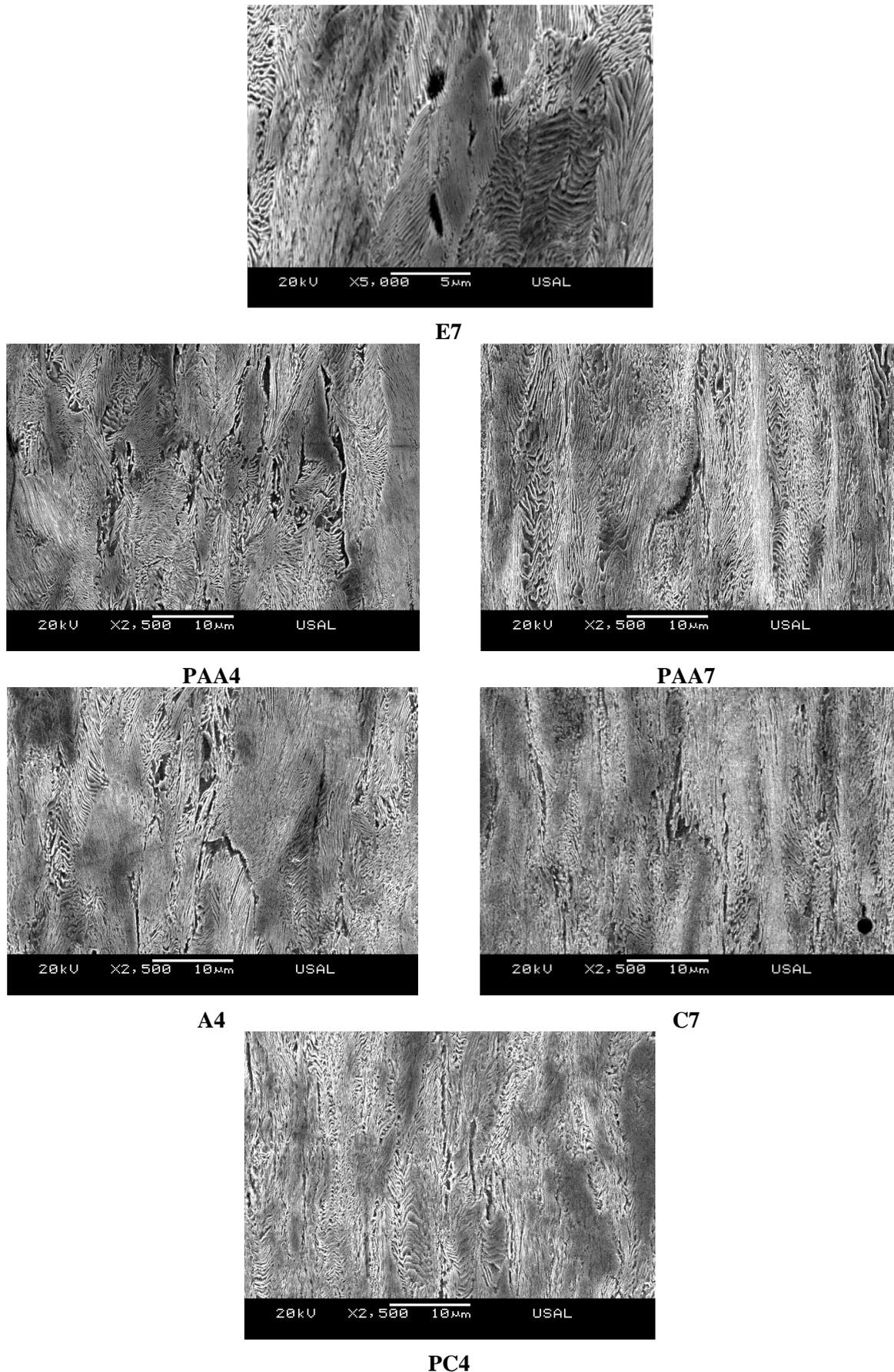


Fig. 5.7. Desgarros intercoloniales.

2. MECANISMOS DE FRACTURA

2.1. Probetas prismáticas entalladas sometidas a tracción

Una vez realizados los ensayos bajo sollicitación de tracción sobre las probetas prismáticas entalladas, PAA y PCC, procedentes del mecanizado del alambroón inicial, del tercer y cuarto paso del proceso de trefilado y del alambre de pretensado comercial, se han analizado las distintas curvas $F-u$ obtenidas. En éstas curvas se ha observado una mayor deformación plástica en las probetas con entallas de tipo C (mayor radio de curvatura) además de un descenso de carga previo a la fractura total del material. En las probetas con entalla de tipo A (menor radio de curvatura) la carga máxima alcanzada coincide con la carga de rotura, es decir no se experimenta dicho descenso de carga previo a fractura. Después del estudio de las curvas $F-u$ se han realizado las fractografías de las distintas probetas entalladas y sobre éstas se han observado y cuantificado las diferentes zonas de superficie de fractura que la componen; corona exterior (CE), zona intermedia (Z_{INT}) y zona de proceso de fractura (ZPF). Las distintas zonas objeto de estudio han presentado diferentes mecanismos de fractura, en todas ellas la ZPF ha estado formada por coalescencia de microhuecos de gran tamaño (CMH*), la CE por coalescencia de microhuecos (CMH) y por último la Z_{INT} la cual ha variado los micromecanismos que la conforman dependiendo del grado de trefilado del alambre y del radio de curvatura de la entalla. La Z_{INT} está compuesta en las probetas mecanizadas a partir del alambroón inicial por clivajes (C) los cuales, a medida que aumenta el proceso de trefilado, han ido desapareciendo en favor del CMH. En ambas probetas prismáticas entalladas (PAA y PCC) se ha observado esta distribución de los micromecanismos de fractura, con la única diferencia de una mayor presencia de CMH en la Z_{INT} en las probetas con entalla de tipo C (mayor radio de curvatura). De la cuantificación del área de las distintas zonas se ha obtenido como resultado mayores áreas de zona de CE para las probetas de tipo C, cuya área aumenta a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre. Por el contrario el área observada de la Z_{INT} disminuye a medida que aumenta el grado de trefilado. Ambas áreas de CE y Z_{INT} muestran un comportamiento diferente en las probetas procedentes del alambre de pretensado comercial, en las cuales el área de CE disminuye a favor de la Z_{INT} que aumenta. Estas variaciones se han observado en los dos tipos de probetas prismáticas analizadas.

Las observaciones realizadas sobre las diferentes zonas de la superficie de fractura para ambos tipos de entallas evidencian una distinta ubicación de la zona de proceso de fractura. Dicha zona se sitúa en las probetas con entallas tipo PCC en la zona central de las mismas, mientras en las probetas con entallas de tipo PAA la ubicación de la ZPF es próxima a una de las entallas. La situación de esta zona ha sido verificada por la dirección de los clivajes

presentes en la zona intermedia, los cuales en las probetas con entalla PCC se dirigen desde el centro de la probeta de forma radial al exterior de la misma. Por el contrario en la Z_{INT} de las probetas con entalla tipo PAA los clivajes se dirigen desde la ZPF situada en una de las dos entallas hasta la otra, pasando por el centro de probeta y hacia el exterior de ésta, tal y como se representa en la siguiente Fig. 5.8.

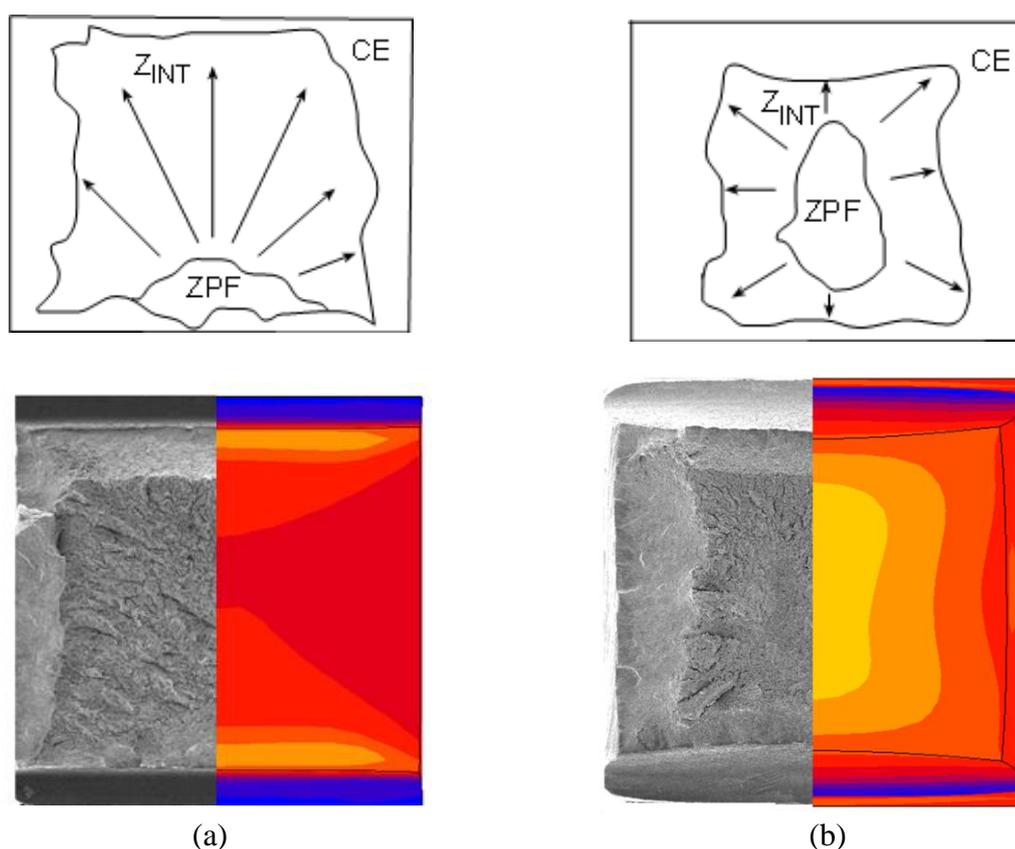


Fig. 5.8. Esquema de los mecanismos de fractura asociados a cada tipo de entalla, (a) con menor radio de curvatura, PAA, y (b) con gran radio de curvatura, PCC.

Una vez más el alambre de pretensado presenta la excepción, en este caso en cuanto a la ubicación de la zona de proceso de fractura la cual se encuentra situada en las proximidades de una de las entallas para ambos tipos de probetas analizados PAA y PCC.

En las distintas simulaciones numéricas realizadas de las diferentes probetas entalladas se ha observado la distribución de las distintas variables internas presentes en las mismas, En estas probetas las distribuciones de tensiones analizadas han sido diferentes dependiendo del radio de curvatura de la entalla. En las probetas con menor radio de curvatura, PAA, las tensiones normales σ_x , σ_y y σ_z , la tensión de von Mises, (σ_{eq}), y la tensión hidrostática (σ) han presentado los valores máximos en las proximidades de los fondos de ambas entallas, ratificando el comportamiento en fractura de las mismas. En las probetas con entalla de tipo C

(mayor radio de curvatura), por el contrario, los valores máximos de estas tensiones se han situado en la parte central de la superficie neta, validando también el mecanismo de fractura propuesto. Cabe señalar que las probetas procedentes del alambre de pretensado muestran en las entallas de tipo C una distribución de máximos valores más semejante a las observadas en las probetas con entallas de tipo A, es decir los máximos valores de las distintas tensiones analizadas se sitúan en las proximidades de las entallas. Los valores de las tensiones obtenidos en todas las probetas prismáticas entalladas aumentan con el grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha mecanizado la probeta.

La excepcionalidad presentada por el alambre de pretensado para ambos tipos de entalla analizados, en cuanto a las mediciones de las distintas zonas del proceso de fractura y la ubicación de la misma así como la distribución de las tensiones analizadas, es un hecho que corrobora la gran reordenación micro-estructural que ha sufrido este material. El alambre de pretensado, último paso del proceso de trefilado, ha sido sometido a una gran deformación plástica, la cual ha ocasionado una gran reordenación microestructural, generando que dicho material se comporte de manera más anisótropa. La mayor anisotropía ha influido en el comportamiento en fractura, puesto que éste muestra un comportamiento similar a pesar de las variaciones del radio de curvatura de la entalla. Los cambios en el radio de curvatura de la entalla en el alambre de pretensado son comparables a los realizados en las entallas de otros alambres de la cadena de trefilado, pero la influencia de éstos en los estados tenso-deformacionales no produce cambios tan significativos en el comportamiento en fractura.

En el análisis del comportamiento en fractura del alambre de pretensado hay que tener en cuenta las grandes deformaciones acumuladas que éste posee después del proceso de trefilado. Además dicho alambre, como se ha comentado en la presente Tesis, ha sido sometido a un proceso termo-mecánico posterior para la relajación de tensiones residuales, el cual también podría generar microdefectos en la superficie del alambre que provocasen dicho comportamiento en fractura. Tanto el trefilado como el posterior tratamiento termo-mecánico al cual ha sido sometido hacen que el comportamiento en fractura de este material sea menos dependiente del tipo de entalla, es decir, que muestre un tipo de fractura similar a pesar de los distintos radios de curvatura de las entallas. Dichos cambios en los radios de las distintas entallas no van a provocar cambios tan pronunciados en la triaxialidad como los observados en el resto de alambres de la cadena de trefilado. Ciertamente haría falta una mayor variación del radio de curvatura de la entalla para producir un cambio sustancial en el mecanismo de fractura, en la ubicación de la ZPF y en las curvas $F-u$ del mismo.

Siendo la triaxialidad (t) una medida de constreñimiento al que se encuentra sometido el material debido a la presencia de las entallas, ésta influye claramente en el propio proceso de

fractura. En el capítulo IV de la presente Tesis se ha obtenido las distintas medidas de triaxialidad para las probetas prismáticas, PAA y PCC, sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. Las probetas de tipo PAA, con un radio de curvatura menor, producen un mayor constreñimiento en las proximidades de la entalla. Dicho constreñimiento tiene influencia en el mecanismo de fractura de la probeta comenzando ésta desde los fondos de entalla, ya que en ellos existe una gran concentración de tensiones. Por el contrario, en las probetas de tipo PCC, con entallas con un mayor radio de curvatura, el constreñimiento se presenta en el centro de la misma, haciendo que la fractura de estas probetas comience en dicho lugar, tal y como se ha visto en estudios anteriores. La triaxialidad obtenida en dichas probetas, junto en el análisis de las superficies fractográficas y de los mecanismos que en ellas imperan, ratifican los mecanismos de fractura propuestos para este tipo de probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción.

2.2. Probetas axisimétricas entalladas sometidas a tracción

En el estudio de las probetas axisimétricas entalladas se han analizado cuatro tipos distintos de entallas; A, B, C y D. Las entallas de tipo A y B poseen un radio de curvatura menor mientras las C y D tienen radios de curvatura un orden de magnitud mayor que las anteriores. En cuanto a la profundidad de entalla se refiere, las entallas de tipo B y D poseen mayores profundidades. Una vez realizados los ensayos en este tipo de probetas axisimétricas entalladas se procedió al análisis de las curvas $F-u$ obtenidas, en el cual se pudo observar cómo las probetas con entallas de tipo A y D soportaban mayores cargas, y las probetas con entallas de tipo C y D alcanzaban mayores deformaciones con respecto al resto con similar profundidad. Las probetas axisimétricas con entallas de tipo A y B presentan curvas $F-u$ cuya máxima carga coincidía con la fractura del material, sin embargo las probetas con entallas de tipo C y D (gran radio de curvatura) muestran descenso de carga previo a la fractura total.

Una vez finalizado el análisis de las curvas $F-u$ se procedió a la medición de las áreas de las distintas zonas que componen la superficie de fractura de las distintas probetas. Cabe señalar la imposibilidad de la realización de dichas mediciones en las probetas con entallas de tipo B debido a que éstas no se presentaban con márgenes definidos.

En cuanto a las mediciones de las probetas restantes, se observó el aumento de la zona de CE del alambroón inicial al cuarto paso del proceso, y la disminución del área de dicha zona desde éste último hasta las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado final. Por el contrario, el área obtenida en las superficies de fractura de la Z_{INT} mostró una disminución de las probetas procedentes del alambroón inicial a las probetas mecanizadas a partir del alambre del cuarto paso del proceso, y un aumento en las probetas mecanizadas a partir del alambre de

pretensado. La ZPF sólo ha mostrado variaciones significativas en las probetas con entalla de tipo A, produciéndose un aumento de la misma en las procedentes del alambre de pretensado.

En todas las probetas analizadas se ha observado cómo la zona de CE está compuesta por el micromecanismo de fractura de microhuecos de menor tamaño que los presentados en la ZPF, los cuales van disminuyendo de tamaño a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre de procedencia. La Z_{INT} está compuesta por clivajes, los cuales van desapareciendo a favor de la presencia de CMH a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre. Cabe señalar la presencia mucho mayor de clivajes en la Z_{INT} de las probetas con entallas de tipo A y B (menor radio de curvatura, mayor triaxialidad tensional) en todos los pasos del proceso de trefilado analizados. En cuanto a la ZPF, ésta se ha presentado formada por micromecanismos de CMH* en todas las probetas axisimétricas estudiadas. En todas las ZPF de probetas procedentes del alambre de pretensado se han observado estrías, éstas siempre se han mostrado de manera concéntrica paralela a la superficie del alambre, y parecen ser causa probable debido a su tamaño (5-15 μ m) de saltos producidas entre la alineación de las distintas colonias perlíticas (camino de fractura a lo largo del límite del grano austenítico previo GAP). Dicha alineación de las colonias de perlita se produciría por las tensiones radiales que imperan en el proceso de fractura de estas probetas axisimétricas. Las *estrías* de la ZPF sólo se han analizado en probetas axisimétricas entalladas, e independientemente de la ubicación de dicha zona, se han mostrado paralelas entre sí y concéntricas con respecto a la superficie del alambre.

La ubicación de las distintas zonas que conforman la superficie de fractura es similar en las probetas con entalla de tipo A y B, situándose en éstas la ZPF en los fondos de entalla, mientras en las probetas con entalla de tipo C y D dicha zona se ha presentado en el centro de la superficie de fractura. Las excepciones en cuanto a la ubicación de la ZPF se han observado en las probetas con entalla de tipo B procedentes del alambroón inicial, en las cuales ésta está distribuida por las zonas centrales y conformada por puntos de disparo por clivaje, y en las probetas con entallas de tipo C mecanizadas a partir del alambre de pretensado final, en las cuales la ZPF se ha ubicado mayoritariamente en las proximidades de la entalla, Fig. 5.9.

En el análisis de las variables internas que imperan en la fractura de las distintas probetas axisimétricas obtenidas mediante la modelización numérica por el MEF se ha mostrado en las probetas con menor radio de curvatura, A y B, como las tensiones de los ejes principales, σ_x , σ_y y σ_z , tensión de von Mises, (σ_{eq}), y tensión hidrostática (σ) han presentado los valores máximos en las proximidades de los fondos de ambas entallas. Por el contrario las probetas con entallas de tipo C y D, con menor radio de curvatura, han presentado los valores máximos de dichas variables internas en las zonas centrales de la superficie neta de la probeta.

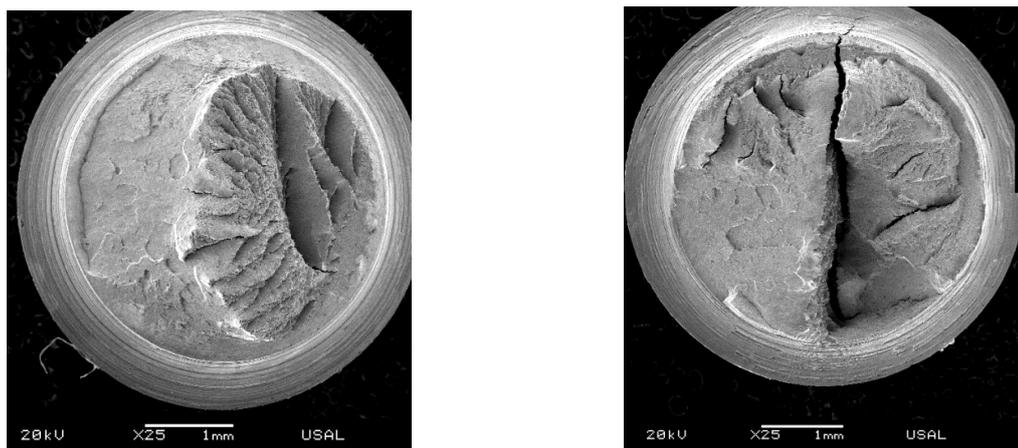


Fig. 5.9. Superficies de fractura de probetas axisimétricas C7.

Con los análisis ya realizados sobre éste tipo de probetas axisimétricas y a partir de estudios previos de comportamiento en fractura de probetas axisimétricas de acero perlítico procedentes de otra colada (AYASO y TORIBIO, 2002), se han propuesto los siguientes mecanismos de fractura de estas probetas axisimétricas, Fig. 5.10. Dichos mecanismos de fractura coinciden con los propuestos en los estudios previos mencionados. Los distintos mecanismos de fractura propuestos ratifican tanto el análisis fractográfico realizado como el análisis numérico posterior de las variables internas. Las probetas con entallas de tipo A y B muestran mayores valores de tensiones, σ_x , σ_y , σ_z , σ_{eq} y σ , en las proximidades de la entalla coincidiendo con la ubicación de las ZPF analizadas.

En las probetas con entallas de tipo C y D los valores máximos de las tensiones se sitúan en los centros de la superficie neta coincidiendo una vez más con la situación de la ZPF de éstas. Además cabe señalar las mayores zonas de deformación plástica obtenidas en las probetas con un mayor radio de curvatura, con entallas de tipo C y D, en las cuales dicha deformación no sólo ocupa una mayor superficie sino que también se encuentra situada desde las zonas próximas a la entalla hasta las inmediaciones del centro de las mismas.

En resumen, las probetas axisimétricas entalladas de tipo A y B (menor radio de curvatura) han presentado un comportamiento de fractura más frágil (según muestran sus curvas $F-u$ y los micromecanismos que imperan en las Z_{INT} de fractura) y mayor superficie de fractura por clivaje. Además dichas probetas presentan un mecanismo de fractura el cual comienza en las proximidades de la entalla y se extiende pasando por el centro de la misma hasta encontrarse con otros avances que comienzan también en el borde de dicha entalla. Las probetas con entallas de tipo C y D presentan por las mismas razones un comportamiento de fractura más dúctil y su fractura comienza en el centro de la superficie de fractura y se extiende de forma radial hacia el borde de la misma, evidenciado por la dirección analizada de los clivajes presentes en sus Z_{INT} .

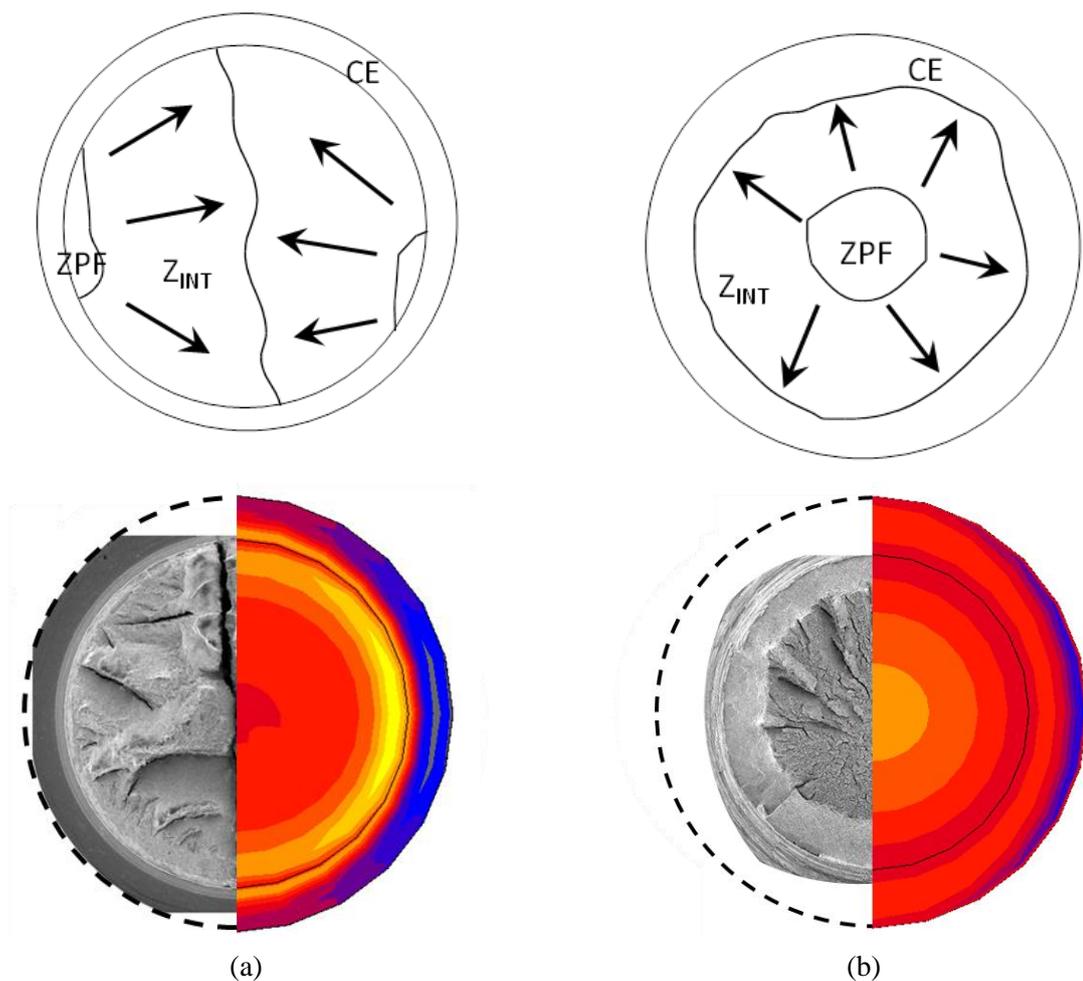


Fig. 5.10. Esquema de los mecanismos de fractura asociados a cada tipo de entalla, (a) con pequeño radio de curvatura, A y B y (b) con gran radio de curvatura, C y D.

De igual forma que sucedía en el caso de las probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, en el caso de las probetas axisimétricas entalladas sometidas a éste mismo tipo de ensayos, la triaxialidad en el instante final de fractura también va a indicar el grado de constreñimiento. Dicho constreñimiento influirá en el proceso de fractura del material.

En el caso de las probetas axisimétricas entalladas los valores de triaxialidad son mayores en las proximidades de las entallas para las probetas con entalla tipo A y B (menor radio de curvatura). Para el resto de las probetas examinadas con entallas de tipo C y D la triaxialidad alcanza sus máximos valores entre la zona central de dicha superficie neta.

La triaxialidad obtenida en las distintas probetas junto con el análisis de las superficies fractográficas de las mismas así como de los mecanismos que en ellas imperan verifican los

mecanismos de fractura propuestos para este tipo de probetas axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción.

2.3. Probetas prismáticas entalladas sometidas flexión por cuatro puntos

Una vez realizados los ensayos de las probetas prismáticas con una entalla sometidas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos se analizaron las curvas $F-u$. Los dos tipos de probetas entalladas presentaban radios de curvatura distintos; PA (menor radio) y PC (mayor radio de curvatura). En las curvas $F-u$ de las probetas prismáticas con entalla de tipo A se han alcanzado menores cargas máximas así como menores desplazamientos registrados por el COD, todo ello en comparación con las probetas con entallas de tipo C. En las curvas $F-u$ de las probetas con entalla tipo C se han registrado las cargas máximas previas a la rotura final, produciéndose un descenso de carga previo a la fractura del material. Este hecho ha ocurrido de igual manera en todas las probetas analizadas con entallas con grandes radios de curvatura, a excepción de las probetas procedentes del alambre de pretensado debido al mayor comportamiento dúctil que éstas presentan. Las probetas con entallas de gran radio de curvatura soportan mayores deformaciones hasta la rotura final.

En el estudio fractográfico y micrográfico se han podido observar las diferentes zonas de fractura de estos alambres, en las cuales se muestra una CE, Z_{INT} y ZPF. La zona de CE tiene un tamaño similar en ambos tipos de probetas entalladas analizadas y un comportamiento análogo en la comparación entre las probetas procedentes de los mismos pasos del proceso de trefilado. Esta zona muestra una disminución del área desde las probetas mecanizadas a partir del alambroón inicial hasta el cuarto paso de la cadena de trefilado, produciéndose un aumento de ésta en las probetas procedentes del alambre de pretensado. Por el contrario el área de la Z_{INT} muestra un aumento desde las probetas procedentes del alambroón inicial hasta el cuarto paso y una disminución de este área en las probetas procedentes del alambre de pretensado. El área de la ZPF muestra variaciones poco significativas, aunque se ha observado un ligero aumento desde el alambre sin trefilar hasta el cuarto paso analizado y un descenso en el alambre de pretensado comercial.

La ZPF está formada en ambos tipos de probetas por CMH*, al igual que sucedía en el resto de las probetas analizadas en la presente Tesis, y la zona de CE presenta micromecanismo de fractura de CMH, de menor tamaño que los presentes en la ZPF. La Z_{INT} está formada por micromecanismos de fractura de clivaje (C) los cuales con el aumento del grado de trefilado del alambre a partir del cual se ha mecanizado la probeta van disminuyendo a favor de la aparición de CMH. Un hecho a señalar es la disminución del tamaño de los microhuecos con

el aumento del grado de trefilado tanto de los CMH presentes en la CE como en de los CMH* presentes en la ZPF de ambos tipos de probetas entalladas.

Dentro del estudio micrográfico de las distintas superficies de fractura se ha podido observar como en las probetas con entallas de tipo A se han presentando menores clivajes que en las probetas con entalla de tipo C en la Z_{INT} . Este hecho es contrario a lo analizado en las probetas anteriores sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, puesto que en éstas las probetas con mayor radio de curvatura de entalla presentaban menores zonas de clivajes en la Z_{INT} . Sin embargo, basándose en la gran cantidad de crestas y valles presentes en la Z_{INT} de las probetas con entalla de tipo A, se puede argumentar la gran dificultad de identificarlos.

Cabe señalar que en las probetas con entallas de tipo A sometidas a estos ensayos se ha analizado, en todos los alambres pertenecientes a los distintos pasos de la cadena de trefilado, una zona de CE en la zona superior de dicha superficie. La zona de CE superior presenta micromecanismos de fractura de CMH con un mayor tamaño que la CE lateral mostrada, éstos no llegan a ser tan grandes como los CMH* presentes en la ZPF y su distribución no es nada homogénea. Además en dicha zona se han podido observar irregularidades de crestas y valles entre los CMH, Fig. 5.11, las cuales se asemejan a las *estrías* presentadas en las ZPF de las probetas axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción procedentes del alambre de pretensado final.

En las micrografías expuestas en la figura anterior se observa como, a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre del cual proceden, las *crestas* y *valles* muestran una mayor direccionalidad hasta asemejarse a las *estrías*, las cuales se habían analizado en las probetas axisimétricas procedente del alambre de pretensado (AYASO, FERNÁNDEZ-VIÑA y TORIBIO, 2010). Además dichas *estrías* presentes en la CE superior también se han analizado en la ZPF de las probetas con entalla de tipo A pertenecientes al alambre de pretensado, mostrando distancias similares entre *estrías*.

Una vez analizadas las superficies de fractura de las probetas, axisimétricas procedentes del alambre de pretensado comercial y prismáticas con entalla de tipo A (menor radio de curvatura) sometidas a ensayos de flexión por cuatro puntos, en las cuales se han producido dichas *estrías* el estudio se han centrado en el análisis de las micrografías obtenidas en la ZPF de las probetas prismáticas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. En estas probetas se han observado *estrías*, no de forma tan clara como las comentadas anteriormente en las probetas con entalla de tipo A procedentes del alambre de pretensado. Sin embargo, al igual que ocurría en las probetas prismáticas sometidas a ensayos de flexión, dichas *estrías* no

se han observado en las probetas con entalla de tipo C (gran radio de curvatura) pertenecientes al alambre de pretensado (Fig. 5.12).

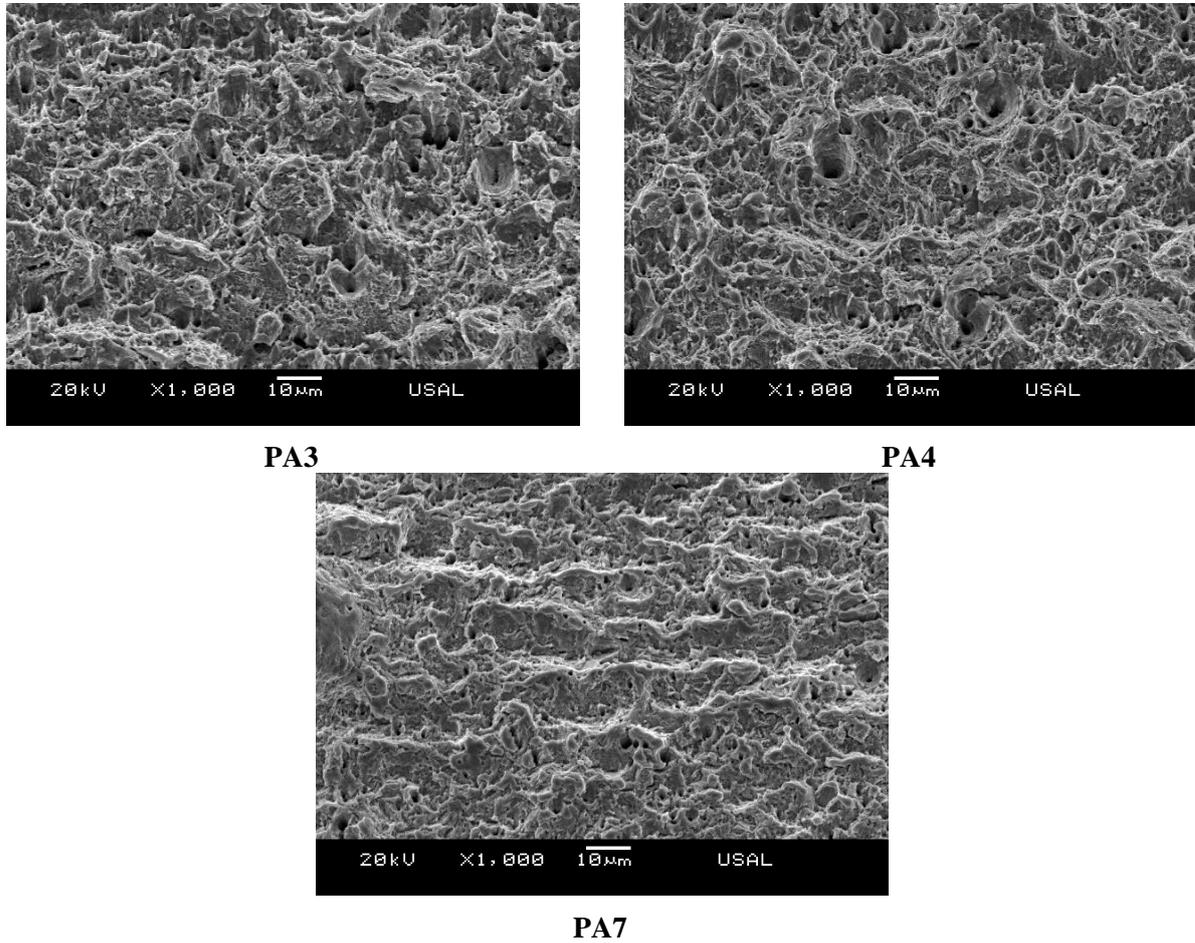


Fig. 5.11. Micrografías de la zona de CE superior de las probetas con entalla de tipo A.

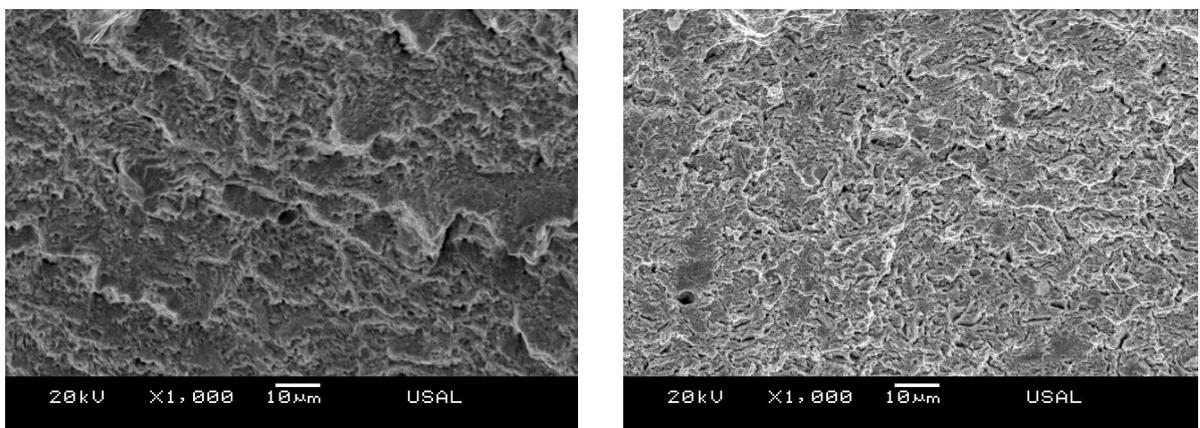


Fig. 5.12. Micrografía de la ZPF de probetas prismáticas; (a) con entalla de tipo A y (b) con entalla de tipo C, procedente del alambre de pretensado.

Comparando las variables internas que imperan en dichos procesos para intentar dilucidar el origen de estas *estrías*, puesto que aparecen en las probetas entalladas axisimétricas y prismáticas con entalla de tipo A sometidas a solicitaciones de tracción además de en las probetas prismáticas con entalla de tipo A sometidas a ensayos de flexión por cuatro puntos, se ha analizado que éstas se producen cuando ocurren estados tenso deformacionales mayores producidos por entallas con menor radio de curvatura. Otro de los factores comunes en la observación de estas estrías es su formación en los procesos de fractura en los alambres de pretensado final, debido a la gran reorganización microestructural que en éstos se presenta.

A continuación se ha realizado un esquema ilustrando la posible formación de estrías debida a la fractura del alambre de pretensado final, Fig. 5.13. Para ello se ha adjuntado una micrografía procedente de la sección transversal de dicho acero, en la cual se observa cómo el tamaño de las estrías (5-15 μm) no coincide con el tamaño presentado por las distintas colonias de perlita. Las estrías por lo tanto pueden formarse por el direccionamiento de la fractura a través del siguiente orden microestructural, grano austenítico previo.

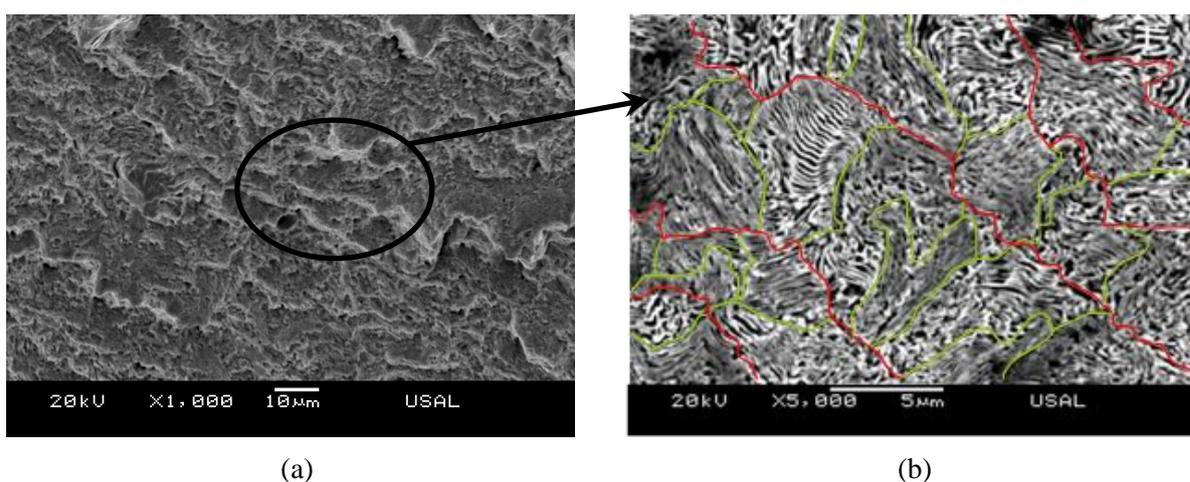


Fig. 5.13. Comparación de las micrografías; (a) con estrías en la ZPF de la probeta A7 y (b) colonias perlíticas en la sección transversal en el alambre E7.

Tras haber realizado un estudio micro-fractográfico de las probetas prismáticas entalladas sometidas a solicitaciones de flexión por cuatro puntos y una modelización numérica de dichos ensayos obteniendo las variables internas, se han analizado los micro-mecanismos de fractura. En las probetas con entalla de tipo A (menor radio de curvatura) la fractura comienza en el fondo de la entalla, zona dónde se encuentra la ZPF y se producen las mayores tensiones, y se extiende hacia el exterior de la misma. Sin embargo, las probetas con entallas de tipo C (mayor radio de curvatura) presentan el comienzo de la fractura en las proximidades del fondo de entalla donde también se han observado la ZPF y las mayores tensiones.

En cuanto a la dirección del avance de la fractura ha venido evidenciada por la dirección de los clivajes presentes en la Z_{INT} , de igual forma que sucedía con las probetas anteriormente analizadas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción. Cabe señalar que en las probetas con entalla de tipo C procedentes del alambre de pretensado el comienzo se da en las inmediaciones del fondo de entalla, mucho más próximas a éstos que las anteriores. En la siguiente Fig. 5.14 se muestran los mecanismos de fractura propuestos, junto con el reparto de tensiones y la fractografía correspondiente a cada tipo de probeta entallada.

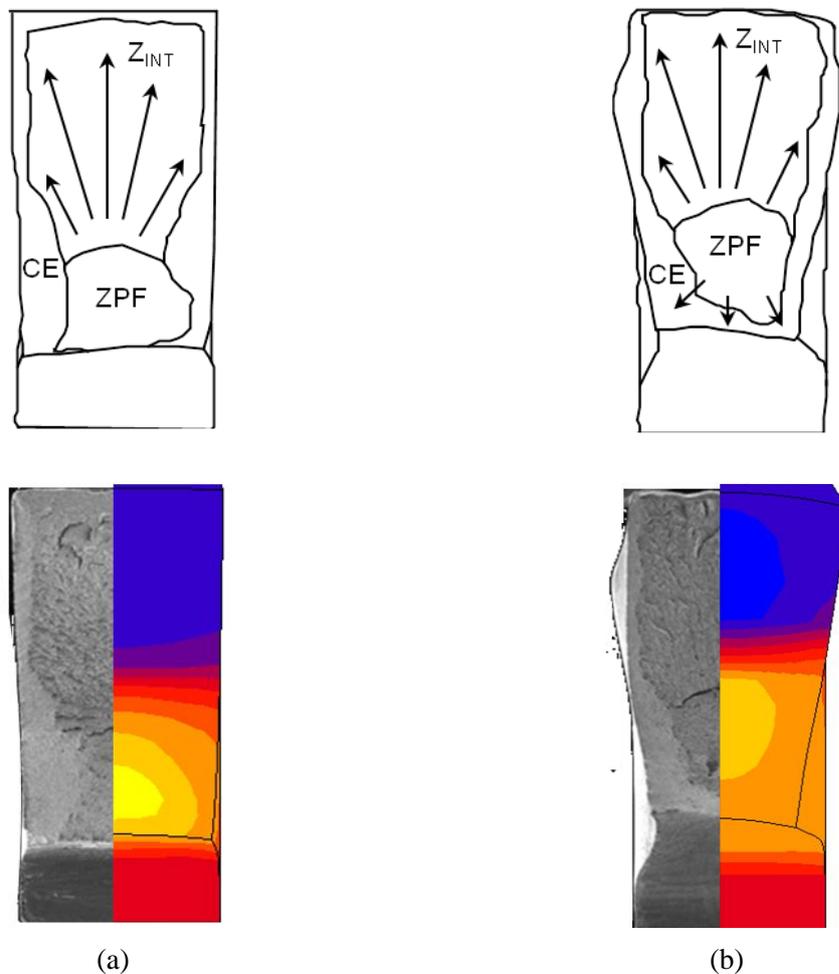


Fig. 5.14. Esquema de los mecanismos de fractura asociados a cada tipo de entalla analizado; (a) con menor radio de curvatura PA y (b) con gran radio de curvatura PC.

De igual forma que ocurría en los dos tipos de probetas anteriormente analizadas, prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, en el caso de las probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos la variable de la triaxialidad, que como se ha comentado en numerosas ocasiones es una medida del constreñimiento al cual se encuentra sometido el material debido a la presencia de entallas, va a influir en el proceso de fractura de dichas probetas.

La distribución de la triaxialidad tensional de las probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión, capítulo IV, muestra como en las probetas con entalla tipo A (menor radio de curvatura) los valores de máxima triaxialidad se ubicaban en los fondos de entalla en el instante final de fractura, por el contrario en las probetas prismáticas con entalla tipo C (mayor radio de curvatura) dichos valores máximos de triaxialidad se han mostrado en las proximidades del fondo de entalla. Estas distribuciones, junto con el análisis micro-fractográfico de dichas probetas, PA y PC, coinciden con los mecanismos de fractura expuestos, ratificando los mismos.

2.4. Comparativa mecanismos de fractura vs entallas

Independientemente del tipo de ensayo al cual hayan sido sometidas dichas probetas analizadas en la presente Tesis, sollicitación bajo tracción ó flexión por cuatro puntos, las probetas con entallas de menor radio de curvatura presentan mecanismos de fractura que se inician desde el fondo de entalla hacia el exterior. Por el contrario las probetas con entalla de mayor radio de curvatura han presentado el inicio de la fractura en la parte central de la superficie de fractura, o en los ensayos de flexión más alejada de la misma, y en las probetas procedentes del alambre de pretensado final dicha fractura tenía su comienzo bien en el fondo de la entalla o en las inmediaciones de la misma. Este hecho muestra la influencia de la reordenación microestructural en el mecanismo de fractura, puesto que las probetas mecanizadas a partir del alambre de pretensado presentan mecanismos de fractura similares independientemente del tipo de entalla que posean.

Cabe señalar que en las probetas asiximétricas no sólo se ha analizado la influencia de los distintos tipos de radios de curvatura sino también de la profundidad, con los resultados obtenidos en las probetas con gran radio de curvatura y gran profundidad no se ha podido observar un comportamiento similar en fractura de las probetas procedentes del alambre de pretensado final. Con lo cual, esta similitud de mecanismo de fractura entre las probetas con distinto radio de curvatura en el alambre de pretensado final va a depender de la profundidad de las mismas, siendo ésta similitud de comportamiento de fractura sólo observable en las probetas cuya profundidad es menor.

3. MICRODEFECTOS GENERADOS POR INCLUSIONES

En la presente Tesis se han analizado los diferentes tipos de microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro y blando basándose no sólo en los cambios morfológicos sufridos por éstas a lo largo del proceso de trefilado, sino también en los cambios morfológicos y distribuciones tensionales que se han producido en las mismas en las ubicaciones con

mayores valores de triaxialidad dentro de los tres tipos de probetas objeto de estudio; prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos de fractura bajo sollicitación de tracción y probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos de fractura bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos.

Para llevar a cabo los estudios realizados se ha partido de análisis previos de los factores de forma de dichos microdefectos generados por inclusiones a lo largo del proceso de trefilado, obteniéndose de ésta manera los factores de forma representativos de los microdefectos observados en cada alambre correspondiente a cada paso del proceso de trefilado, capítulo II. En dicho análisis se obtuvieron, de forma cuantitativa, las mayores aumentos del factor de forma en los microdefectos generados por inclusiones de tipo blando.

En cuanto a los cambios morfológicos obtenidos por los microdefectos generados por inclusiones en las *celdas aisladas* de las modelizaciones del proceso de fractura de las distintas probetas objeto de estudio, cabe señalar que el mayor incremento del factor de forma (ΔS) de los microdefectos lo han experimentado aquellos generados a partir de inclusiones de tipo blando, al igual que ocurría en los microdefectos de éste tipo a lo largo del proceso de trefilado. En todas las *celdas aisladas* de las modelizaciones del proceso de fractura de las distintas probetas analizadas, las mayores variaciones del factor de forma las experimentaron los microdefectos introducidos en las probetas con entallas de gran radio de curvatura. Las mayores variaciones de los factores de forma para los microdefectos generados por inclusiones en probetas con gran radio de curvatura es debido a que éstas son capaces de asumir mayores deformaciones antes de la fractura total del material.

Dentro del análisis de los factores de forma de los dos tipos de microdefectos se ha observado como éstos, en las *celdas aisladas* de las probetas axisimétricas, presentan menores diferencias entre los analizados en el alambrón inicial y el alambre de pretensado cuando la profundidad de entalla es mayor, entallas B y D. Los microdefectos generados por inclusiones de tipo blando han experimentado una mayor variación del factor de forma en las *celdas aisladas* pertenecientes a las modelizaciones del proceso de fractura de las probetas prismáticas sometidas a ensayos de flexión por cuatro puntos, con respecto a las variaciones de dichos microdefectos obtenidas en las probetas entalladas sometidas a ensayos de fractura bajo sollicitación de tracción.

Los microdefectos generados por inclusiones de tipo duro y blando, en las modelizaciones de los procesos de fractura de las distintas probetas objeto de estudio, se han introducido en las probetas mecanizadas a partir del alambrón inicial y el alambre de pretensado final, alambres extremos de la cadena de trefilado, obteniéndose mayores variaciones de los factores de forma

en los introducidos en el alambón inicial. Este hecho es debido a que durante el proceso de trefilado el alambre sufre un endurecimiento por deformación, y por lo tanto los alambres fuertemente trefilados no son capaces de asumir tanta deformación como los alambres pertenecientes a los primeros pasos de la cadena de trefilado.

Además de los cambios morfológicos experimentados por los microdefectos generados por inclusiones también se han analizado en las distintas probetas objeto de estudio los valores y las distribuciones tensionales generados por los mismos. En dicho análisis se ha observado como en su mayoría los microdefectos con inclusiones de tipo duro son los que mayores variaciones tensionales experimentan con respecto a la *celda origen* en todos los tipos de probetas analizadas. Esto es debido a la gran resistencia a la deformación del microdefecto que opone la inclusión de tipo duro situada en el interior del mismo.

En cuanto a la distribución de los valores tensionales se refiere se ha observado cómo tanto la tensión de von Mises como la hidrostática poseen distribuciones similares en casi todos los casos estudiados, independientemente del tipo de microdefecto, presentando esta distribución los mayores valores en la zona central del microdefecto en el plano yz y disminuyendo gradualmente a ambos lados de la misma hasta hacerse mínimos en los extremos. Dicha distribución de valores se ha observado en todos los casos de modelizaciones de ensayos de fractura de *celdas aisladas* de las probetas analizadas.

Los microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro se han determinado que tienen una mayor relevancia global, puesto que en las modelizaciones numéricas realizadas se han obtenido las mayores variaciones de los valores de las tensiones de σ y σ_{eq} , en comparación con los presentados en la *celda origen*. Los mayores valores de tensiones obtenidos en las *celdas aisladas* se corresponden con los mayores valores de tensiones obtenidos en las *celdas origen* de las distintas probetas, siendo por lo tanto éstos muy similares o ligeramente superiores al introducir los microdefectos generados por las inclusiones de tipo duro en las *celdas aisladas*.

4. FRACTURA ANISÓTROPÍA

En estudios previos han sido numerosos los investigadores que han observado el comportamiento localmente anisótropo en éste tipo de alambres de acero perlítico trefilado, bien en ensayos de fractura de probetas lisas sometidas a sollicitación de tracción (AYASO et al., 2005), en ensayos de fractura a sollicitación de tracción sobre probetas entalladas con simetría de revolución (AYASO, 2001), y en ensayos de fractura a tracción sobre probetas previamente fisuradas por fatiga (TOLEDANO 1998 y GONZÁLEZ 2007). Dichos investigadores

han observado dos comportamientos en fractura bien diferenciados: un comportamiento en fractura bajo el cual la superficie de fractura que se genera es relativamente plana y suave, encontrándose contenida en un plano transversal al eje longitudinal del alambre (eje el cual es plenamente coincidente con el eje de la carga creciente aplicada durante los distintos ensayos), denominando así a este comportamiento en fractura como *comportamiento isótropo en fractura*, siendo este tipo de comportamiento mostrado por los alambres pertenecientes a los primeros pasos del proceso del trefilado (*aceros débilmente trefilados*). Por otra parte se encuentran los alambres de acero correspondientes a los últimos pasos del trefilado (*aceros fuertemente trefilados*) los cuales muestran una vez finalizados los distintos ensayos, una superficie de fractura contenida en planos claramente distintos de aquel que contiene la sección neta transversal de los diferentes alambres estudiados, esto es, presentan superficies de fractura muy abruptas con claras deflexiones del camino de fractura en forma de grandes valles y crestas, siendo denominado este comportamiento en fractura como *comportamiento anisótropo en fractura* (AYASO y TORIBIO, 2003, 2005).

En todas las probetas estudiadas en la presente Tesis, prismáticas y axisimétricas sometidas a ensayos de tracción y prismáticas sometidas a ensayos de flexión, se han observado comportamientos localmente anisótropos en fractura. Las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción han presentando claras deflexiones del camino de fractura a partir los alambres procedentes del cuarto paso del proceso de trefilado. En dichas probetas se ha observado un mayor comportamiento localmente anisótropo cuanto menor es el radio de curvatura de la entalla y cuanto mayor es la profundidad de la misma, siendo el caso más favorable para dicha deflexión el de las probetas axisimétricas con entalla de tipo B, Fig. 5.15 (a).

Por otra parte en las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de flexión se han obtenido fracturas localmente anisótropas mucho mayores que las analizadas en las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción, Fig. 5.15 (b). En cuanto a la aparición de dichas deflexiones del camino de fractura, éstas se han podido observar desde las probetas procedentes del alambre del tercer paso del proceso de trefilado con entalla de tipo A. Sin embargo en las probetas prismáticas con entalla de tipo C se han observado dichas deflexiones del camino de fractura a partir de las probetas mecanizadas a partir del alambre del cuarto paso del proceso de trefilado.

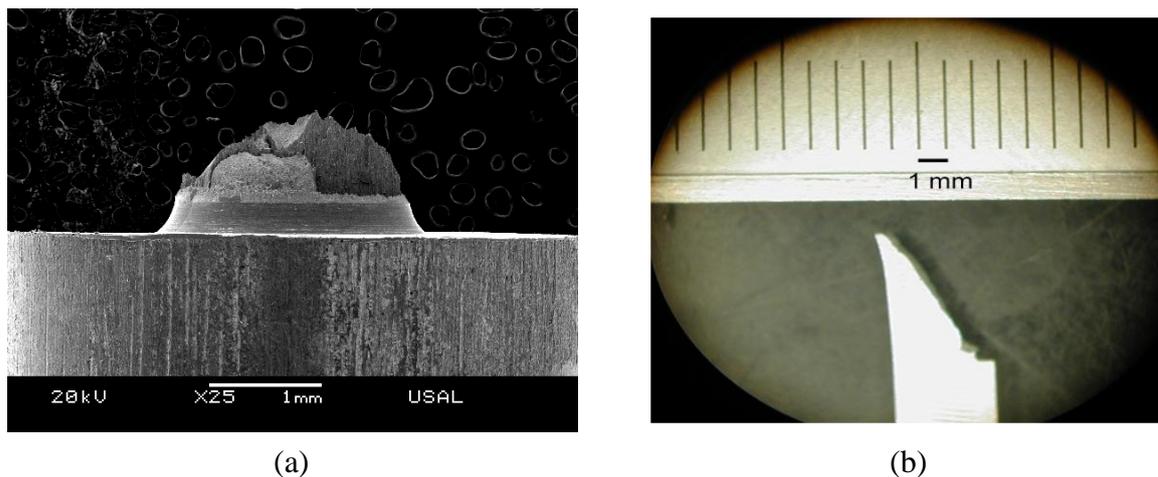


Fig. 5.15. Deflexión del camino de fractura en: (a) probeta axisimétrica B7 y (b) probeta prismática PA7.

Todos los comportamientos localmente anisótropos en fractura analizados se han acentuado cuanto menor es el radio de entalla y mayor el grado de trefilado del alambre de origen de dichas probetas examinadas. Además se ha observado el aumento de la fractura localmente anisótropa, en el caso de las probetas axisimétricas entalladas, cuanto mayor es la profundidad de la entalla de las mismas.

La fractura localmente anisótropa, como se ha comentado, se produce en los alambres de los últimos pasos del proceso de trefilado, y más acusada cuanto mayor es el grado de trefilado. Una de las posibles causas de dicho tipo de fractura es la reorganización microestructural, la cual consiste en la reorientación de las láminas que conforman las colonias de perlita a favor de la dirección de dicho proceso, además del aumento de esbeltez a favor de la dirección de dicho proceso de todas las colonias presentes en el acero perlítico.

Otra de las posibles causas del comportamiento localmente anisótropo que poseen dichos alambres de acero perlítico fuertemente trefilado son los microdefectos que se han generado durante el proceso de trefilado. Dichos microdefectos podrían influir en el camino de la fractura, puesto que en su mayoría generan microcavidades o discontinuidades dentro de la estructura perlítica, por las cuales la fractura podría progresar. Los microdefectos analizados en el capítulo II de la presente Tesis se han clasificado en microdefectos intra e intercoloniales, los cuales según la influencia de éstos en la fractura del alambre posibilitarían que dicha fractura se produjese atravesando colonias de perlita o a través de los bordes de las mismas respectivamente.

Los microdefectos intracoloniales observados en los alambres fuertemente trefilados principalmente son; las *garras de leopardo*, las cuales se presentan en colonias con láminas

orientadas y en direcciones próximas a los 45° con respecto al eje axial del alambre, las *pseudocolonias*, cuyas láminas están dispuestas en dirección perpendicular a la dirección del proceso de trefilado y las cuales se presentan en estos alambres fragmentadas, con gran espaciado interlaminar y muy curvadas, y la evolución de ambos microdefectos a *desgarros intracoloniales*. En el caso de los microdefectos intracoloniales, el camino de fractura tendería a deflectar a través de las colonias perlíticas, generándose fracturas localmente anisótropas, Figs. 5.16-5.17.

En las figuras siguientes se muestra el posible avance de la fractura a través de los microdefectos intracoloniales, además de las micrografías obtenidas de las distintas probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción interrumpidos, en las cuales se muestra la deflexión producida por dichos microdefectos.

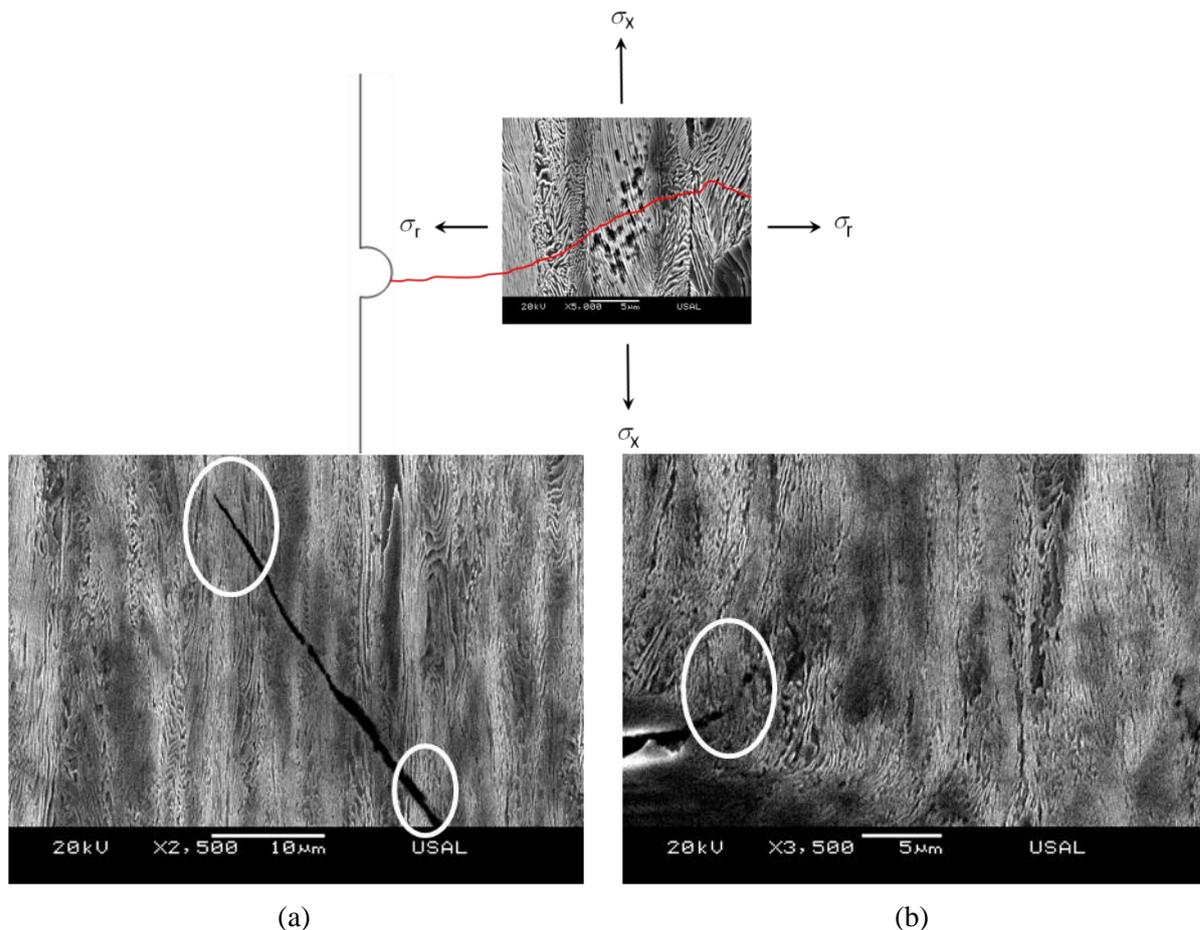


Fig. 5.16. Posible deflexión del camino de fractura a través de garras de leopardo en las probetas; (a) PAA7 y (b) B7.

El camino de la fractura en las probetas procedentes de los alambres fuertemente trefilados deflecta también a través de los bordes de las colonias perlíticas que los conforman, produciéndose fracturas localmente anisótropas. Los microdefectos intercoloniales

observados (microdescolonizaciones, microhuecos producidos en bordes de las distintas colonias y generados por inclusiones) son las zonas por las cuales puede desviarse el camino de fractura, produciéndose dichas deflexiones locales.

La mayoría de las microdescolonizaciones presentes en los distintos tipos de probetas analizadas se han observado en los alambres pertenecientes a los últimos pasos del proceso de trefilado formando parte de desgarros intercoloniales, o en los bordes de colonias próximos a los desgarros intracoloniales. No obstante, en las distintas probetas sometidas a ensayos interrumpidos, se han observado avances del camino de fractura a través de dichas microdescolonizaciones, Fig. 5.18.

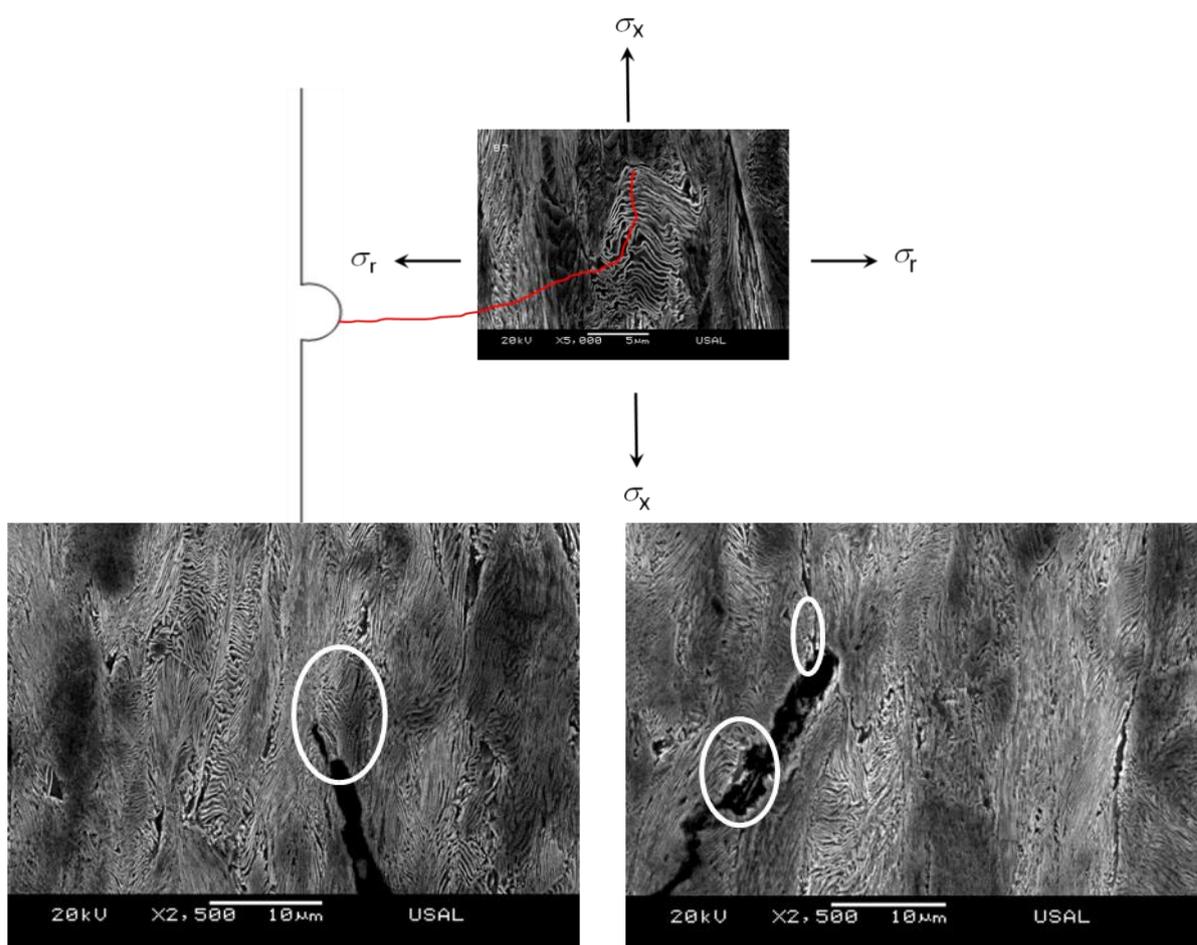


Fig. 5.17. Posible deflexión del camino de fractura a través de pseudocolonias en la probeta PAA4.

En cuanto a la deflexión del camino de fractura a través de los microdefectos generados por inclusiones, se han obtenido micrografías de las distintas probetas sometidas a ensayos interrumpidos, en las cuales se muestra como éstos son lugares concentradores de tensiones hacia los cuales la fractura tiende, Fig. 5.19.

Los microdefectos generados por inclusiones, como se ha analizado a lo largo de la presente Tesis, tanto los producidos por inclusiones de tipo blando, duro o combinación de los mismos, aumentan su factor de forma a favor de la dirección del proceso de trefilado durante el mismo. Esto hace que el eje mayor de la elipse, a la cual se han asemejado éste tipo de microdefecto, se sitúe paralelo al eje longitudinal del alambre, hecho que produce que el avance del camino de fractura pueda deflectar a través de dichos microdefectos, generándose fracturas localmente anisótropas, las cuales serán más acentuadas cuanto mayor sea el grado de trefilado del alambre en cuestión. Dichos microdefectos son concentradores de tensión, pero dado el tamaño de las inclusiones analizadas, las deflexiones a través de los mismos son un factor más que contribuye al comportamiento localmente anisótropo.

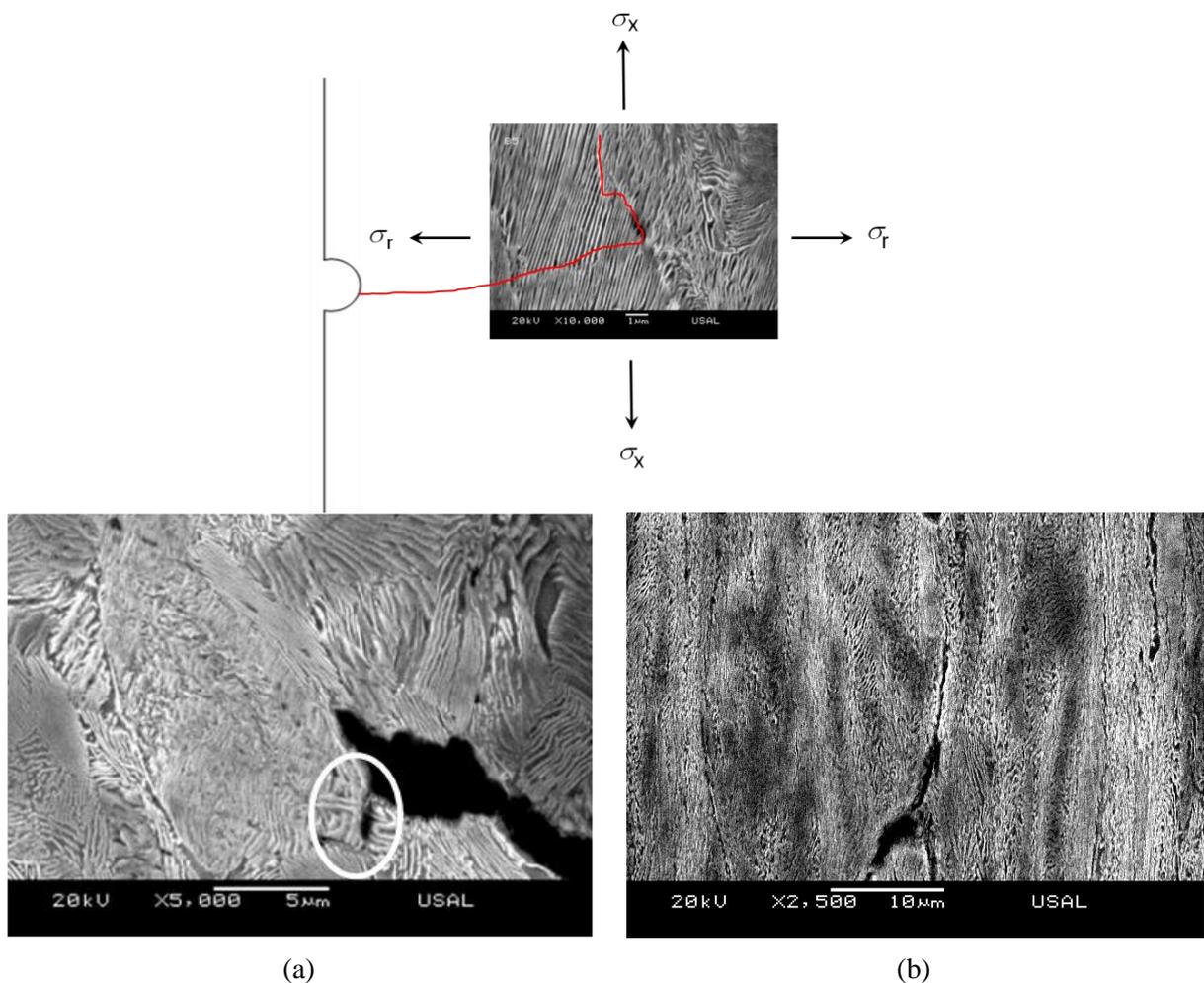


Fig. 5.18. Posible deflexión del camino de fractura a través de desgarros intercoloniales en las probetas; (a) PAA3 y (b) A7.

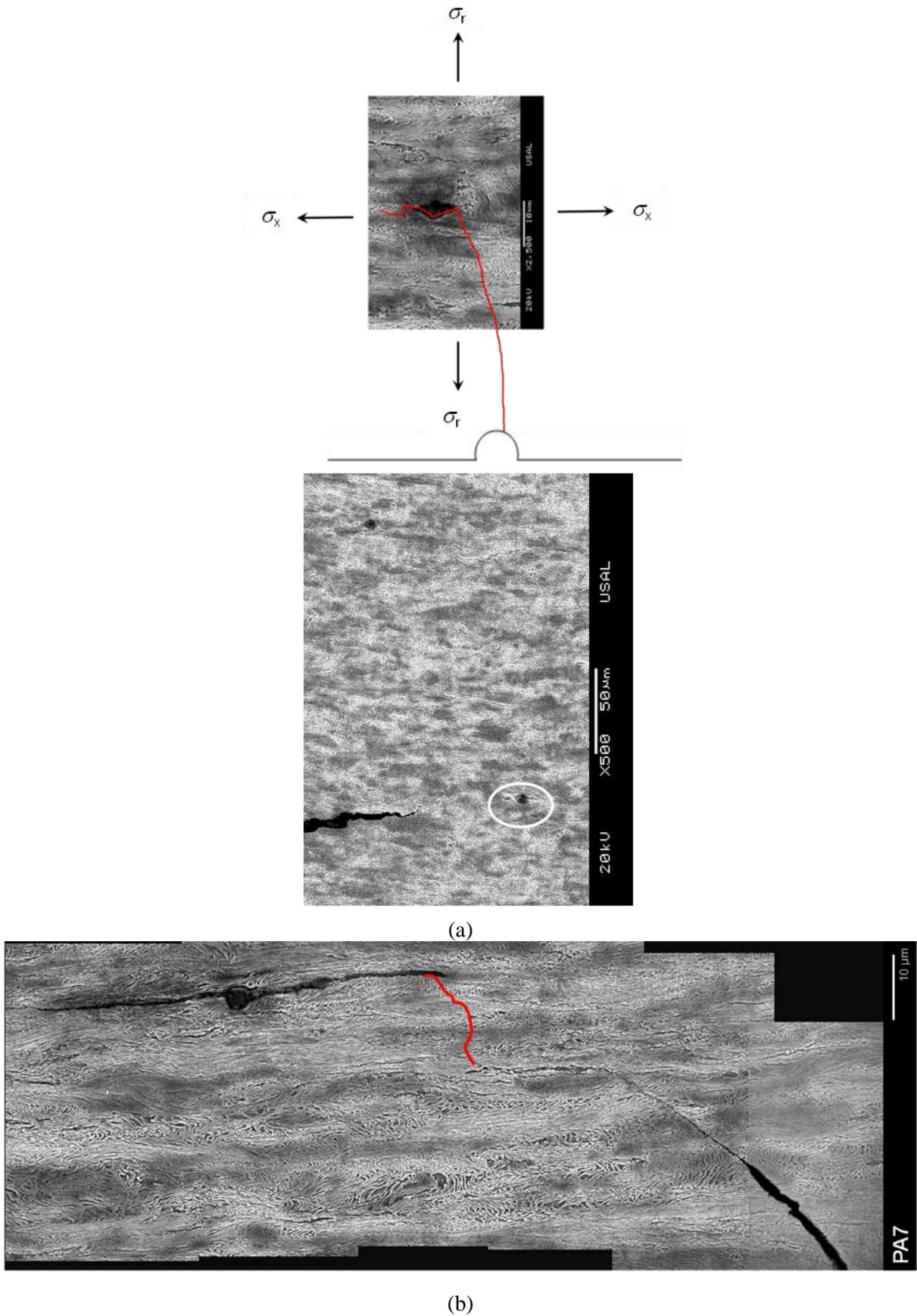


Fig. 5.19. Posible deflexión del camino de fractura a través de microdefectos generados por inclusiones en las probetas; (a) PA4 y (b) PA7.

Cabe señalar que en todas las probetas objeto de estudio mecanizadas a partir de los alambres fuertemente trefilados, sometidas a ensayos de fractura bajo sollicitación de tracción y flexión, se ha observado un comportamiento en fractura localmente anisótropo. Sin embargo las probetas con entalla cuyo radio de curvatura es menor, tipos A y B, presentan mayores comportamientos en fractura localmente anisótropos.

Los microdefectos analizados en las micrografías pertenecientes a las probetas sometidas a ensayos interrumpidos muestran a éstos como causas muy probables para potenciar las deflexiones del camino de fractura (*comportamiento anisótropo en fractura*) conjuntamente con la reorganización microestructural que han experimentado dichos alambres fuertemente trefilados durante este proceso: orientación de las láminas que conforman las colonias de perlita a favor de la dirección del proceso de trefilado (eje longitudinal del alambre), aumento de esbeltez de las colonias de perlita también a favor de dicha dirección y disminución del espaciado interlaminar de las láminas que conforman las colonias orientadas.

En el estudio micrográfico de todas las probetas entalladas procedentes de alambres fuertemente trefilados se han observado deflexiones del camino de fractura producidas por micro-daños intercoloniales e intracoloniales, Fig. 5.20. No obstante, en la mayoría de las probetas cuyos radios de curvatura son más pequeños la direccionalidad de la fractura parece marcada por las concentraciones de tensiones mucho mayores que las presentes en las probetas entalladas con gran radio de curvatura, en las cuales dicho camino de fractura no muestra una direccionalidad tan marcada, Fig. 5.21.

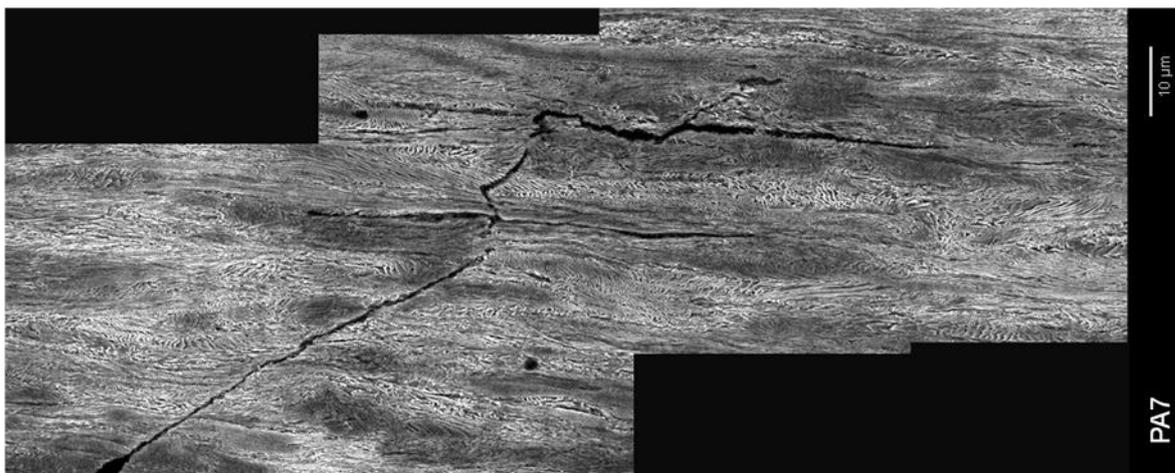


Fig. 5.20. Avance de fractura y deflexiones de la misma a través de diferentes microdefectos presentes en una probeta tipo PA7 sometida a un ensayo de flexión por cuatro puntos.

En general los estados tenso-deformacionales producidos por los distintos radios de curvatura de la entalla, además de condicionar el comportamiento en fractura de éstos aceros, tienen

gran importancia en la evolución de los microdefectos durante la realización del ensayo e indudablemente, son en última instancia el factor más importante en el comportamiento anisótropo en fractura.

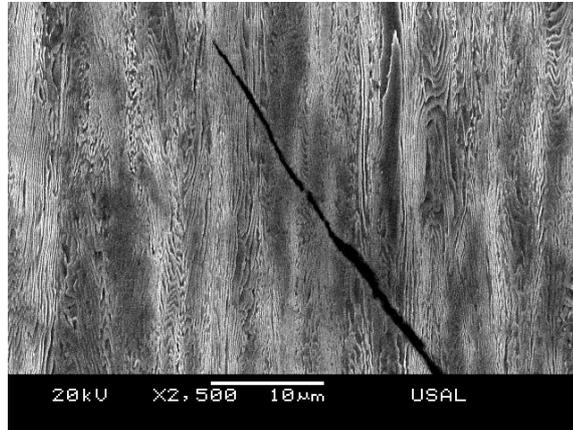


Fig. 5.21. Direccionalidad del avance de fractura en la probeta PAA7.

VI. CONCLUSIONES

En la presente Tesis se ha realizado un estudio micrográfico y fractográfico de los alambres pertenecientes a la cadena de trefilado de la familia de aceros E, B y C, así como de las probetas lisas, prismáticas y axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción y de las probetas prismáticas entalladas sometidas a flexión por cuatro puntos, todas ellas procedentes de los alambres de la cadena de trefilado de acero de la familia E.

Dentro del análisis micrográfico de los distintos alambres y probetas se han analizado los micro-defectos presentes en su microestructura, la evolución de los mismos durante el proceso de trefilado y la realización de los ensayos. El análisis fractográfico se ha centrado en el estudio de los diferentes micromecanismos de fractura y de las zonas que aparecen dentro de la superficie de fractura.

Una vez analizadas las probetas mecanizadas sometidas a los distintos tipos de ensayos se procedió a la modelización mediante el método de elementos finitos (MEF), con el fin de determinar las variables internas que imperan en el instante final de la fractura. A partir de

estas modelizaciones se han realizado simulaciones numéricas paralelas de los elementos de mayor triaxialidad en las cuales se han introducido micro-defectos generados por inclusiones.

1. MICRO-DEFECTOS Y SU EVOLUCIÓN

Los micro-defectos o irregularidades presentes en este tipo de acero se pueden clasificar en dos tipos; intracoloniales e intercoloniales.

Los micro-defectos intracoloniales, presentes en el interior de las colonias de perlita, a su vez se han clasificado en *piel de leopardo* (rotura de láminas de cementita de una misma colonia cuyas láminas están orientadas en la dirección del eje longitudinal del alambre), *garras de leopardo* (producido por la unión de las micro-cavidades generadas por la rotura de las láminas de cementita durante el trefilado en colonias cuyas láminas están orientadas próximas a la dirección principal del alambre), *rotura por curvaturas* (se observa dentro de las láminas de una colonia las cuales aparecen curvadas debido al acomodamiento microestructural), *micro-descolonizaciones* (se producen como consecuencia de la separación entre colonias en los límites de éstas), *pseudocolonias perlíticas* (colonias cuyas láminas no se han orientado en la dirección longitudinal del alambre, las cuales poseen un espaciado interlaminar anómalo y grandes curvaturas) y *desgarros intracoloniales* (producidos por la unión de uno a varios de los micro-defectos anteriores).

En cuanto a los micro-defectos intercoloniales, éstos se producen por la unión de varios de los micro-defectos intracoloniales comentados, al generar un micro-daño que atraviesa las distintas colonias de perlita. Cabe señalar las microfisuras generadas en los alrededores de las *inclusiones* existentes en el propio material.

Las inclusiones analizadas se han clasificado a lo largo del estudio en inclusiones; de tipo blando (sulfuros de manganeso principalmente), de tipo duro (óxidos, nitruros y carburos) y mezcla (normalmente formadas por una inclusión de tipo duro y una o varias de tipo blando).

Los micro-defectos analizados progresan, a lo largo del trefilado así como en menor medida durante los ensayos de las probetas estudiadas, a desgarros intra e inter-coloniales. Los mayores micro-defectos se han analizado en el alambre procedente del último paso del proceso de trefilado y, dentro de las probetas entalladas, en las inmediaciones de las entallas.

Las probetas entalladas con menor radio de curvatura han presentado los mayores micro-defectos en las inmediaciones de la entalla en los instantes previos a fractura, mientras en las probetas con mayor radio de curvatura dichos micro-defectos se han presentado de manera

más acusada en las zonas próximas a la entalla pero más alejadas que en las probetas con entalla de menor radio de curvatura.

En las láminas que conforman las pseudocolonias perlíticas se produce un aumento del espaciado interlaminar con el aumento de la deformación plástica, hecho que conlleva la disminución de la resistencia de éstas. La evidencia de este hecho se encuentra en las morfologías de tipo *cuña* mencionadas en la presente Tesis. Además, en las pseudocolonias perlíticas se ha propuesto un nuevo mecanismo de formación de las mismas en forma de *cuña* o *raíz de diente*, generándose dicha geometría gracias al propio proceso de trefilado en sí y por las condiciones de contorno impuestas por las colonias perlíticas colindantes a la colonia perlítica en cuestión.

En cuanto a las inclusiones se refiere, se ha realizado un estudio de la evolución de las mismas con el proceso de trefilado, encontrándose que dicho proceso provoca una deformación a favor de la dirección longitudinal del alambre, en especial para aquellas que soportan grandes deformaciones plásticas (inclusiones de tipo blando).

Se ha observado además que en torno a cada una de las inclusiones se genera una microfisura longitudinal, al no soportar éstas la misma deformación plástica a la que es sometido el acero perlítico durante el trefilado.

En la cuantificación del factor de forma de las inclusiones presentes en este tipo de acero perlítico se ha demostrado como las inclusiones denominadas de tipo blando son las que mayor elongación han experimentado durante el proceso de trefilado.

No obstante, todas las inclusiones analizadas muestran un aumento de la esbeltez como consecuencia del proceso de trefilado. Las mayores deformaciones de dichas inclusiones se presentan en el semieje mayor de la inclusión (dirección de trefilado), produciéndose en el eje menor de la misma un apilamiento de material, mayor en el caso de las inclusiones de tipo duro debido a la resistencia a la deformación que éstas oponen.

2. ANÁLISIS FRACTOGRAFICO Y MECANISMOS DE FRACTURA

2.1. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de tracción

Las probetas de tipo PAA y PCC presentan variaciones similares de la rigidez y la carga correspondiente al límite elástico, produciéndose en ambas una disminución de los parámetros a medida que aumenta el proceso de trefilado. Como excepción a la tendencia se encuentran

las probetas PAA7 y PCC7 por causas de un tratamiento termo-mecánico inherente al proceso de fabricación del material estudiado.

Las probetas tipo PAA y PCC presentan tendencias similares en la variación de área de las distintas zonas presentes en la superficie de fractura, siendo creciente el área de la zona CE y decreciente el área de la Z_{INT} a medida que aumenta el grado de trefilado de los alambres. Como excepción se encuentra el alambre de pretensado comercial; dicha excepción viene dada por el tratamiento termo-mecánico de relajación de tensiones al que ha sido sometido.

La zona de proceso de fractura, ZPF, difiere en cuanto a su ubicación espacial dentro de las probetas estudiadas, encontrándose en la periferia de la probeta (fondo de entalla) para las entallas con pequeño radio de curvatura (AA) y en el centro de las misma para aquellas con gran radio de curvatura (CC).

Cuanto menor es el radio de curvatura de la entalla (AA) y mayor es el límite elástico (σ_Y) del material empleado para la mecanización de la probeta, mayor es el comportamiento anisótropo en fractura mostrado en la forma de una clara deflexión del camino de fractura.

2.2. Probetas axisimétricas entalladas bajo sollicitación de tracción

Dentro del análisis fractográfico de las probetas con entallas tipo A, B, C y D, la Z_{INT} está compuesta por micro-mecanismo de fractura por clivaje, los cuales van desapareciendo a favor de la fractura por coalescencia de microhuecos (CMH) a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre a partir del cual se han mecanizado.

Tanto la CE como la ZPF están formadas por micro-mecanismos de fractura de microhuecos, los cuales en la ZPF poseen un tamaño anormalmente superior, CMH*. Los microhuecos de ambas zonas van disminuyendo de tamaño con el aumento del grado de trefilado.

En cuanto a la deflexión del camino de fractura, las paredes cuasi-verticales de la Z_{INT} , están compuestas por clivajes elongados. Los clivajes de dicha zona son más elongados cuanto mayor es el grado de trefilado del alambre de procedencia de la probeta. En la Z_{INT} desaparecen los clivajes a favor de los microhuecos, siendo este comportamiento más acusado en las probetas con mayor radio de curvatura.

Las probetas con entallas de tipo B (menor radio de curvatura, mayor profundidad) procedentes de los alambres fuertemente trefilados son las que mayor comportamiento

localmente anisótropo presentan, seguidas de las probetas con entallas de tipo A (menor radio de curvatura, menor profundidad).

Las probetas con entallas de tipo C (gran radio de curvatura, menor profundidad) presentan anisotropía casi imperceptible y en las probetas con entallas de tipo D (mayor radio de curvatura, mayor profundidad) no se ha observado un comportamiento localmente anisótropo.

En la ZPF de todas las probetas objeto de estudio procedentes de los alambres de pretensado, con independencia del tipo de entalla, se analizaron a nivel fractográfico las denominadas “*estrías*”, debido al espaciado entre éstas se ha determinado que las mismas pueden ser causadas por los límites entre colonias y/o grano austenítico previo (GAP) previos a la fractura de las probetas.

2.3. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos

Las probetas entalladas con menor radio de curvatura, PA, producen una mayor concentración de tensiones, la cual conlleva una fractura más frágil acompañada de una mayor presencia de clivajes en la Z_{INT} .

La variación del área para las diferentes zonas de la superficie de fractura, presentes en ambos tipos de probetas entalladas, PA y PC, sometidas a sollicitaciones de flexión por cuatro puntos, es independiente del radio de curvatura.

Queda patente la influencia del mayor grado de concentración de tensiones, el cual se produce con menor radio de curvatura, en la fractura localmente anisótropa, haciendo que ésta produzca una mayor deflexión del camino de fractura y aparezca en alambres procedentes de pasos de trefilado inferiores.

Los radios de curvatura menores potencian la fractura localmente anisótropa que de por sí tiene el acero de trefilado debido a los cambios microestructurales que experimenta en el proceso de conformado.

3. MODELIZACION NUMÉRICA Y VARIABLES INTERNAS

3.1. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de tracción

En el análisis de las variables internas se muestra que la σ_x , σ_y , σ_z y σ presentan valores máximos en las proximidades de la entalla para las probetas con entalla de tipo AA. Sin

embargo, la tendencia es contraria en las PCC, presentándose los valores máximos en el centro del ligamento, desplazándose éstos hacia el fondo de entalla a medida que avanza el grado de trefilado de los alambres de procedencia.

La σ_z se hace negativa en el centro de las probetas PAA4, PAA7 y PCC7. Por otra parte, la σ_{eq} y ε_{eq}^P , alcanzan sus valores máximos en los fondos de entalla, además de ser ésta última mayor en las PCC y decrecer con el aumento del grado de trefilado de los alambres.

Los máximos valores de triaxialidad se sitúan en las proximidades de la entalla para las probetas con menor radio de curvatura (PAA) y en el centro para las probetas con mayor radio de curvatura (PCC). Una excepción a dicho comportamiento se presenta en la probeta PCC7, con comportamiento análogo a las PAA, hecho debido al endurecimiento por deformación provocado por el proceso de trefilado, el cual implica que dicha probeta presente una menor influencia del radio de las entallas en el proceso de fractura.

En las modelizaciones numéricas de los micro-defectos generados por las inclusiones en las probetas prismáticas entalladas se ha observado como los cambios de morfología son más acusados en los generados por inclusiones de tipo blando y dentro de éstos los mayores se producen en las probetas PCC0, pertenecientes al alambroń inicial y cuya entalla posee un radio de curvatura mayor.

Los micro-defectos con mayor influencia en cuanto a cambios tenso-deformacionales en comparación con la celda origen son los generados por las inclusiones de tipo duro, en los cuales la inclusión ejerce una mayor resistencia a la deformación. Las mayores variaciones de tensiones analizadas, tensión hidrostática σ y tensión equivalente σ_{eq} , se producen en los micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro en las probetas mecanizadas a partir de alambre de pretensado, último paso del proceso de trefilado, y dentro de éstas los mayores cambios se han obtenido en las PAA7, las cuales poseen un radio de curvatura menor.

3.2. Probetas axisimétricas entalladas bajo sollicitación de tracción

En los estudios mediante MEF de los ensayos de las probetas axisimétricas entalladas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción se han obtenido los siguientes resultados:

En cuanto a las tensiones normales, hidrostática y equivalente se refiere, σ_x , σ_y , σ_z , σ y σ_{eq} todas ellas han mostrado los mayores valores en el fondo de entalla para las probetas con menor radio de curvatura, A y B, y en el centro de la superficie neta para las probetas con mayor radio de curvatura, C y D. Dichos valores máximos de estas tensiones, salvo de la σ_{eq} ,

aumentan con el grado de trefilado del alambre de procedencia, aunque cabe señalar la excepción de las probetas 7B y 7C, en las cuales los valores decrecen con respecto a las probetas ensayadas procedentes del alambre de trefilado anterior, 4B y 4C. La ε^P alcanzan sus valores máximos en los fondos de entalla para todas las probetas axisimétricas estudiadas, y éstos son mayores en las probetas con entalla de tipo C y D (mayor radio de curvatura). Los valores máximos de ésta disminuyen a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre de procedencia.

Las probetas axisimétricas entalladas con menor radio de curvatura (A y B) presentan los mayores valores de triaxialidad con respecto a las probetas axisimétricas de igual profundidad pero con mayor radio de curvatura (C y D respectivamente).

En las modelizaciones numéricas de los micro-defectos generados por las inclusiones en las probetas axisimétricas entalladas se ha observado como los cambios de morfología son más acusados en los generados por inclusiones de tipo blando y dentro de éstos los mayores se producen en las probetas 7D pertenecientes al alambre de pretensado y cuya entalla posee un radio de curvatura mayor.

Los mayores cambios tenso-deformacionales de los micro-defectos generados por inclusiones, en comparación con la celda origen, son los generados por las inclusiones de tipo duro. Éstos han registrado las mayores variaciones de tensión hidrostática σ y tensión equivalente σ_{eq} en las modelizaciones correspondientes a las probetas axisimétricas con entalla de tipo B (menor radio de curvatura y mayor profundidad de entalla) procedente del alambre de pretensado.

3.3. Probetas prismáticas entalladas bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos

En el análisis de las variables internas se muestra que tanto las tensiones normales σ_x y σ_z como la tensión hidrostática σ presentan valores máximos en las proximidades de la entalla para la PA0 y en el fondo de entalla para la PA7. Sin embargo los valores máximos de la tensión normal σ_y para todas las probetas con entalla tipo A se sitúan en las proximidades del fondo de entalla. Tanto las tensiones normales como la tensión hidrostática presentan los valores máximos en las PC, localizados en la zona central inferior de la superficie neta, bien procedan del alambroń inicial o bien del alambre de pretensado final. En la distribución de los valores de todas las tensiones normales y de la tensión hidrostática σ , se han obtenido los valores máximos en las PA (menor radio de curvatura). Las tensiones normales σ_x y σ_y , al igual que la tensión hidrostática σ , presentan valores negativos (compresión) en la zona superior de la superficie neta. En la distribución de la tensión equivalente de von Mises, σ_{eq} , se han obtenido los valores máximos en el fondo de la entalla para ambos tipos de probetas

analizadas. Dicha tensión es mayor en las PC, disminuyendo a medida que aumenta el grado de trefilado del alambre de procedencia. La deformación plástica equivalente, ϵ_{eq}^P , es máxima en los fondos de entalla, siendo mayor en las PC y dentro de éstas es máxima en la PC0.

Los valores máximos de triaxialidad, t , se sitúan en las proximidades de la entalla para las probetas con menor radio de curvatura (PA) y en la zona central inferior para las probetas con mayor radio de curvatura (PC). Los valores máximos de la triaxialidad son similares entre probetas con el mismo tipo de entalla. Se han obtenido mayores valores de triaxialidad en las probetas PA (menor radio de curvatura). Los valores máximos de triaxialidad en todas las probetas prismáticas entalladas, PA y PC, se alcanzan en la ZPF.

En cuanto a la modelización numérica de los micro-defectos generados por inclusiones, introducidos en este tipo de probetas prismáticas sometidas a solicitaciones de flexión, los micro-defectos generados por inclusiones de tipo blando son los que mayores cambios morfológicos generan, hecho producido por la mínima o nula resistencia que dichas inclusiones oponen a la deformación. Dentro de las modelizaciones numéricas realizadas, los micro-defectos con las mayores diferencias de factor de forma se han registrado en las probetas procedentes del alambroón inicial, alambre sin trefilar, con entalla de tipo C, gran radio de curvatura, probetas las cuales son capaces de asumir grandes deformaciones antes de la fractura final de las mismas.

Los micro-defectos con mayor influencia en cuanto a cambios tenso-deformacionales en comparación con la celda origen son los generados por las inclusiones de tipo duro, en los cuales la inclusión ejerce una mayor resistencia a la deformación, al igual que ocurría en las modelizaciones numéricas de micro-defectos inmersos en las probetas prismáticas entalladas sometidas a ensayos de fractura bajo sollicitación de tracción. Las mayores variaciones de tensiones analizadas, tensión hidrostática σ y tensión equivalente σ_{eq} , se producen en los micro-defectos generados por inclusiones de tipo duro en las probetas mecanizadas a partir de alambre de pretensado, último paso del proceso de trefilado, y dentro de éstas los mayores cambios se han obtenido en las PA7, las cuales poseen un radio de curvatura menor.

4. MECANISMOS DE FRACTURA Y FRACTURA ANISÓTROPA

Para las probetas prismáticas y axisimétricas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción la ZPF se sitúa en las probetas con grandes radios de curvatura en la parte central de la superficie de fractura. Por el contrario en las probetas sometidas a ensayos bajo sollicitación de tracción con entallas de gran radio de curvatura la ZPF se ha presentado en el centro de la superficie de fractura de éstas, salvo en las probetas 7D en las cuales se sitúa en el centro de

las mimas debido a su gran superficie neta. Las probetas procedentes de los alambres de trefilado han presentado un mecanismo de fractura independiente del tipo de entalla en el cual la fractura comienza en los fondos de entalla y progresa al resto de la superficie de fractura. Esta excepcionalidad es debida a la gran reordenación microestructural que ha sufrido el alambre de pretensado por haber sido sometido a una gran deformación plástica durante el proceso de trefilado generando que dicho material se comporte de manera más anisótropa.

Otra de las excepcionalidades en los mecanismos de fractura de las probetas sometidas bajo sollicitación de tracción se han presentado en las probetas axisimétricas 0B, en las cuales no se diferencia una ZPF como tal y la fractura tienen su origen en puntos de disparo por clivajes debido a la gran profundidad de este tipo de entallas.

En las probetas prismáticas sometidas a sollicitaciones de flexión por cuatro puntos, como cabría esperar, la ZPF está situada en las zonas próximas a los fondos de entalla. En las probetas con pequeños radios de curvaturas de las entallas dichas zonas ZPF se sitúan en los fondos de entalla en todos los tipos de ensayos.

La fractura localmente anisótropa se ha obtenido en las probetas ensayadas mecanizadas a partir de alambres fuertemente trefilados, hecho que indica la condición necesaria de una reordenación microestructural del acero perlítico como la acaecida en el proceso de trefilado. Además este tipo de fractura se acentúa al introducir entallas de menor radio de curvatura, las cuales generan un mayor estreñimiento en el material.

En las observaciones micrográficas de los ensayos abortados pertenecientes a las probetas de menor radio de curvatura procedentes de alambres fuertemente trefilados, las cuales han mostrado fractura localmente anisótropa pronunciada, se muestra como el camino de fractura progresa mayoritariamente a través de los bordes de las colonias de perlita. Este hecho es debido a la falta de micro-defectos en el interior de las colonias, los cuales se producen cuanto mayor es la deformación plástica soportada, y como consecuencia la fractura no progresa a través de éstas.

En conclusión la reordenación microestructural del acero perlítico producida durante el proceso de trefilado es clave para que se produzca el comportamiento localmente anisótropo, ésta acompañada por grandes estreñimientos del material, menor radio de curvatura de entalla, hacen que dicha fractura se potencie y progrese mayoritariamente a través de los bordes de las colonias perlíticas.

Todos los micro-defectos intracoloniales analizados no favorecen el comportamiento localmente anisótropo, mientras los micro-defectos intercoloniales, destacando los generados por las inclusiones de tipo duro, por la variación tensional que ocasionan, potencian dicho comportamiento, no siendo los causantes del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, C.W., DE MARE, J., ROOTZÉN, H. (2005)

Methods for estimating the sizes of large inclusions in clean steels.

Acta Materialia **53**, 2295–2304.

ATKISON, H.V., SHI, G. (2003)

Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods.

Progress in Materials Science **48**, 457–520.

AYASO, F.J. (2001)

Fractura de alambres entallados de acero eutectoide progresivamente trefilado.

Tesis Doctoral, Universidad de La Coruña.

AYASO, F. J., FERNÁNDEZ-VIÑA, J., TORIBIO, J. (2010)

Fractura anisótropa de alambres de pretensado comercial sometidos a ensayos de corrosión bajo tensión.

Anales de Mecánica de la Fractura **27**, 467-472.

AYASO, F.J., GÓNZALEZ, B., MATOS, J.C., VERGARA, D., LORENZO, M., TORIBIO, J. (2005)

Análisis fractográfico cuantitativo del comportamiento en fractura de aceros perlíticos progresivamente trefilados.

Anales de Mecánica de la Fractura **22**, 128-133.

AYASO, F.J., GÓNZALEZ, B., TORIBIO, J. (2006)

Deflexión el camino de fractura anisótropo por delaminación en aceros de pretensado comerciales.

Anales de Mecánica de la Fractura **23**, 447-452.

AYASO, F.J., TORIBIO, J. (2002)

Micromecanismos e fractura en aceros perlíticos progresivamente trefilados.

Anales de Mecánica de la Fractura **9**, 141-146.

AYASO, F.J., TORIBIO, J. (2003)

Anisotropic fracture behavior of progressively drawn pearlitic steels.

Anales de Mecánica de la Fractura **20**, 261-266.

AYASO, F.J., TORIBIO, J. (2005)

Tensión anular de clivaje necesaria para la deflexión del camino de fractura en aceros perlíticos trefilados.

Anales de Mecánica de la Fractura **22**, 197-202.

BAE, C.M., NAM, W.J., LEE, C.S. (1996)

Effect of interlamellar spacing of the delamination of pearlitic steel wires

Scripta Materialia **35**, 641-644.

BARNBY, J T., PEACE, F. M., (1971)

The effect of carbides on the high strain fatigue resistance of an austenitic steel.

Acta Metallurgica **19**, 1351-1357.

BATTEZATTI, L., BARICCO, M., CURIOTTO, S. (2005)

Non-Stoichiometric cementite by rapid solidification of cast iron.

Acta Materialia **53**, 1848-1856.

BERGENGREN, Y., LORSSON, M., MELONDER, A. (1995)

The influencia of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardene springs steel.

Fatigue and Fracture Engineering Mateials and structures **18**, 1071-1087.

BLAIS, C., L'ESPCRANC, G., LEHUY, H., FORGET, C. (1997)

Development of an integrated method for fully characterizing multiphase inclusions and its application to calcium-treated steels.

Materials Characterizacion **38**, 25-37.

BYUN, J.M., SHIM, J.H., CHO, J.W., LEE, D.N. (2003)

Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn steel.

Acta Materialia **51**, 1593-1606.

CALLISTER, W.C. (1995)

Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales.

Reverté, Barcelona.

CARPENTER, C. H., ROBERTSON, J. M. (1932)

The austenite-pearlitic inversion.

Journal Iron Steel Institute. **25**, 309-328.

CHAPETTI, M. D., TAGAWA, T., MIYATA, T. (2003)

Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels part II: estimation of fatigue limit for failure from internal inclusions.

Materials Science and Engineering **A356**, 236-244.

CHEN, Q., SHAO, E., ZHAO, D., GUO, J. FAN, Z.(1991)

Measurement of the critical size of inclusions initiatin contact fatigue cracks and its application in bearing steel.

Wear **147**, 285-294.

COLLINS, S.R., MICHAL, G.M. (1995)

Inclusion engineering for improved fatigue response in forged AISI 4140 steel.

Conf. High Performance Structural Steels, Cleveland, OH, USA, 269-280.

DANOIX, F., JULIEN, D., SAUVAJE, X., COPREAUX, J. (1998)

Direct evidence of cementite dissolution drawn pearlitic steels observed by tomographic atom probe.

Materials Science and Engineering **250**, 8-13.

DAVIDKOV, N., SPIRIDONOVA, N. (1946)

Analysis of the state of stress in the neck of a tension test specimen.

Proceeding of American Society of Testing Materials **46**, 1147-1158.

DE BRITO, J. I., GROWE, G. W. (1980)

An examination of the structure and properties of drawn high-carbon steel wires.

Journal of Mechanical Working Technology **4**, 249-262

DOLLAR, M., BERNSTEIN, I. M., THOMPSON, A. W. (1988)

Influence of deformation substructure on flow and fracture of fully pearlitic steel.

Acta Metallurgica **36**, 311-320,

EID, N.M., THOMASOM, P.F. (1979)

The nucleation of fatigue cracks in a low-alloy steel under high-cycle fatigue conditions and uniaxial loading.

Acta Metallurgica **27**, 1239-1249.

EMBURY, J. D., FISHER, R. M. (1966)

The structure and properties of drawn pearlite.

Acta Metallurgica **14**, 147-159.

GAVRILJUK, V.G. (2002)

Coment on cementite descomposition in heavily pearlite steel wire.

Scripta Materialia **46**, 175-177.

GAVRILJUK, V.G. (2003)

Descomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation.

Materials Science and Engineering **345**, 81-89.

GIL SEVILLANO, J., AERNOUDT, E. (1987)

Low energy dislocation structures in highly deformed materials.

Materials Science and Engineering **86**, 35-51.

GÓNZALEZ, B. (2007)

Influencia del proceso de fabricación en el comportamiento plástico y en fractura de aceros de pretensado.

Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca.

GONZÁLEZ, B., MATOS, J.C., KHARIN, V., TORIBIO, J. (2006)

Microdaño por indentación aguda vickers en acero eutectoide progresivamente trefilado.

Anales de mecánica de fractura **23**, 85-90.

HU, X., WILKINSON, D., MUKESH, J., MISHRA, R. (2009)

The influence of particle shape, volume fraction and distribution on post-necking deformation and fracture in uniaxial tension of AA5754 sheet materials.

International Journal of Solids and Structures **46**, 2650–2658.

HULL, D., CLYNE, T. W. (1996)

An Introduction to Composite Materials.

Cambridge University Press, 133-157.

HYZAK Y BERNSTEIN, 1976)

The role of microstructure on the strength and toughness of fully pearlitic steels.

Metallurgical Transactions **7A**, 1217-1224.

KANG, S.K., GOW, K.V. (1978)

An improved metallographic technique for the study of nonmetallic Inclusions in Steel.

Metallography **11**, 219-222.

KANG, Y. B., KIM, H.S., ZHANG, J., LEE., H.E. (2005)

Practical application of thermodynamics to inclusions engineering in steel.

Journal of Physics and Chemistry of Solids **66**, 219-225.

KAVISHE, F. P. L., BAKER, T. J. (1986)

Effects of prior austenite grain size and pearlite inter-lamellar spacing on the strength and fracture toughness of a eutectoid rail steel.

Materials Science and Technology **2**, 816–822.

KHALIFA, T.A. (1988)

Effect of inclusions on the fatigue limit of a heat-treated carbon steel.

Materials Science and Engineering A **102**, 175-180.

KIM, T. S., KUWAMURA, H., KIM, S., LEE, Y., CHO, T. (2009)

Investigation on ultimate strength of thin-walled steel single shear bolted connections with two bolts using finite element analysis.

Thin-walled Structures **47**, 1191-1202.

LANGFORD, G. (1977)

Deformation of pearlite.

Metallurgical Transactions. **8A**, 861-875.

LANGUILLAUME, J., KAPELSKI, G., BAUDELET, B. (1997)

Cementite dissolution in heavily cold drawn pearlitic steel wires.

Acta Materialia **45**, 1210-1212.

LIU, C.D., BASSIM, M.N., LAWRENCE, S. (1993)

Evaluation of fatigue-crack initiation at inclusions in fully pearlitic steels.

Materials Science and Engineering A **167**, 107-113.

LORENZO, M. A. (2009)

Influencia de las tensiones y deformaciones residuales en la fragilización por hidrógeno de acero eutectoide trefilado.

Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca.

LUO, C., SÄHLBERG, U., (2001)

Deformation of inclusion during hot rolling of steel.

Journal of materials processing technology **114**, 87-99.

MAINY, D. (1996)

Morphological and analytical characterization of inclusions: relation with processing parameters and properties of use.

Materials Characterization **36**, 321-326.

MEURLING, F., MELANDER, A., TIDESTEN, M., WESTIN, L. (2001)

Influence of carbide and inclusion contents on the fatigue properties of high speed steels and tool steels.

International Journal of Fatigue **23**, 215-224.

MILLER, L.M., SMITH, G.C. (1970)

Tensile fracture in carbon steel.

Journal of the Iron and Steel Institute **208**, 998-1005.

NAM, W.J., BAE, C.M. (1995)

Void initiation and microstructural changes during wire drawing of pearlitic steels.

Materials Science and Engineering **203**, 278-285.

NAM, W.J., BAE, C.M., LEE, C. S. (1996)

Effect of interlamellar spacing on the delamination pearlitic steel wires.

Scripta Materialia **35**, 641-646.

NAM, W.J., BAE, C.M., OH, S.J., KWON, S.J. (2000)

Effect on interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires.

Scripta Materialia **42**, 457-463.

NIECHAJOWICZ, A., TOBOTA, A. (2000)

Warm deformation of carbon steel.

Journal of Materials Processing Technology **106**, 123-130.

OCENÁSEK, J., RODRÍGUEZ, M., WEYGAND, D. M., RIEDEL, H. (2007)

Multi-grain finite element model for studying the wire drawing process.

Computational Materials Science **39**, 23-28.

OHKI, T., YAGUCHI, H., MAKI, K., MINAMIDA, T., IBARAKI, N., NASU, S. (1997)

Change in the form of cementite in high carbon steel wires.

Acta Materialia ,147 150.

OVEJERO, E. (1998)

Fractura en ambiente agresivo de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado.

Tesis doctoral. Universidad de La Coruña.

PAN, T., YANG, Z.G., ZHANG, G., BAI, B.Z., FANG, H.S. (2006)

Kinetics and mechanisms of intragranular ferrite nucleation on non-metallic inclusions in low carbon steels.

Materials Science and Engineering A **438–440**, 1128–1132.

PORTER, D.A., EASTERLING, K.E. (1978)

Dynamic studies of the tensile deformation and fracture of pearlite.

Acta Metallurgica **26**, 405-422.

RIDLEY, N. (1984)

A review of the data on the interlamellar spacing of pearlite.

Metallurgical Transactions **15A**, 1019-1036.

RODRÍGUEZ, R. (2008)

Análisis del micro-daño y de la presencia de inclusiones en aceros progresivamente trefilados.

Grado de Salamanca, Universidad de Salamanca.

SHIM, J.H., OH, Y.J., SUH, J.Y., CHO, Y.W., SHIM, J.D., BYUM, J.S., LEE, D.N. (2001)

Ferrite nucleation potency of non-metallic inclusion in medium carbon steels.

Acta Materialia **49**, 2115–2122.

SORBY, H. C. (1886)

On the application of very high powers to the study of microscopical structure of steel.

Journal Iron and Steel Inst. **1**, 140-144.

TODELANO, M. (1998)

Fátiga y fractura de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado.

Tesis Doctoral. Universidad de A Coruña.

TORIBIO, J.(2002)

A fracture criterion for high-strength steel cracked wires.

Structural Engineering and Mechanics **14**, 209-221.

TORIBIO, J., AYASO, F.J. (1999)

Exfoliation fracture mode in heavily drawn pearlitic steels.

Experimental Fracture Mechanics **15**, 441-446.

TORIBIO, J., AYASO, F.J., GÓNZALEZ, B., MATOS, J.C., VERGARA, D., LORENZO, M. (2006)

De las pseudocolonias perlíticas y de su papel como indicadores de rotura en aceros fuertemente trefilados.

INASMET **93**, 95-106.

- TORIBIO, J., OVEJERO, E. (1997)
Microstructure evolution in a pearlitic steel subjected to progressive plastic deformation.
Materials Science and Engineering **234-236**, 579-582.
- TORIBIO, J., OVEJERO, E. (1998a).
Effect of cold drawing on microstructure and corrosion performance of high-strength steel.
Mechanics of Time-Dependent Materials **1**, 307-319.
- TORIBIO, J., OVEJERO, E. (1998b)
Effect of cumulative cold drawing on the pearlite interlamellar spacing in eutectoid steel.
Scripta Materialia **39**, 323-328.
- TORIBIO, J., OVEJERO, E. (1998c)
Microstructure orientation in a pearlitic steel subjected to progressive plastic deformation.
Journal of Materials Science letters **17**, 1037-1040.
- TORIBIO, J., OVEJERO, E., AYASO, F. J., RODRÍGUEZ, R. (2008)
Identificación de nuevas unidades microestructurales en aceros eutectoides trefilados.
INASMET **95**, 1-12.
- TORIBIO, J., OVEJERO, E., TOLEDANO, M. (1997)
Microstructural bases of anisotropic fracture behavior of heavily drawn steel.
International Journal of Fatigue **234-236**, 579-582.
- UNDERWOOD, E.E. (1995)
Quantitative Metallography.
ASM Handbook (Vol 9: Metallography and Microstructural).
ASM Internationals, Materials Park, OH, 123-134.
- WETSCHER, F., STOCK, R., PIPPAN, R. (2007)
Changes in the mechanical properties of a pearlitic steel due to large shear deformation.
Materials Science and Engineering **A445-446**, 237-243.
- WILSON, A.D (1979)
The influence of thickness and rolling ratio on the inclusion behavior in plate steels.
Metallography **12**, 233-255.

YU, I., LOJKOWSKI, W., VALIEV, R. Z., FECHT, H. J. (2003)

The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion.

Acta Materialia **51**, 5555–5570.

ZELIN, M. (2002)

Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing.

Acta Materialia **50**, 4431-4442.

ZELIN, M. (2002)

Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing.

Acta Materialia **50**, 4431-4442.

ZHANG, J.M., LI, X.S., YANG, Z.G., LI, G.Y., HUI, W.J., WENG, Y.Q. (2006a)

Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime.

International Journal of Fatigue, **29**, 765–771.

ZHANG, J.M., ZHANG, J.F., YANG, Z.G., LI, G.Y., YAO, G., LIA, S.X., HUI, W.J. WENG, W.J. (2005)

Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel.

Materials Science and Engineering A **394**, 126–131.

ZHANG, J.M., ZHANG, J.F., YANG, Z.G., LI, G.Y., YAO, G., LIA, S.X., HUI, W.J. WENG, W.J. (2006b)

On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue.

Materials Science and Engineering A **427**, 167–174.

ANEXO I: MEDIDAS DE LAS PROBETAS

PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS

Probetas tipo PAA (unidades en mm)

PROBETA	CÓDIGO	B1	B2	C1	C2	R1	R2	F1	F2	B1-C1-C2	(B1-C1-C2)*B2	B1*B2	Excentricidad
EPAA0-1	A0-1	6.83	6.85	0.620	0.673	0.214	0.211	0.428	0.423	5.537	37.928	46.785	0.000
EPAA0-3	A0-2	6.80	6.79	0.611	0.594	0.203	0.205	0.406	0.410	5.595	37.990	46.172	0.055
EPAA0-5	A0-3	6.08	6.85	0.533	0.543	0.208	0.208	0.417	0.417	5.724	39.209	46.580	0.040
EPAA0-2	A0-4	6.83	6.84	0.600	0.612	0.220	0.223	0.441	0.447	5.618	38.427	46.717	0.045
EPAA0-4	A0-5	6.80	6.81	0.620	0.590	0.207	0.211	0.415	0.422	5.590	38.068	46.308	0.000
EPAA3-1	A3-1	5.12	5.12	0.370	0.466	0.146	0.166	0.292	0.332	4.284	21.934	26.214	0.040
EPAA3-2	A3-2	5.14	5.13	0.452	0.441	0.155	0.150	0.310	0.3	4.247	21.787	26.368	0.111
EPAA3-3	A3-3	5.13	5.12	0.434	0.444	0.165	0.153	0.331	0.306	4.252	21.770	26.266	0.033
EPAA3-5	A3-4	5.14	5.13	0.342	0.356	0.148	0.117	0.296	0.235	4.442	22.787	26.368	0.351
EPAA3-4	A3-5	5.13	5.13	0.458	0.426	0.147	0.133	0.294	0.266	4.246	21.782	26.317	0.131
EPAA4-1	A4-1	4.64	4.63	0.423	0.422	0.146	0.131	0.292	0.262	3.795	17.571	21.483	0.040
EPAA4-4	A4-2	4.67	4.68	0.419	0.435	0.135	0.142	0.270	0.285	3.816	17.859	21.856	0.073
EPAA4-3	A4-3	4.64	4.67	0.411	0.426	0.131	0.130	0.263	0.260	3.803	17.760	21.669	0.119
EPAA4-2	A4-4	4.65	4.68	0.425	0.425	0.131	0.135	0.262	0.271	3.800	17.784	21.762	0.042
EPAA4-5	A4-5	4.67	4.67	0.406	0.422	0.126	0.132	0.252	0.265	3.842	17.942	21.809	0.066
EPAA7-5	A7-1	3.18	3.18	0.235	0.227	0.091	0.088	0.183	0.177	2.718	8.643	10.112	0.039
EPAA7-4	A7-2	3.16	3.19	0.260	0.260	0.093	0.089	0.187	0.178	2.640	8.422	10.080	0.000
EPAA7-3	A7-3	3.18	3.16	0.284	0.308	0.096	0.084	0.192	0.169	2.588	8.178	10.049	0.000
EPAA7-2	A7-4	3.16	3.15	0.304	0.320	0.096	0.094	0.192	0.189	2.536	7.988	9.954	0.049
EPAA7-1	A7-5	3.16	3.18	0.306	0.260	0.099	0.096	0.198	0.192	2.594	8.249	10.049	0.031

Probetas tipo PCC (mm)

PROBETA	CÓDIGO	B1	B2	C1	C2	R1	R2	F1	F2	B1-C1-C2	(B1-C1-C2)*B2	B1*B2	Excentricidad
EPCC0-1	C0-1	6.80	6.84	0.574	0.572	2.684	2.513	3.318	3.192	5.654	38.673	46.512	0.050
EPCC0-2	C0-2	6.84	6.82	0.662	0.566	2.489	2.523	3.381	3.185	5.612	38.274	46.649	0.103
EPCC0-5	C0-3	6.85	6.84	0.575	0.618	2.526	2.666	3.209	3.414	5.657	38.694	46.854	0.131
EPCC0-4	C0-4	6.83	6.84	0.565	0.631	2.621	2.499	3.251	3.320	5.634	38.537	46.717	0.098
EPCC0-3	C0-5	6.85	6.86	0.620	0.631	2.520	2.479	3.311	3.305	5.599	38.409	46.991	0.029
EPCC3-1	C3-1	5.13	5.13	0.401	0.481	1.918	1.961	2.347	2.573	4.248	21.792	26.317	0.112
EPCC3-2	C3-2	5.14	5.15	0.462	0.408	1.891	1.867	2.477	2.330	4.270	21.991	26.471	0.139
EPCC3-4	C3-3	5.13	5.14	0.395	0.498	1.978	1.928	2.372	2.586	4.237	21.778	26.368	0.158
EPCC3-3	C3-4	5.14	5.14	0.431	0.498	1.924	1.886	2.427	2.554	4.211	21.645	26.420	0.058
EPCC3-5	C3-5	5.14	5.14	0.512	0.402	1.859	1.934	2.562	2.361	4.226	21.722	26.420	0.141
EPCC4-1	C4-1	4.68	4.68	0.375	0.390	1.725	1.777	2.148	2.222	3.915	18.322	21.902	0.063
EPCC4-2	C4-2	4.69	4.67	0.442	0.378	1.741	1.763	2.318	2.182	3.870	18.073	21.902	0.070
EPCC4-3	C4-3	4.67	4.66	0.378	0.437	1.722	1.621	2.153	2.214	3.855	17.964	21.762	0.085
EPCC4-5	C4-4	4.68	4.68	0.401	0.352	1.745	1.699	2.226	2.071	3.927	18.378	21.902	0.089
EPCC4-4	C4-5	4.69	4.68	0.426	0.381	1.679	1.676	2.235	2.128	3.883	18.172	21.949	0.115
EPCC7-1	C7-1	3.17	3.18	0.265	0.294	1.214	1.206	1.514	1.578	2.611	8.303	10.081	0.089
EPCC7-5	C7-2	3.16	3.18	0.232	0.272	1.250	1.208	1.451	1.527	2.656	8.446	10.049	0.056
EPCC7-3	C7-3	3.16	3.18	0.277	0.252	1.207	1.129	1.539	1.422	2.631	8.367	10.049	0.080
EPCC7-4	C7-4	3.17	3.17	0.283	0.247	1.159	1.155	1.518	1.428	2.640	8.369	10.049	0.029
EPCC7-2	C7-5	3.16	3.16	0.295	0.282	1.138	1.153	1.529	1.511	2.583	8.162	9.986	0.080

PROBETAS AXISIMÉTRICAS ENTALLADAS

Probetas tipo A (mm)

PROBETA	F	C	R	D (Diámetro ligamento)	D (total)
0A-1	0.698	1.104	0.349	8.688	10.895
0A-2	0.668	1.121	0.334	8.762	11.044
0A-3	0.667	1.126	0.333	8.802	11.020
0A-4	0.698	1.143	0.349	8.777	11.055
0A-5	0.701	1.068	0.350	8.773	10.915
4A-1	0.477	0.730	0.238	6.057	7.509
4A-2	0.437	0.725	0.218	6.064	7.489
4A-3	0.446	0.688	0.223	6.173	7.511
4A-4	0.450	0.665	0.225	6.138	7.471
4A-5	0.432	0.663	0.216	6.177	7.498
7A-1	0.315	0.506	0.157	4.021	5.050
7A-2	0.323	0.500	0.161	4.057	5.040
7A-3	0.301	0.510	0.150	4.079	5.049
7A-4	0.303	0.515	0.151	4.067	5.057
7A-5	0.310	0.480	0.155	4.072	5.056

Probetas tipo B (mm)

PROBETA	F	C	R	D (Diámetro ligamento)	D (total)
0B-1	1.145	3.295	0.572	4.457	10.917
0B-2	1.125	3.267	0.562	4.628	11.085
0B-3	1.122	3.203	0.561	4.558	10.998
0B-4	1.141	3.145	0.570	4.575	11.029
0B-5	1.145	3.017	0.572	5.060	11.054
4B-1	0.743	2.220	0.371	3.031	7.482
4B-2	0.747	2.210	0.373	3.032	7.450
4B-3	0.743	2.207	0.371	3.029	7.461
4B-4	0.757	2.209	0.378	3.044	7.483
4B-5	0.772	2.228	0.386	3.051	7.491
7B-1	0.511	1.513	0.255	2.061	5.050
7B-2	0.513	1.499	0.256	2.016	5.031
7B-3	0.513	1.495	0.256	2.056	5.058
7B-4	0.522	1.491	0.261	2.069	5.041
7B-5	0.533	1.486	0.266	2.051	5.044

Probetas tipo C (mm)

PROBETA	F	C	R	D (Diámetro ligamento)	D (total)
0C-1	6.277	1.097	5.038	8.809	11.028
0C-2	6.169	1.119	4.811	8.821	11.053
0C-3	6.267	1.123	4.933	8.816	11.048
0C-4	6.187	1.145	4.751	8.791	11.052
0C-5	6.314	1.150	4.908	8.772	11.086
4C-1	4.225	0.799	3.192	5.888	7.467
4C-2	4.161	0.807	3.085	5.876	7.471
4C-3	4.156	0.823	3.035	5.833	7.456
4C-4	4.217	0.834	3.082	5.791	7.481
4C-5	4.280	0.861	3.090	5.720	7.473
7C-1	2.675	0.511	2.006	3.995	5.045
7C-2	2.821	0.550	2.084	3.910	5.053
7C-3	2.826	0.570	2.037	3.890	5.047
7C-4	2.857	0.590	2.024	3.854	5.033
7C-5	2.855	0.602	1.993	3.874	5.044

Probetas tipo D (mm)

PROBETA	F	C	R	D (Diámetro ligamento)	D (total)
0D-1	8.714	3.303	4.525	4.436	11.061
0D-2	8.705	3.332	4.509	4.397	11.048
0D-3	8.757	3.335	4.542	4.375	11.021
0D-4	8.777	3.338	4.554	4.367	11.060
0D-5	8.755	3.325	4.544	4.385	11.013
4D-1	6.128	2.299	3.191	2.772	7.422
4D-2	6.045	2.303	3.135	2.793	7.403
4D-3	6.094	2.320	3.161	2.787	7.417
4D-4	6.118	2.333	3.172	2.785	7.437
4D-5	6.142	2.353	3.180	2.735	7.412
7D-1	3.901	1.510	2.015	1.965	5.027
7D-2	3.924	1.517	2.027	1.977	5.015
7D-3	3.892	1.492	2.015	1.983	5.013
7D-4	3.912	1.485	2.031	1.969	5.023
7D-5	3.901	1.520	2.011	1.985	5.030

PROBETAS PRISMÁTICAS ENTALLADAS

Probetas tipo PA (unidades en mm)

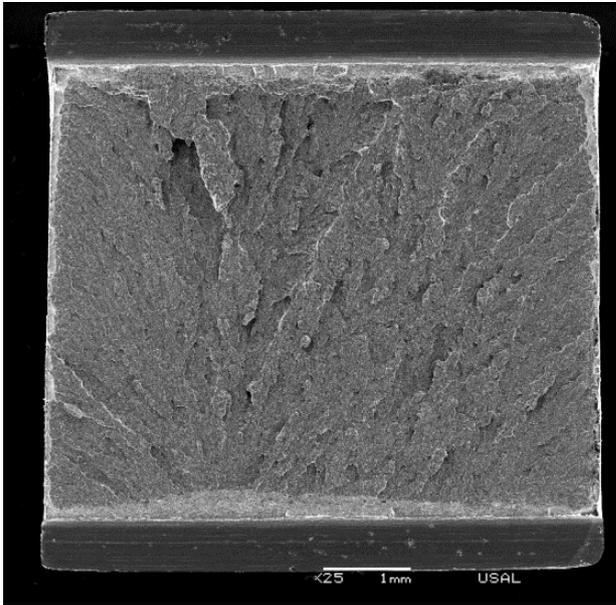
PROBETA	CÓDIGO	B	W	C	R	F	W-C	(W-C)*B	B*W
EPA0-1	A0-1	4.120	8.140	1.615	0.563	1.127	6.525	26.883	33.537
EPA0-2	A0-2	4.109	8.221	1.576	0.528	1.056	6.645	27.304	33.780
EPA0-3	A0-3	4.095	8.173	1.570	0.569	1.139	6.603	27.039	33.468
EPA0-4	A0-4	4.076	8.217	1.634	0.539	1.078	6.583	26.832	33.492
EPA0-5	A0-5	4.068	8.246	1.604	0.537	1.075	6.642	27.019	33.545
EPA0-6	A0-6	4.066	8.206	1.606	0.550	1.101	6.600	26.836	33.366
EPA3-1	A3-1	3.070	6.152	1.239	0.424	0.848	4.913	15.083	18.887
EPA3-2	A3-2	3.036	6.142	1.228	0.426	0.852	4.914	14.919	18.647
EPA3-3	A3-3	3.032	6.074	1.253	0.432	0.864	4.821	14.617	18.416
EPA3-4	A3-4	3.048	6.155	1.250	0.440	0.881	4.905	14.950	18.760
EPA3-5	A3-5	3.031	6.175	1.269	0.418	0.836	4.906	14.870	18.716
EPA3-6	A3-6	3.001	6.111	1.229	0.433	0.867	4.882	14.651	18.339
EPA4-1	A4-1	2,820	5,585	1,096	0,381	0,763	4,489	12,659	15,750
EPA4-2	A4-2	2,776	5,637	1,099	0,392	0,785	4,538	12,597	15,648
EPA4-3	A4-3	2,758	5,617	1,120	0,391	0,783	4,497	12,403	15,492
EPA4-4	A4-4	2,754	5,589	1,080	0,391	0,782	4,509	12,418	15,391
EPA4-5	A4-5	2,757	5,589	1,158	0,388	0,776	4,431	12,216	15,409
EPA4-6	A4-6	2,747	5,568	1,128	0,385	0,771	4,440	12,197	15,295
EPA7-1	A7-1	1,887	3,770	0,774	0,270	0,541	2,996	5,653	7,114
EPA7-2	A7-2	1,873	3,781	0,812	0,257	0,514	2,969	5,561	7,082
EPA7-3	A7-3	1,870	3,795	0,781	0,254	0,508	3,014	5,636	7,097
EPA7-4	A7-4	1,871	3,749	0,774	0,265	0,530	2,975	5,566	7,014
EPA7-5	A7-5	1,853	3,764	0,785	0,256	0,512	2,979	5,520	6,975
EPA7-6	A7-6	1,869	3,790	0,793	0,260	0,521	2,997	5,601	7,083

Probetas tipo PC (unidades en mm)

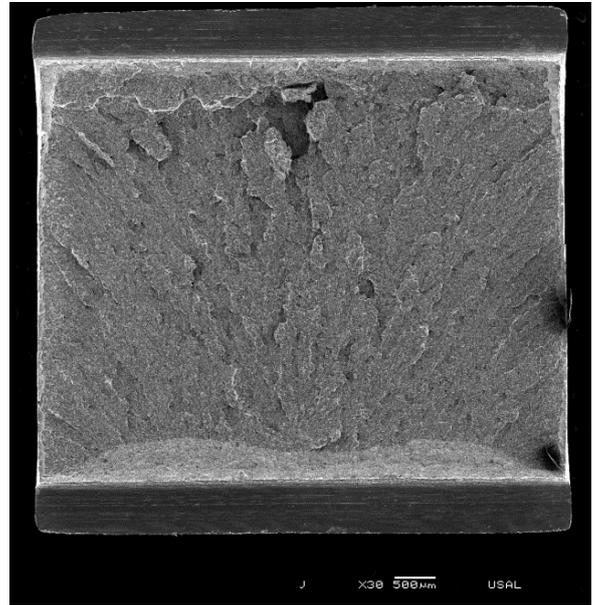
PROBETA	CÓDIGO	B	W	C1	R1	F1	W-C1	(W-C1)*B	B*W
EPC0-1	C0-1	4.119	8.244	1.519	5.947	7.940	6.725	27.700	33.957
EPC0-2	C0-2	4.086	8.222	1.495	6.202	8.077	6.727	27.486	33.595
EPC0-3	C0-3	4.087	8.207	1.482	6.538	8.290	6.725	27.485	33.542
EPC0-4	C0-4	4.122	8.184	1.498	6.088	7.999	6.686	27.559	33.734
EPC0-5	C0-5	4.084	8.196	1.470	6.119	7.957	6.726	27.469	33.472
EPC0-6	C0-6	4.067	8.201	1.462	6.236	8.024	6.739	27.407	33.353
EPC3-1	C3-1	3.036	6.156	1.135	4.419	5.914	5.021	15.244	18.689
EPC3-2	C3-2	3.036	6.156	1.116	4.542	5.964	5.040	15.301	18.689
EPC3-3	C3-3	3.053	6.141	1.107	4.436	5.864	5.034	15.369	18.749
EPC3-4	C3-4	3.024	6.164	1.100	4.615	5.981	5.064	15.313	18.639
EPC3-5	C3-5	3.023	6.174	1.143	4.482	5.980	5.031	15.209	18.664
EPC3-6	C3-6	3.041	6.135	1.092	4.471	5.856	5.043	15.336	18.656
EPC4-1	C4-1	2.794	5.610	1.068	4.211	5.605	4.542	12.690	15.674
EPC4-2	C4-2	2.786	5.587	1.145	4.022	5.621	4.442	12.375	15.565
EPC4-3	C4-3	2.782	5.566	1.070	4.078	5.507	4.496	12.508	15.485
EPC4-4	C4-4	2.783	5.637	1.143	3.894	5.512	4.494	12.507	15.688
EPC4-5	C4-5	2.742	5.617	1.086	4.096	5.556	4.531	12.424	15.402
EPC4-6	C4-6	2.766	5.586	1.064	4.223	5.605	4.522	12.508	15.451
EPC7-1	C7-1	1.848	3.761	0.691	2.777	3.666	3.070	5.673	6.950
EPC7-2	C7-2	1.880	3.761	0.734	2.727	3.723	3.027	5.691	7.070
EPC7-3	C7-3	1.876	3.777	0.734	2.769	3.756	3.043	5.709	7.086
EPC7-4	C7-4	1.876	3.747	0.736	2.766	3.758	3.011	5.649	7.029
EPC7-5	C7-5	1.872	3.744	0.738	2.717	3.723	3.006	5.627	7.009
EPC7-6	C7-6	1.887	3.774	0.760	2.666	3.728	3.014	5.687	7.125

ANEXO II: FRACTOGRAFÍAS

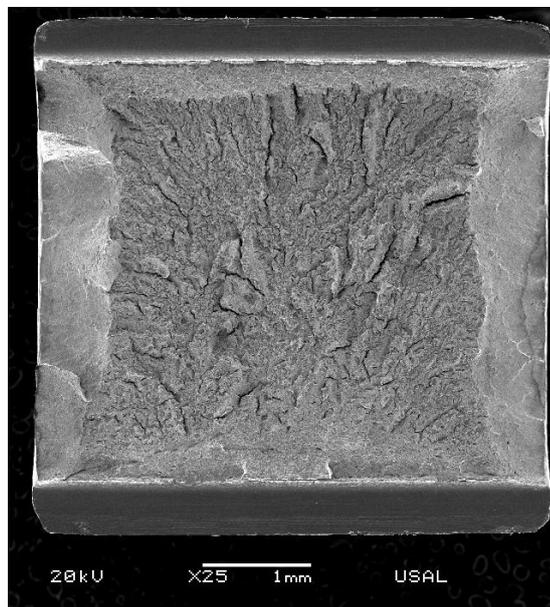
PAA0-1



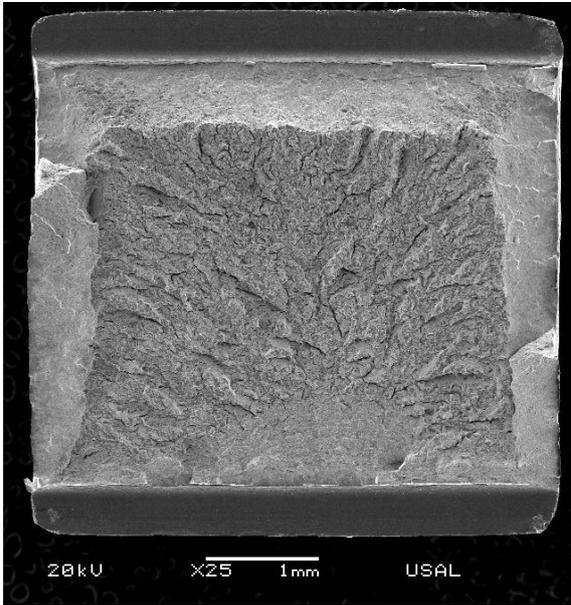
PAA0-2



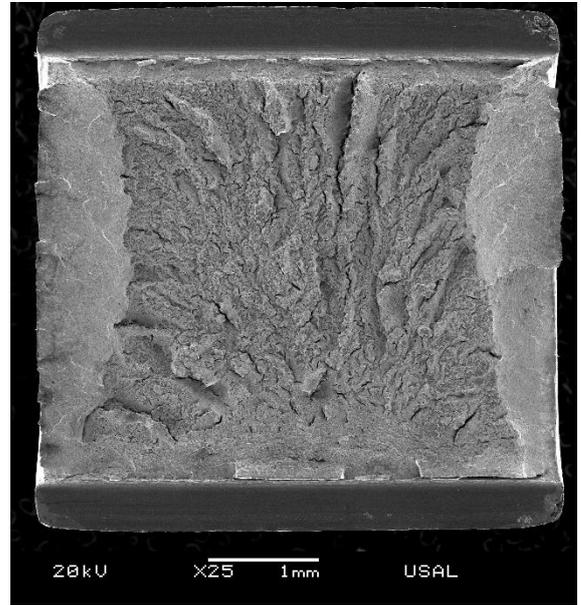
PAA0-3



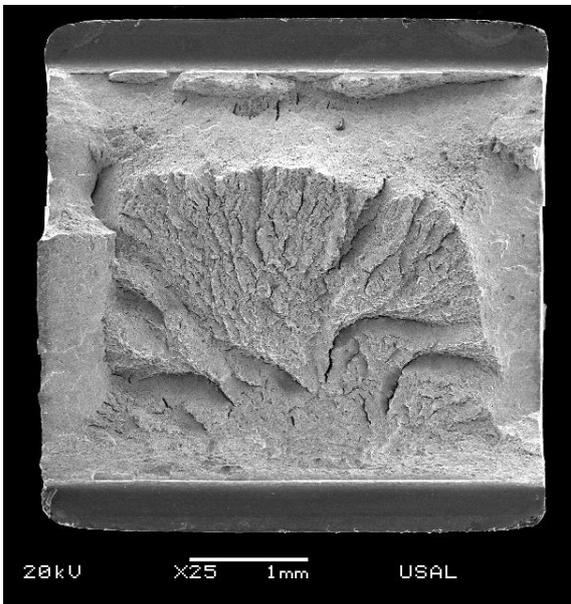
PAA3-2



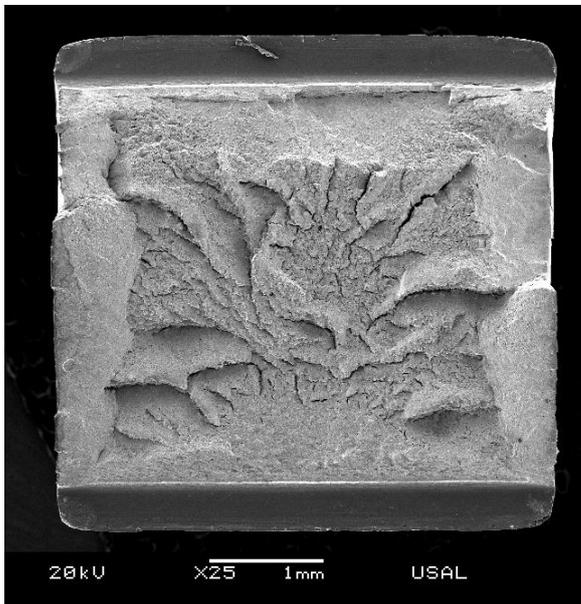
PAA3-2



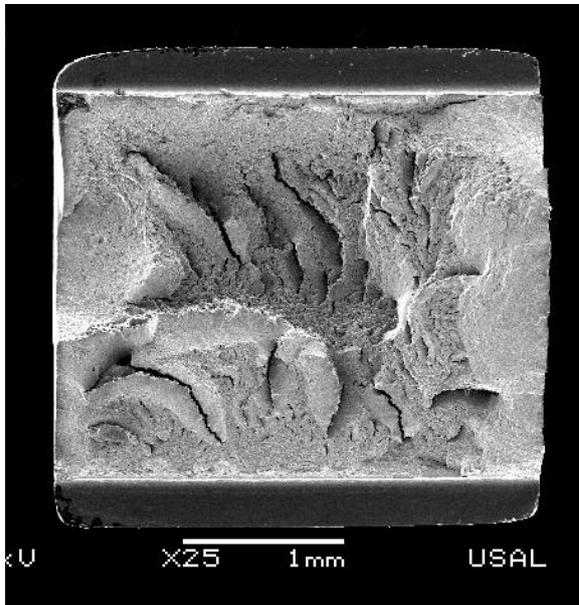
PAA4-1



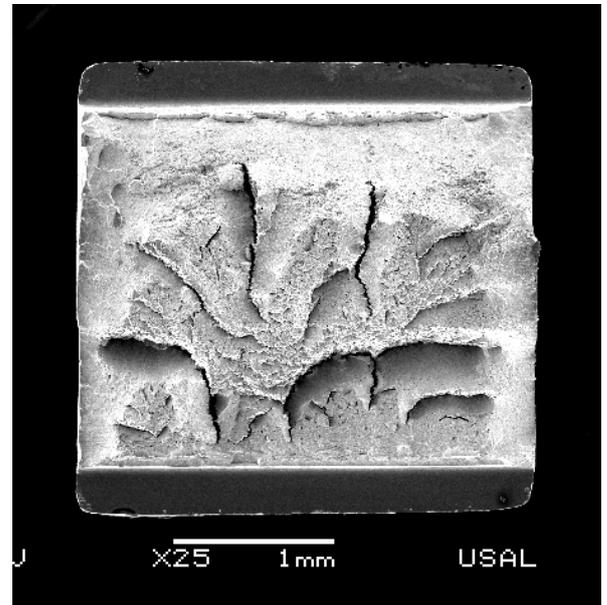
PAA4-2



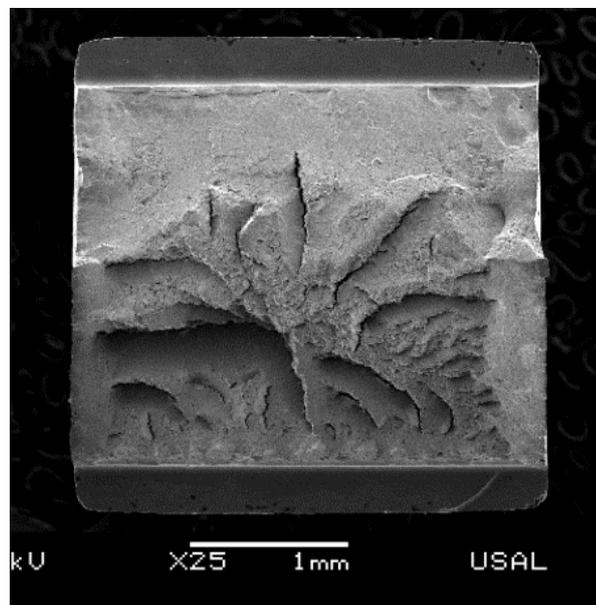
PAA7-1



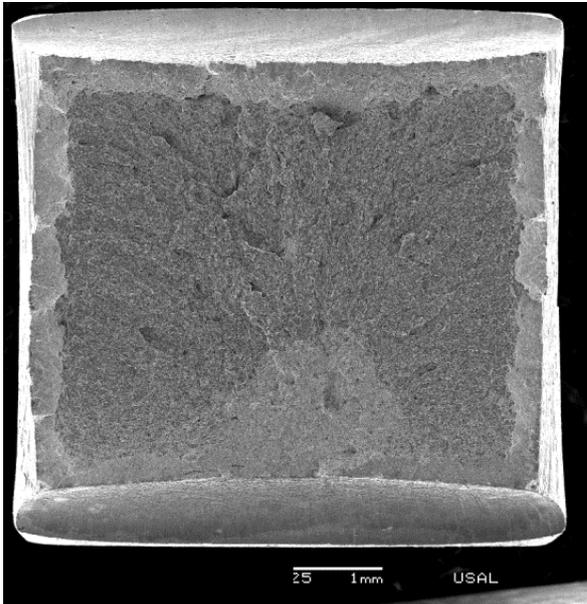
PAA7-2



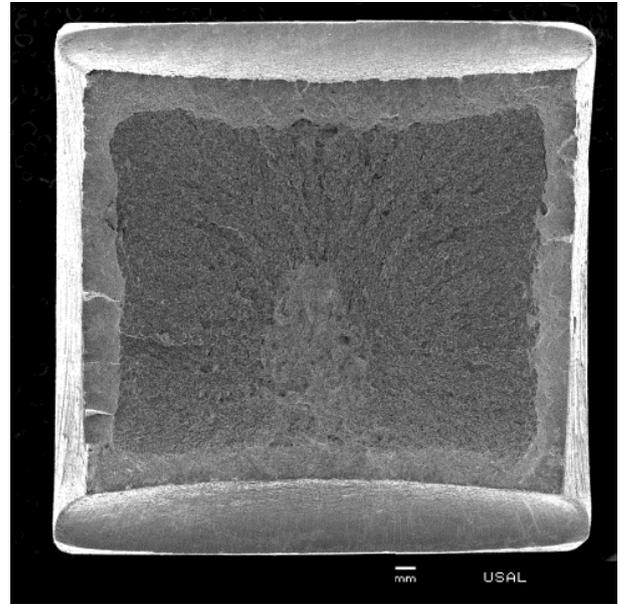
PAA7-3



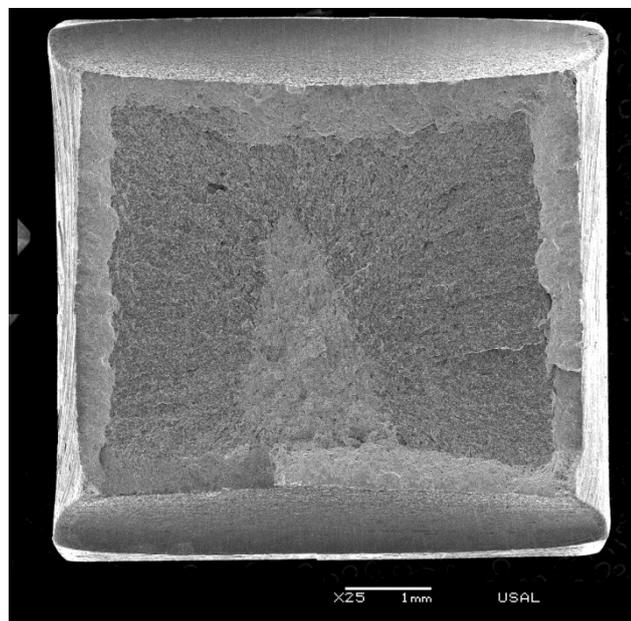
PCC0-1



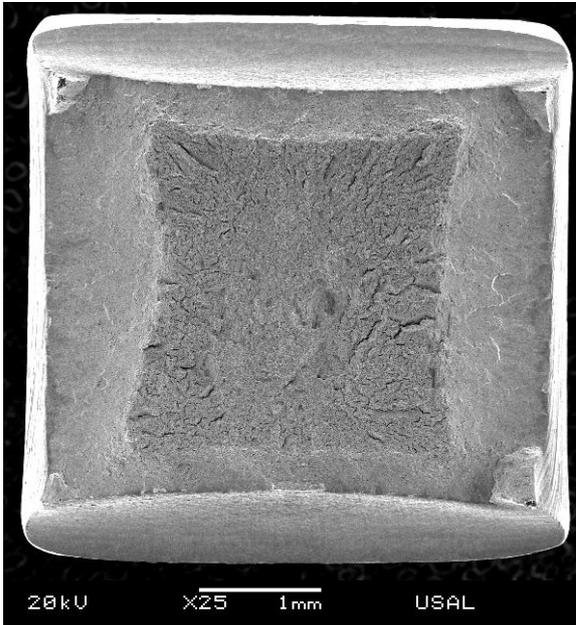
PCC0-2



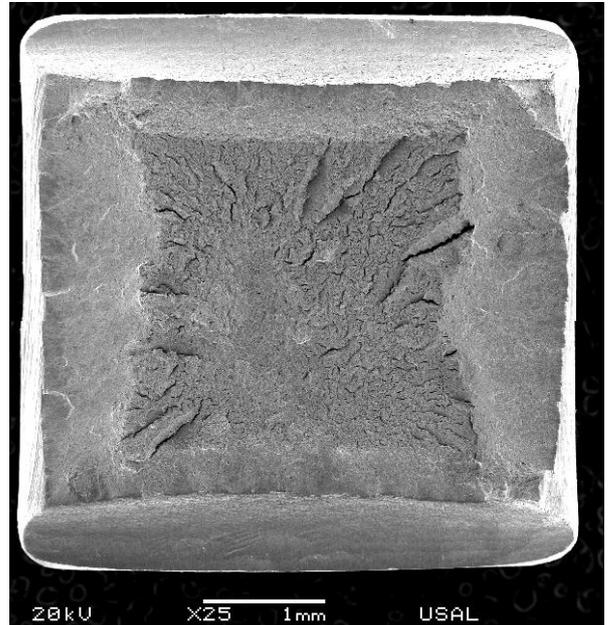
PCC0-3



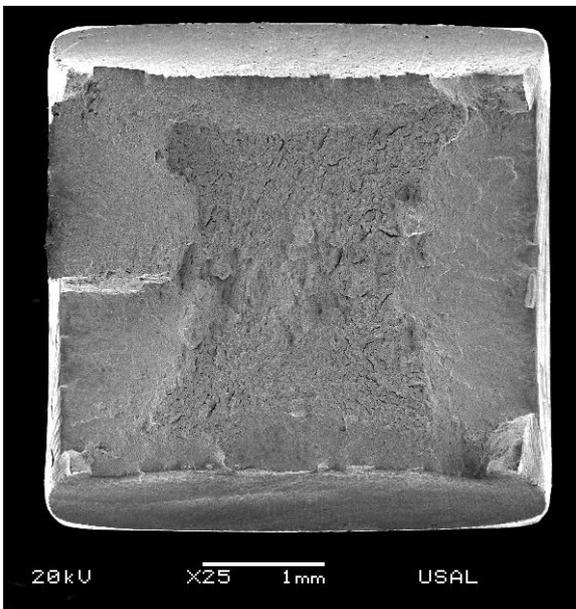
PCC3-1



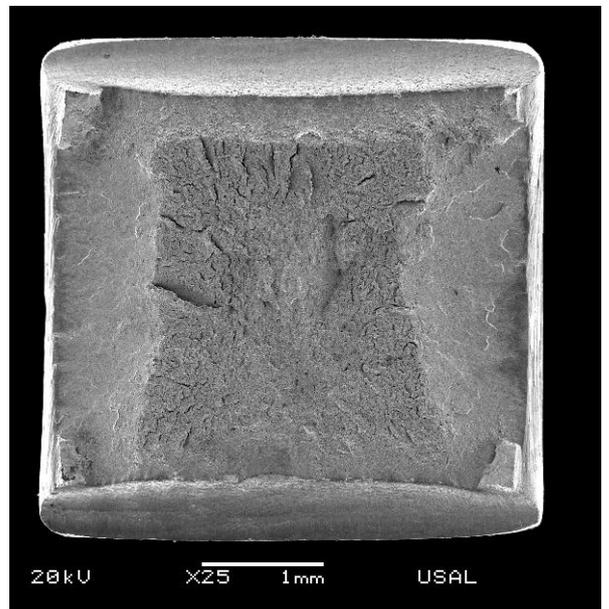
PCC3-2



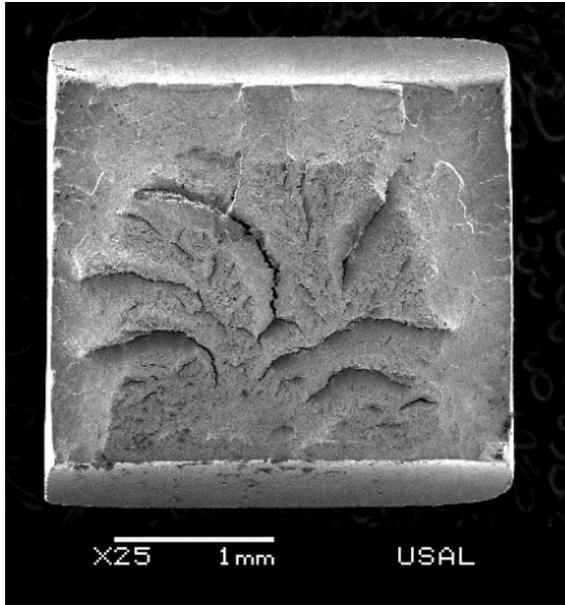
PCC4-1



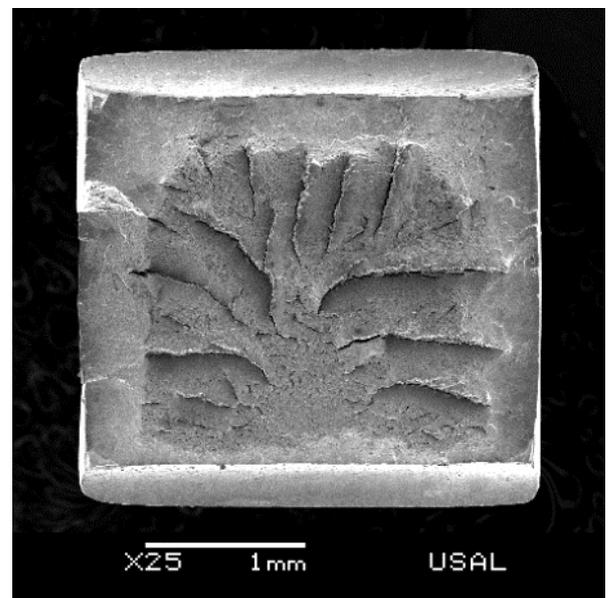
PCC4-2



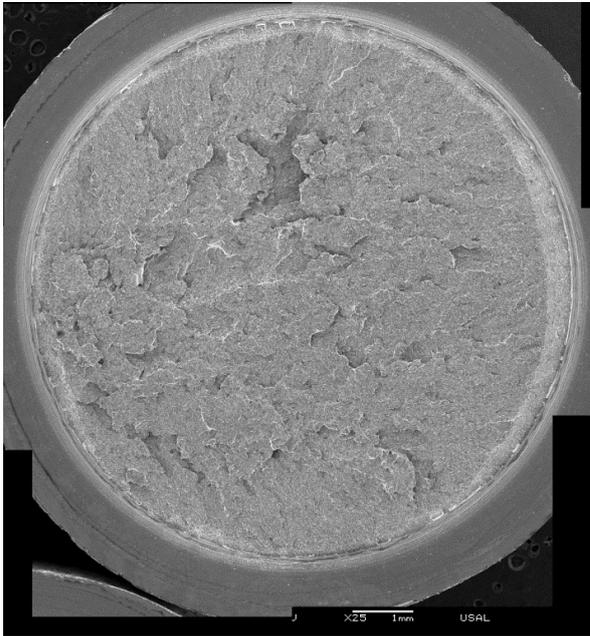
PCC7-1



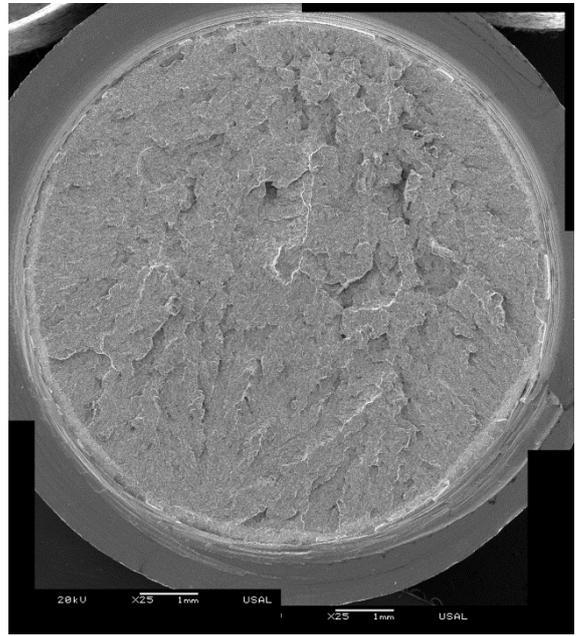
PCC7-2



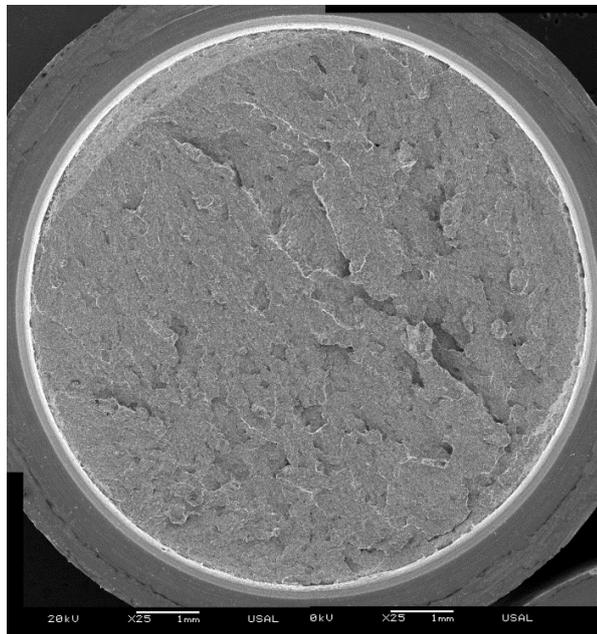
0A-1



0A-2



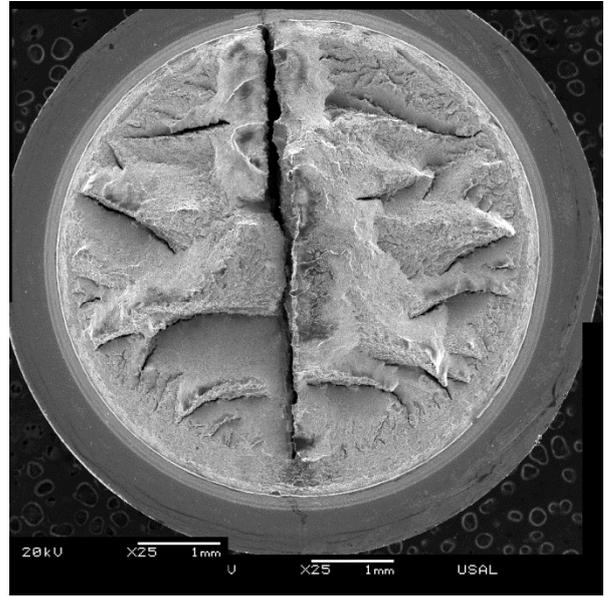
0A-3



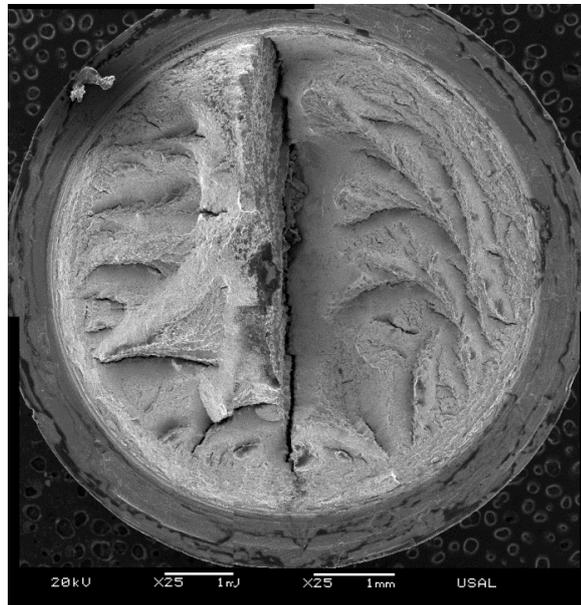
4A-1



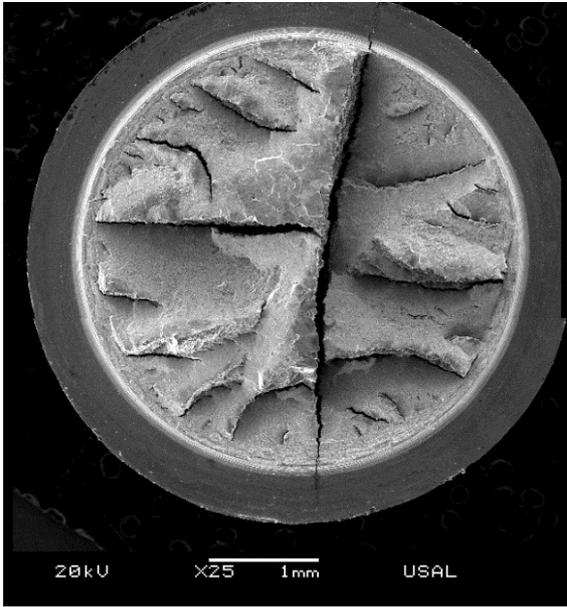
4A-2



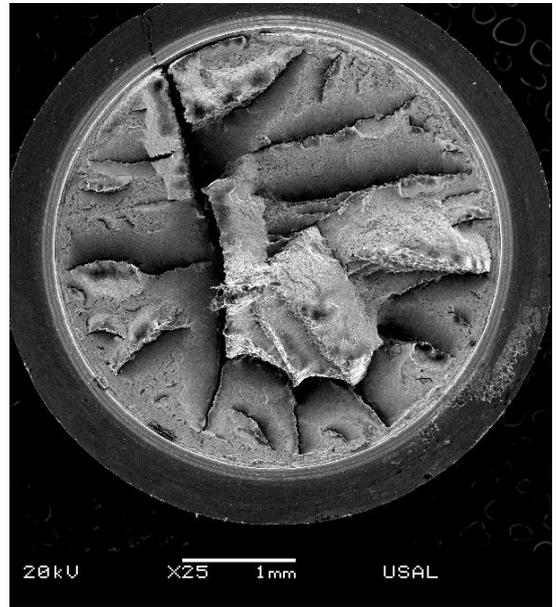
4A-3



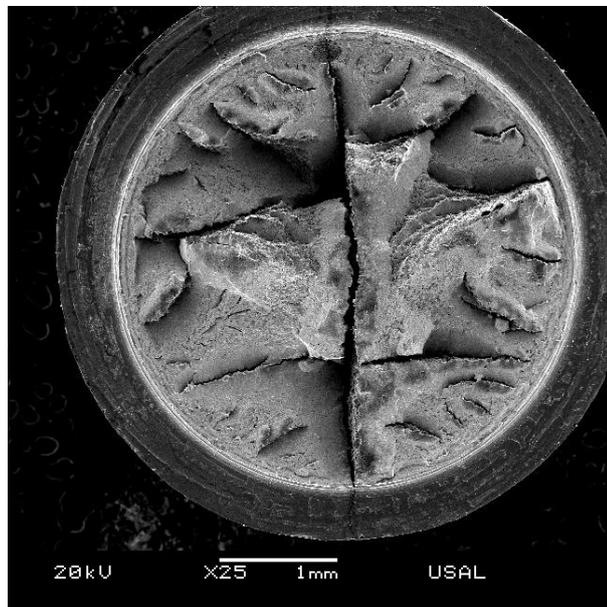
7A-1



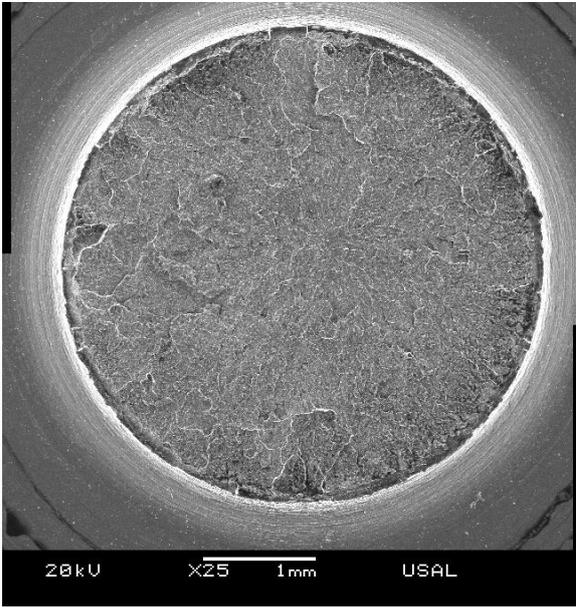
7A-2



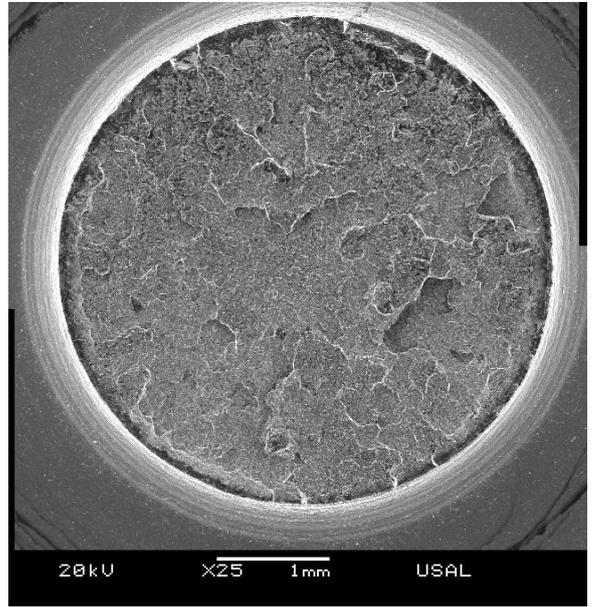
7A-3



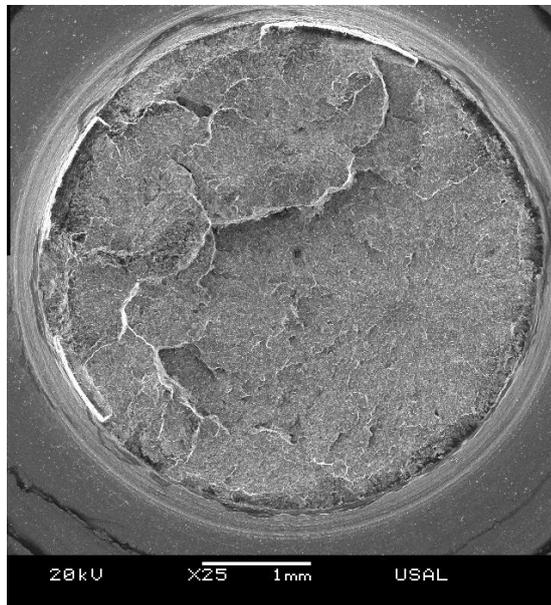
0B-1



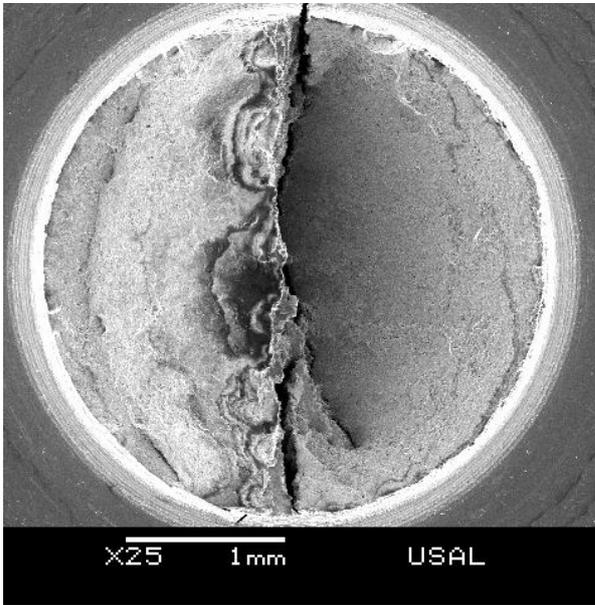
0B-2



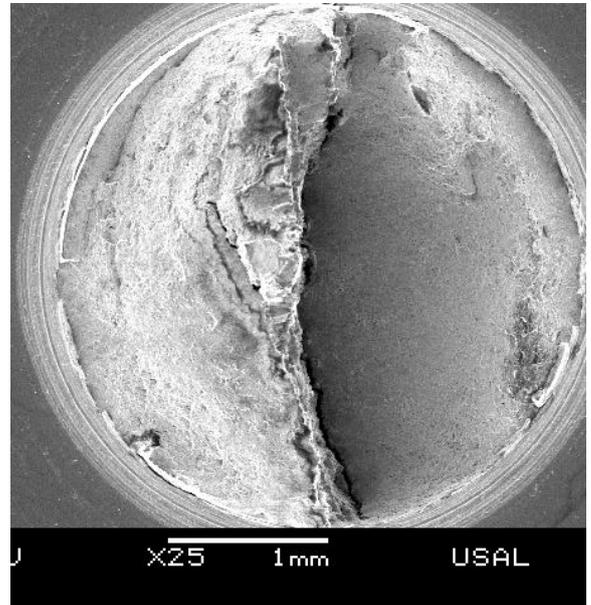
0B-3



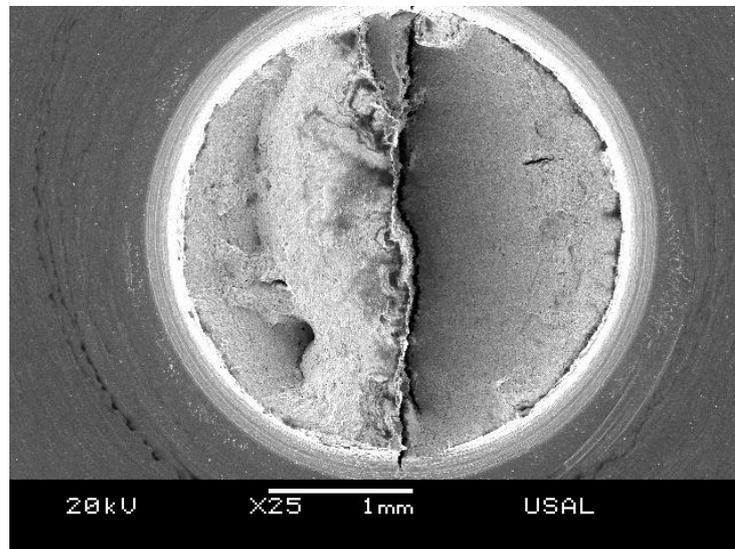
4B-1



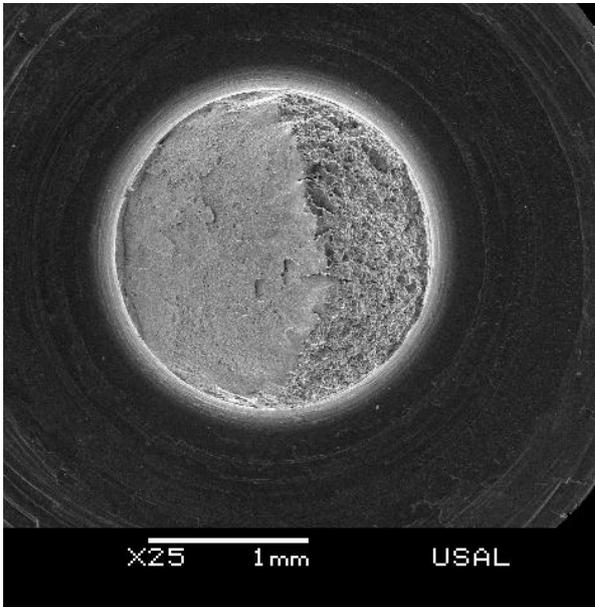
4B-2



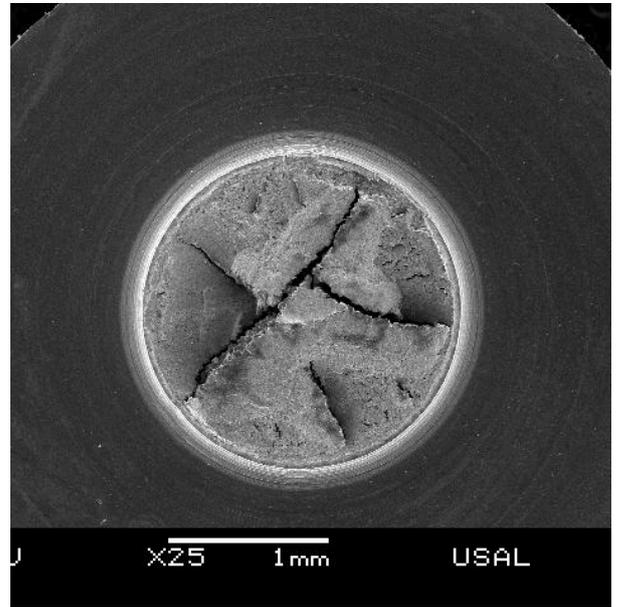
4B-3



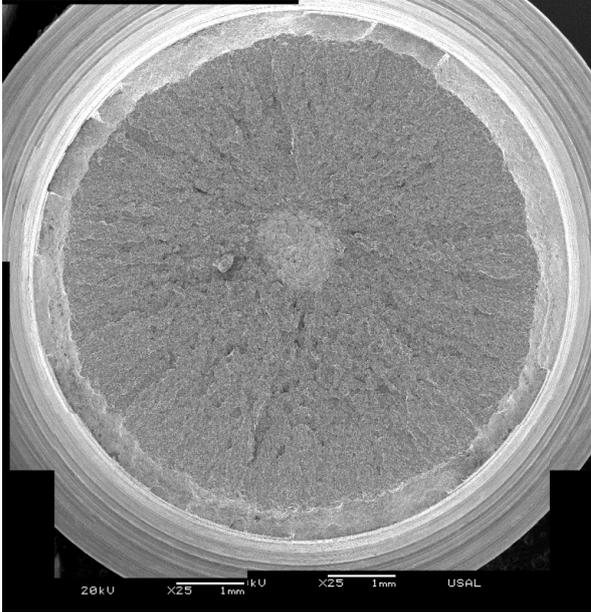
7B-1



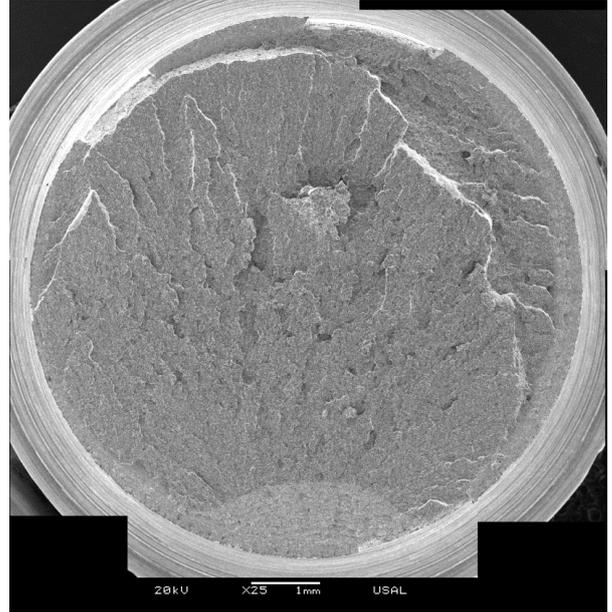
7B-3



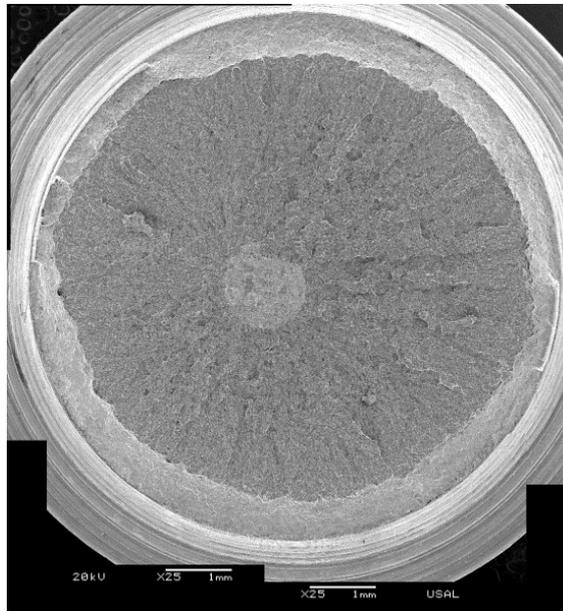
0C-1



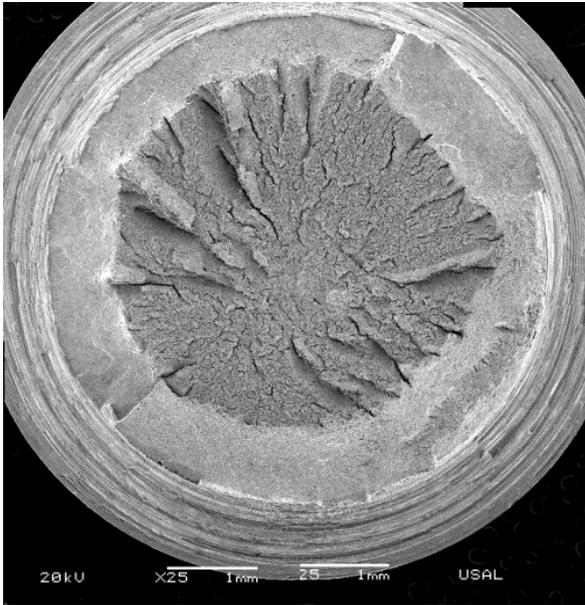
0C-2



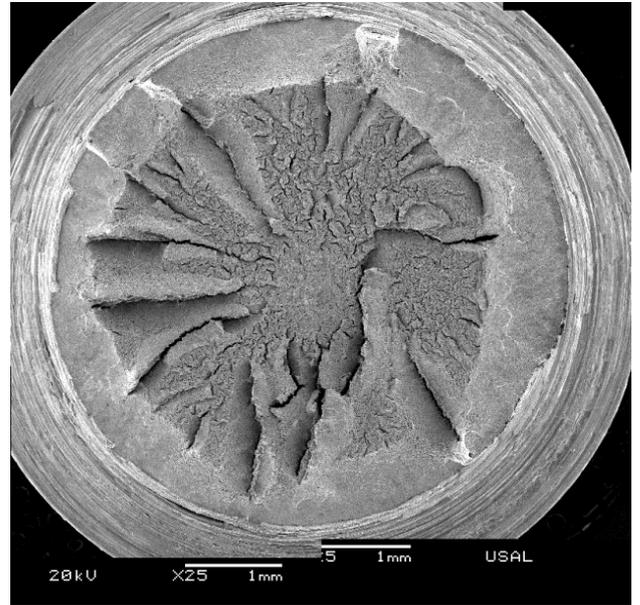
0C-3



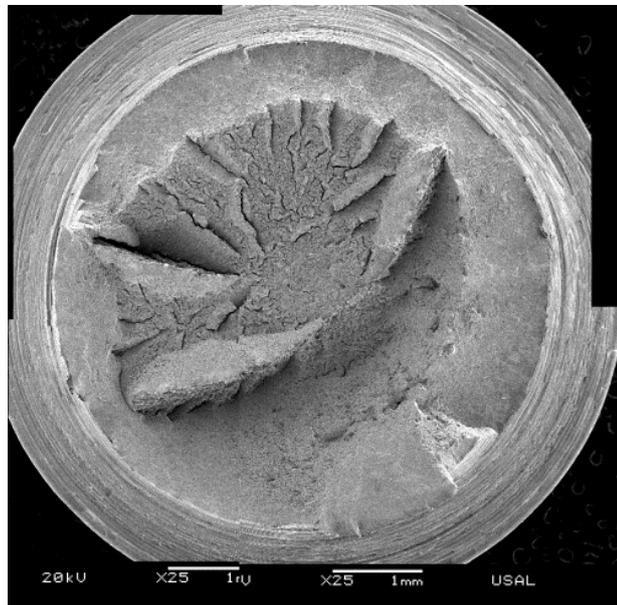
4C-1



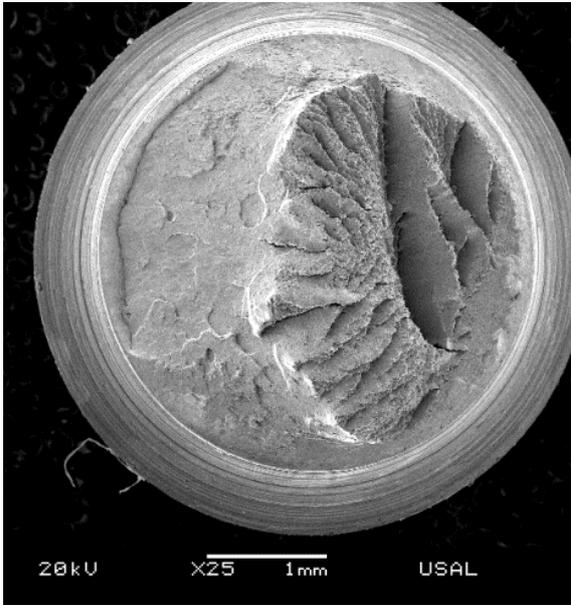
4C-2



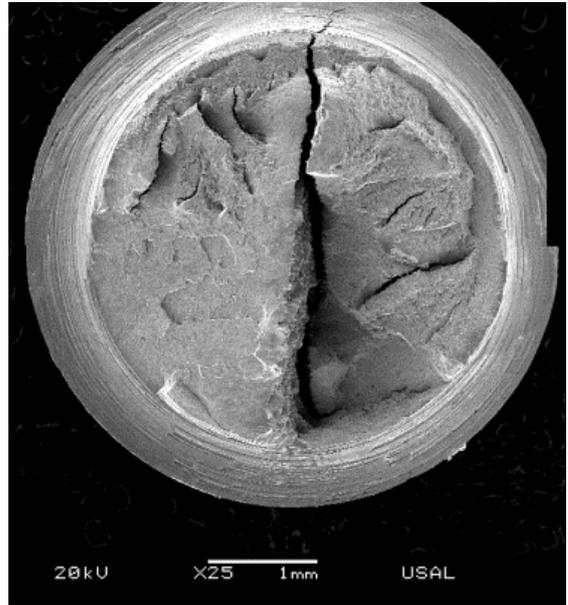
4C-3



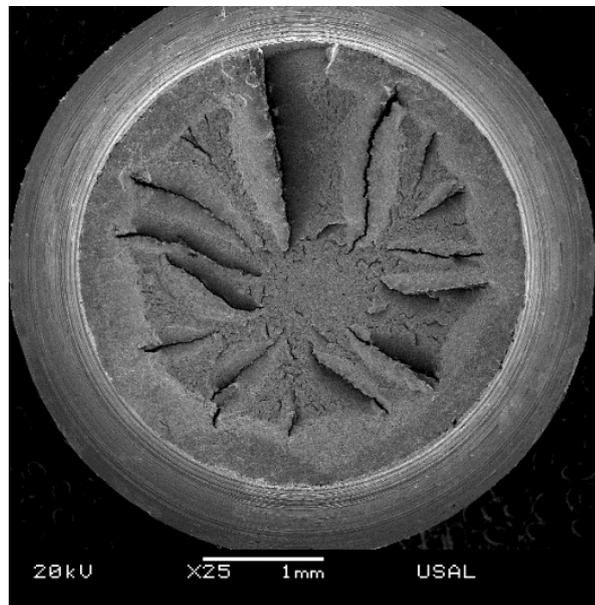
7C-1



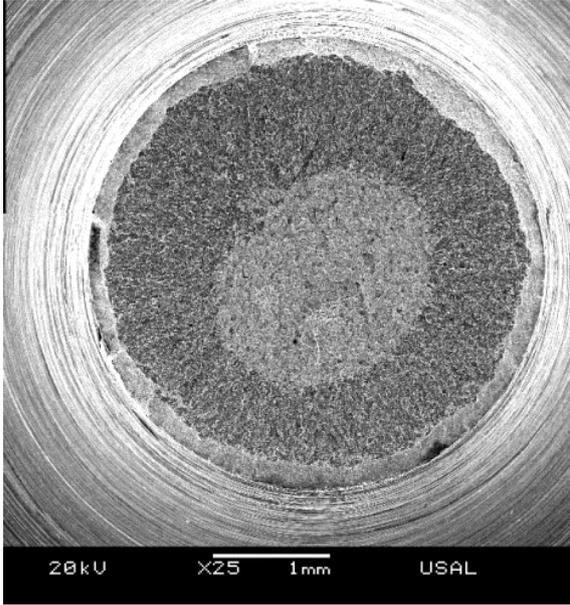
7C-2



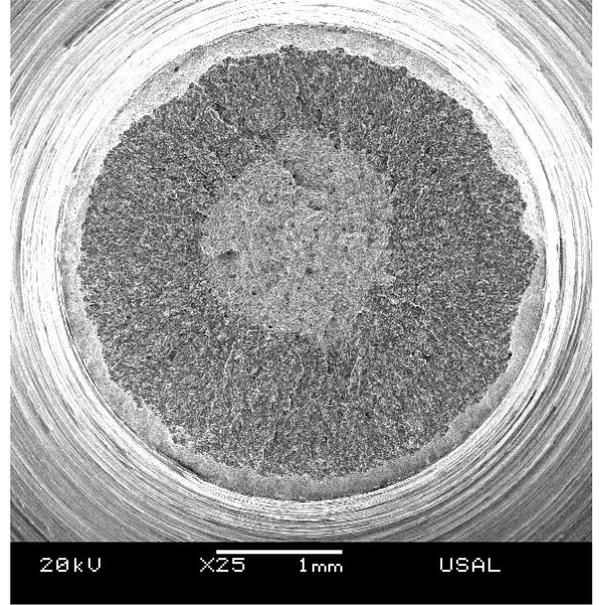
7C-3



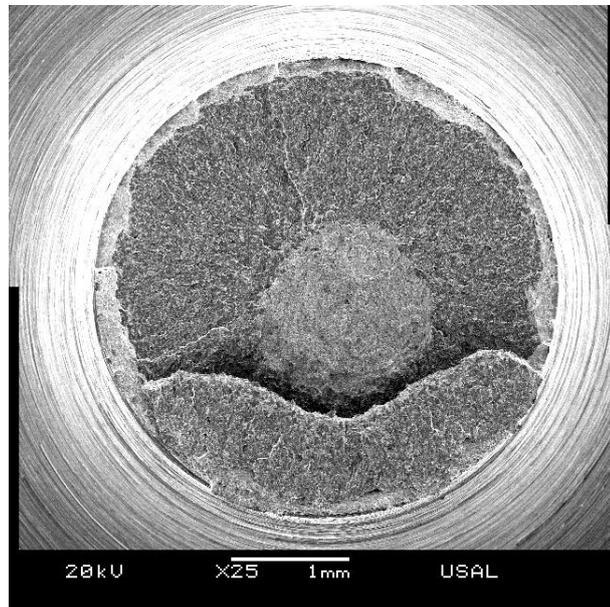
0D-1



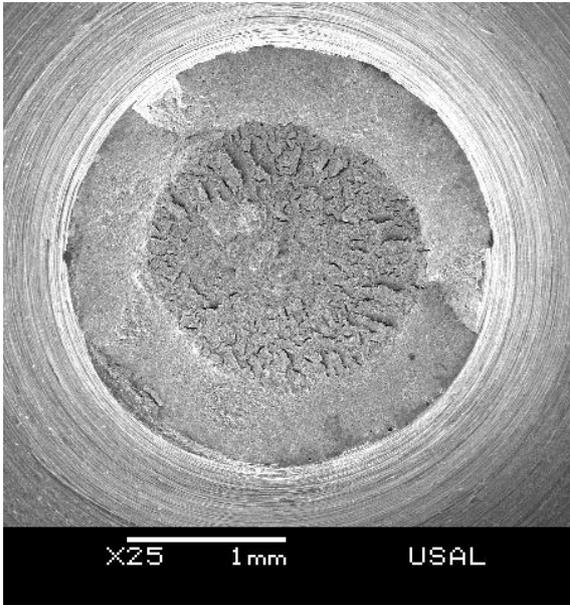
0D-2



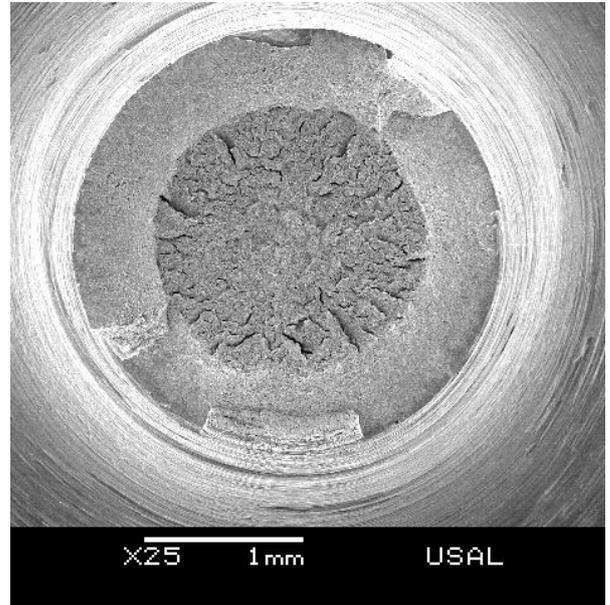
0D-3



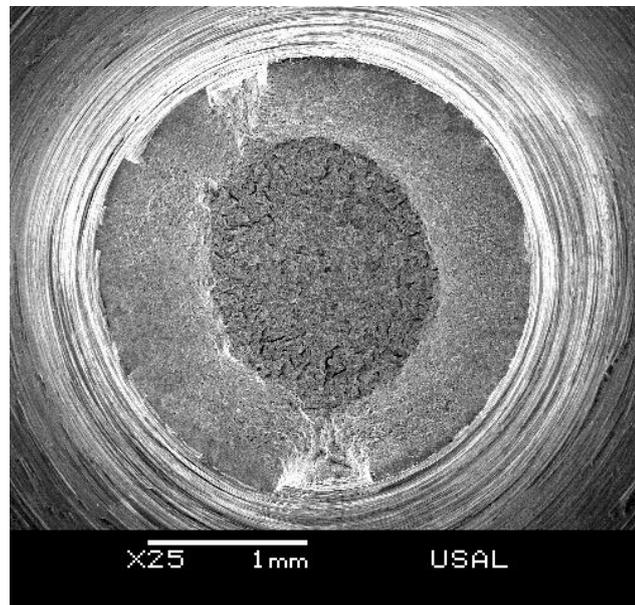
4D-1



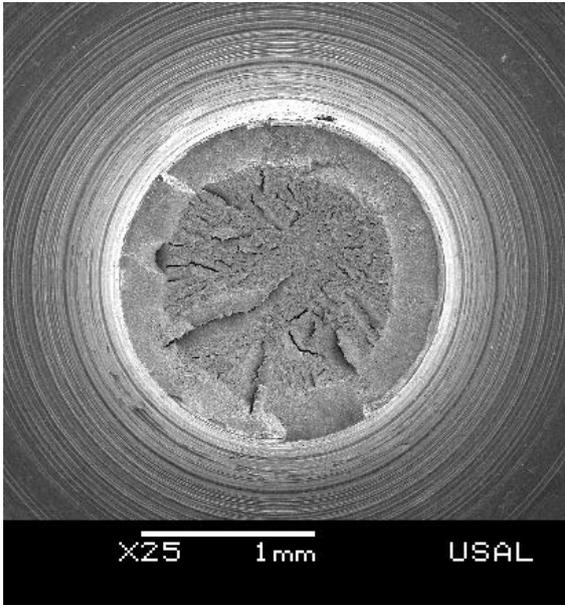
4D-2



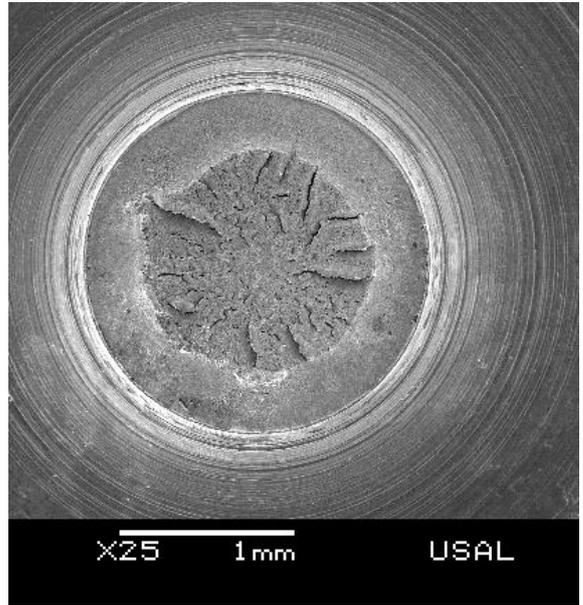
4D-3



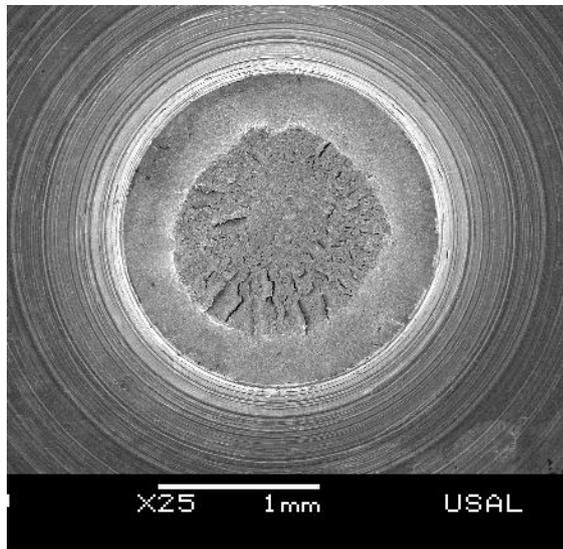
7D-1



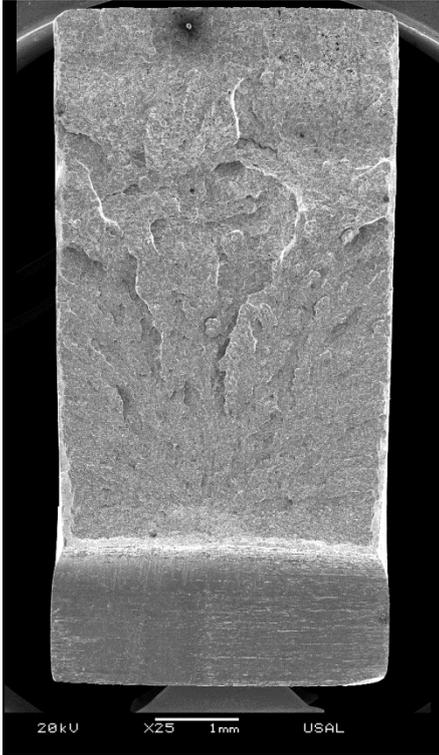
7D-2



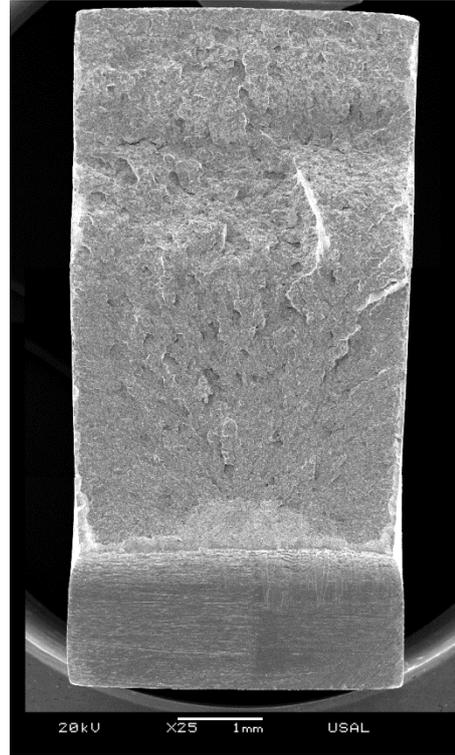
7D-3



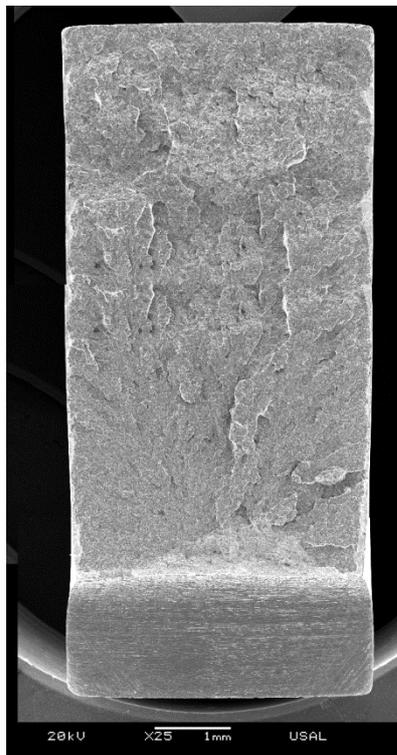
PA0-1



PA0-2



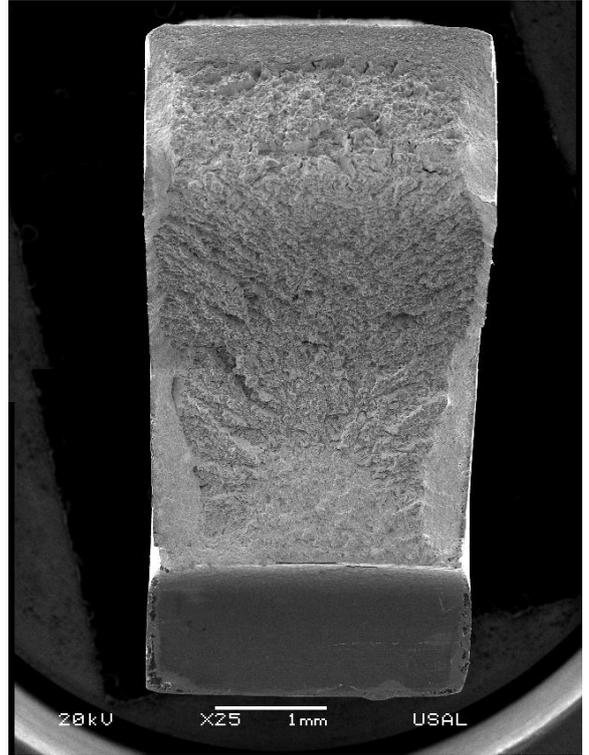
PA0-3



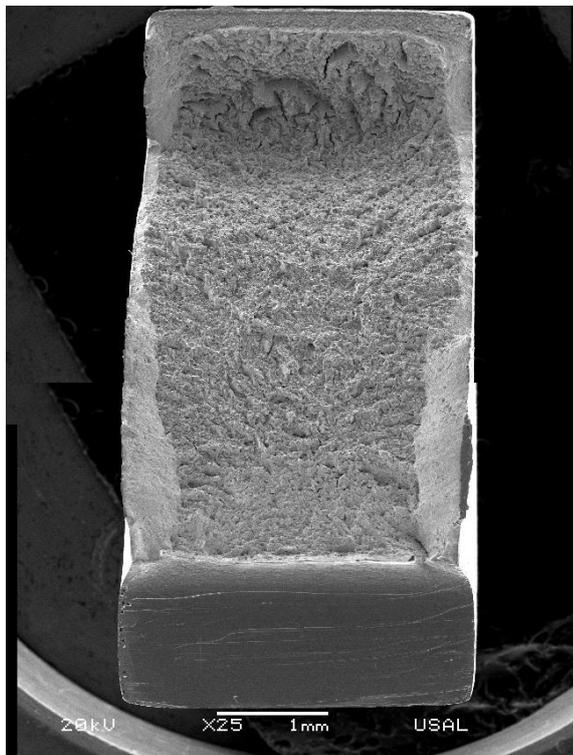
PA3-1



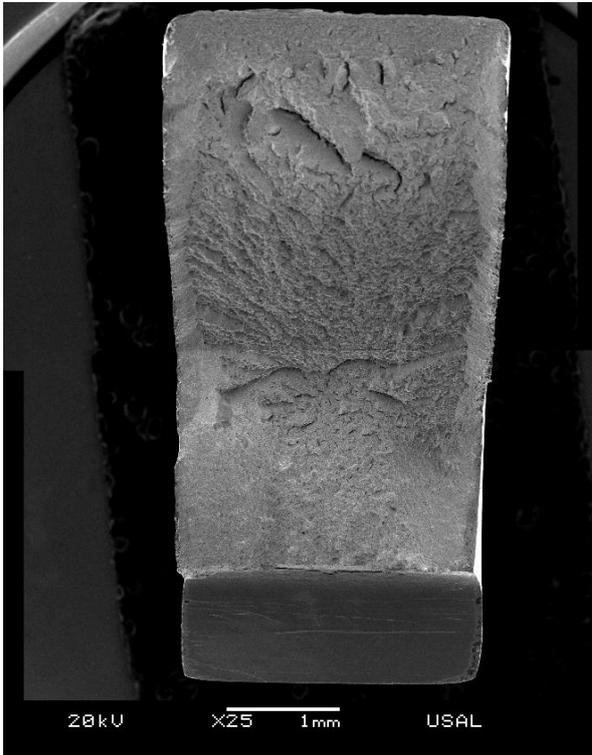
PA3-2



PA3-3



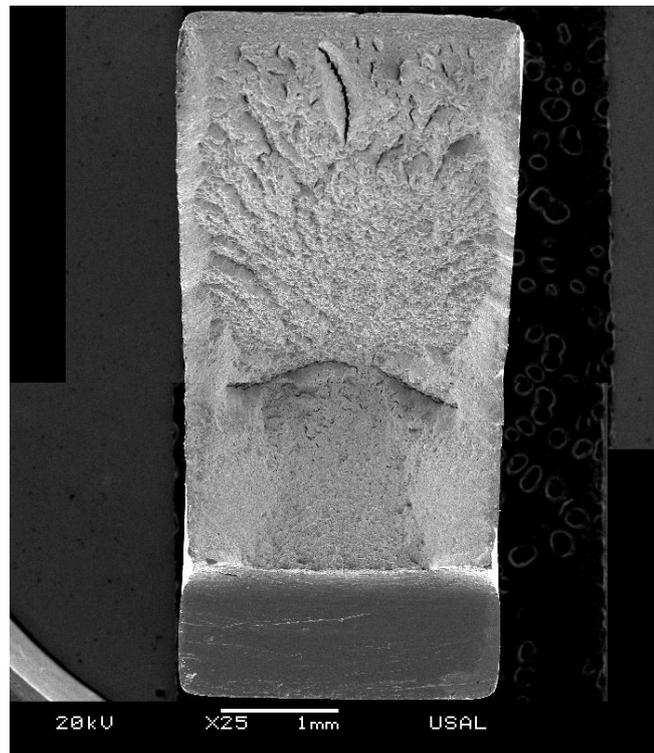
PA4-1



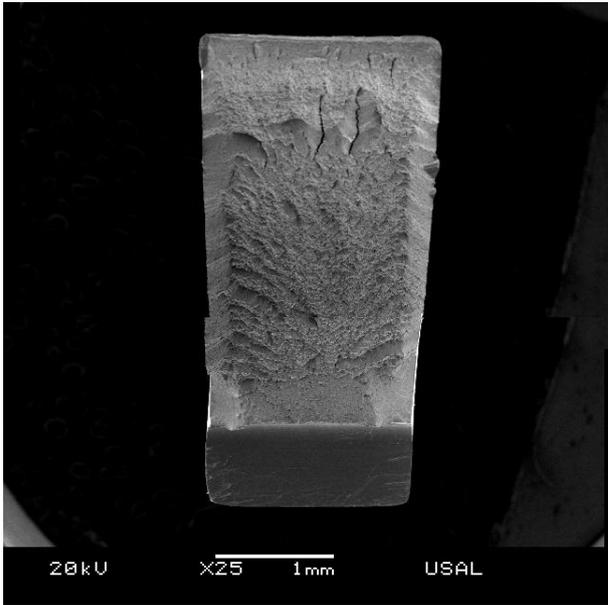
PA4-2



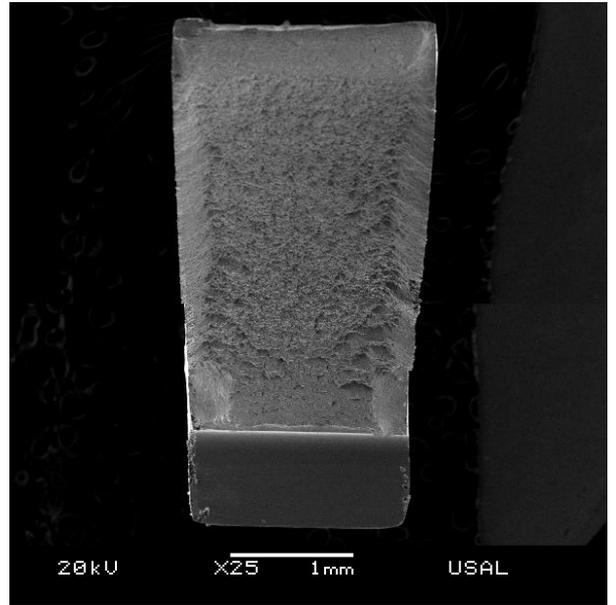
PA4-3



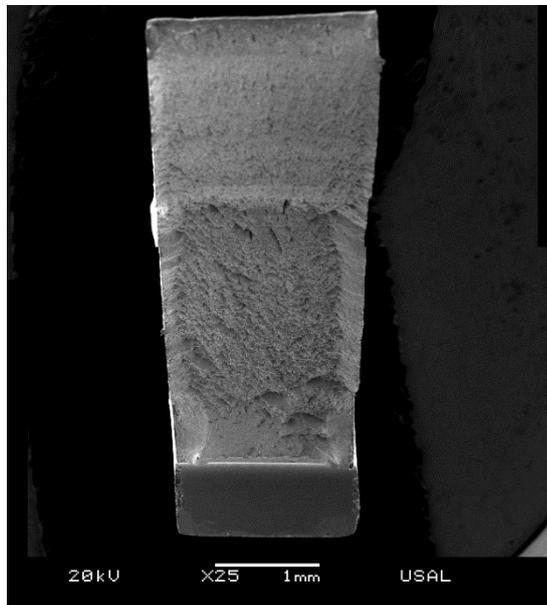
PA7-1



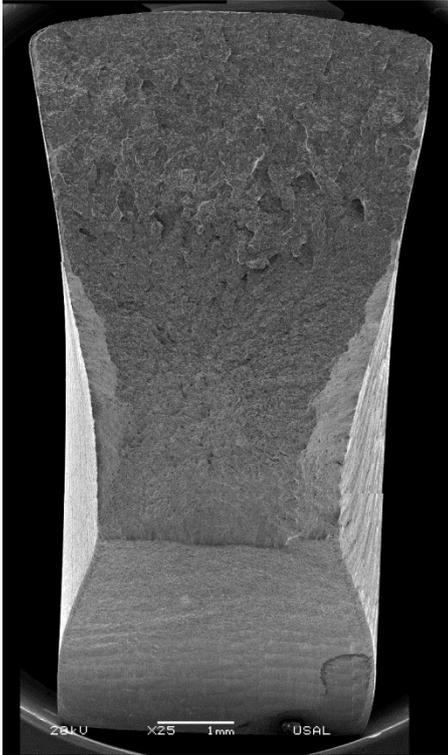
PA7-2



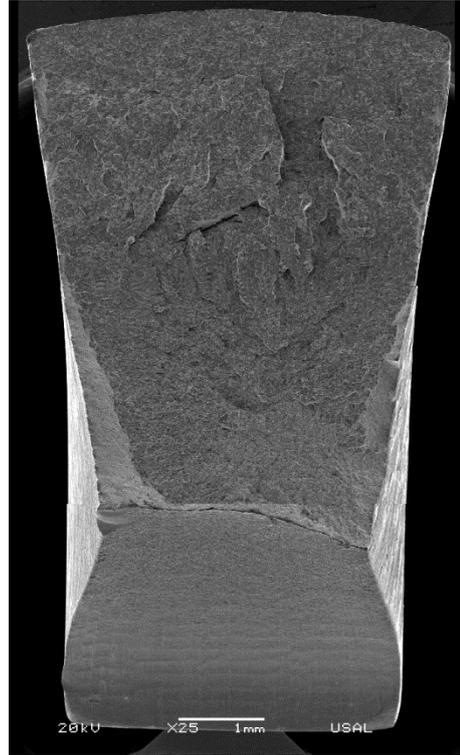
PA7-3



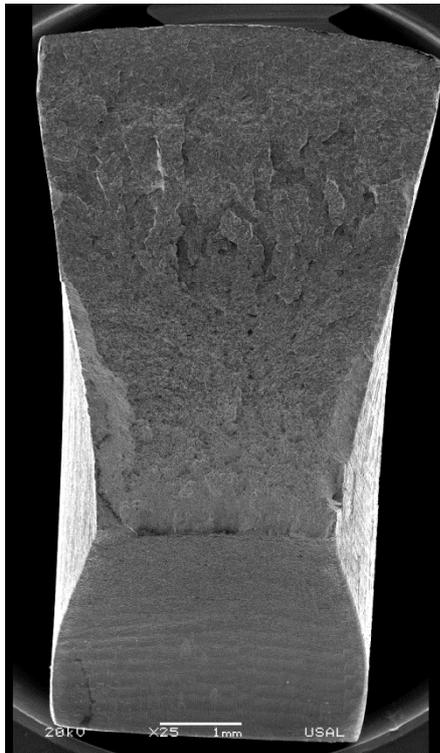
PC0-1



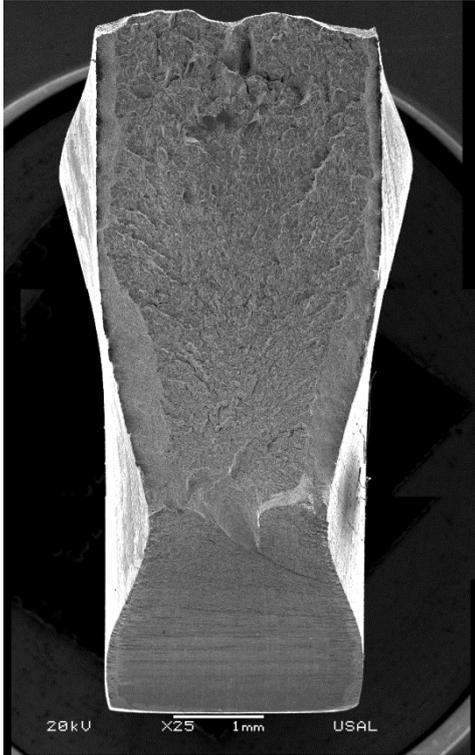
PC0-2



PC0-3



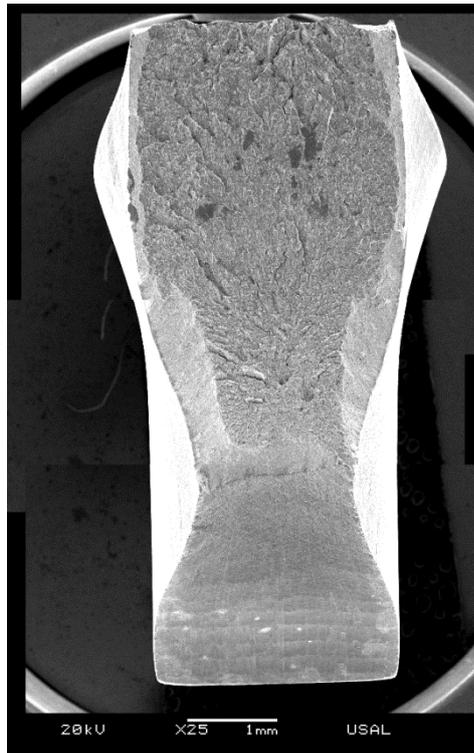
PC3-1



PC3-2



PC3-3



PC4-1



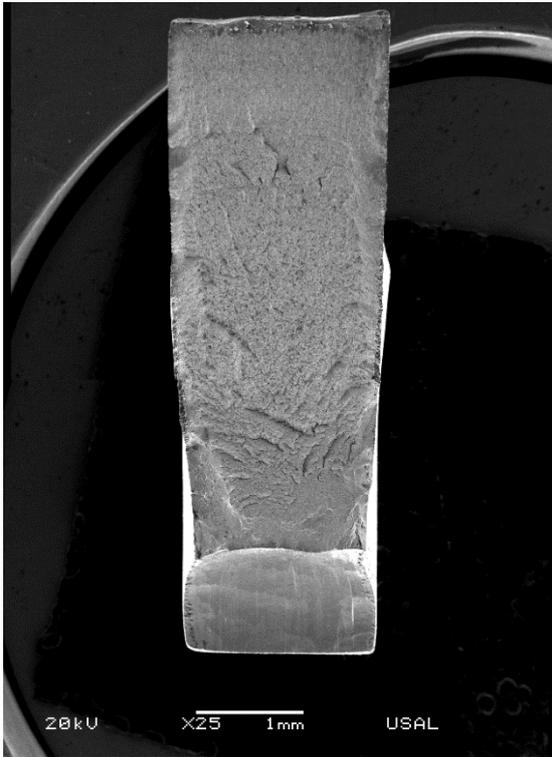
PC4-2



PC4-3



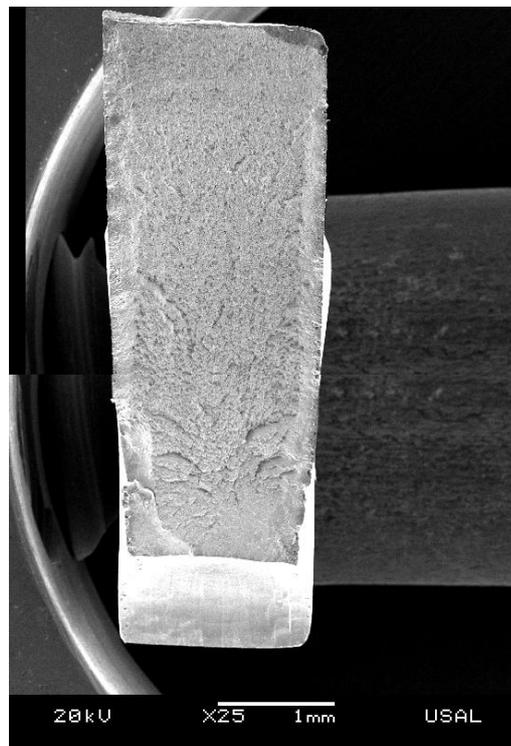
PC7-1



PC7-2

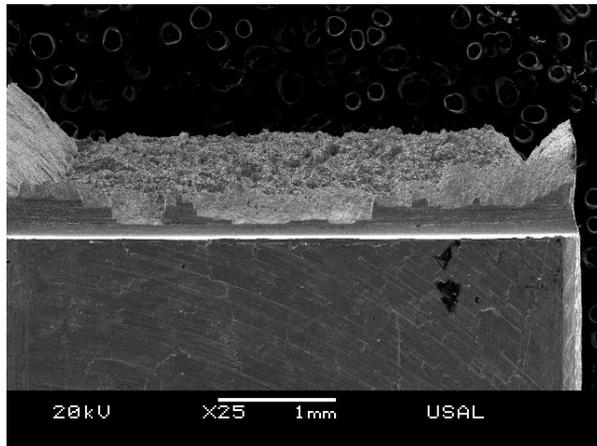


PC7-3

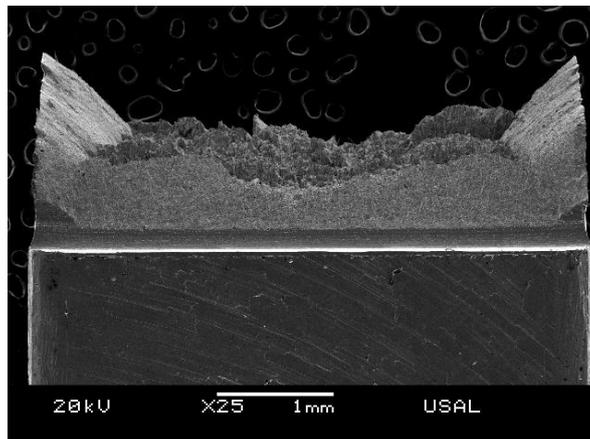


ANEXO III: FRACTOGRAFÍAS PERFIL

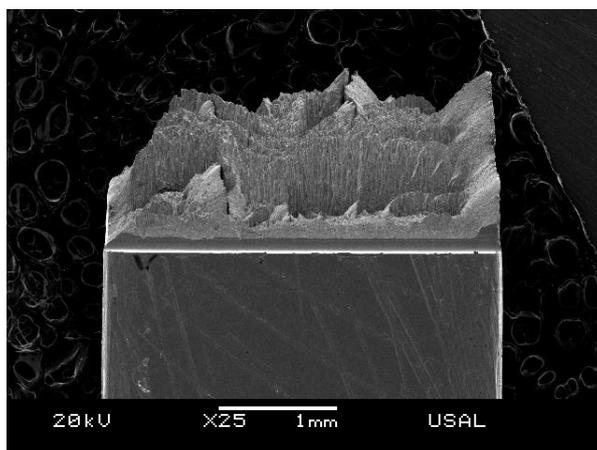
PAA3-2



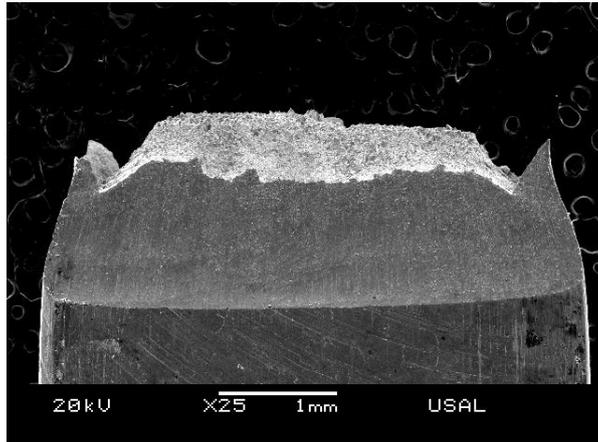
PAA4-2



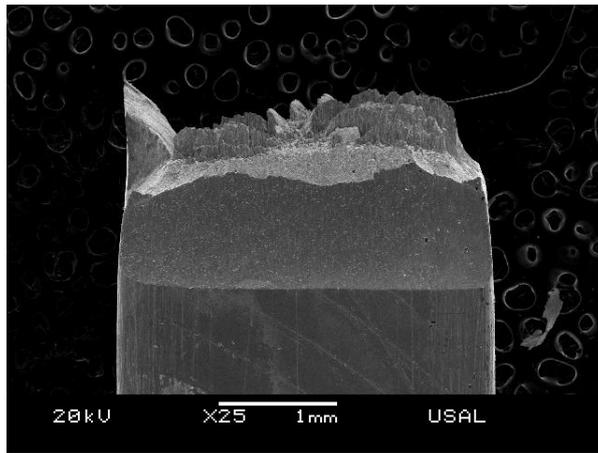
PAA7-2



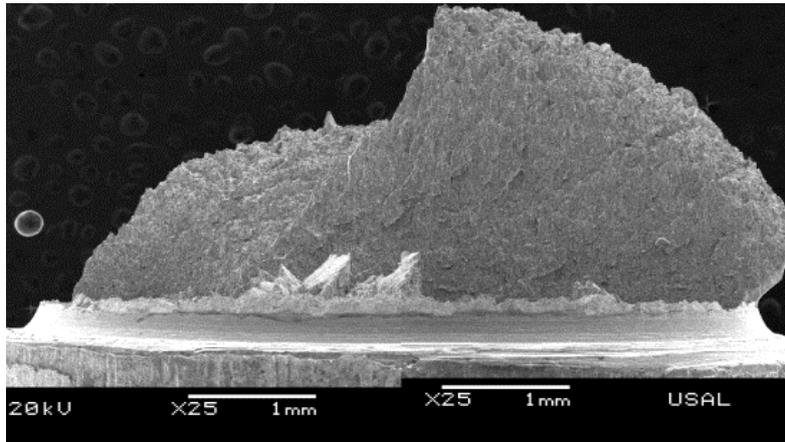
PCC4-2



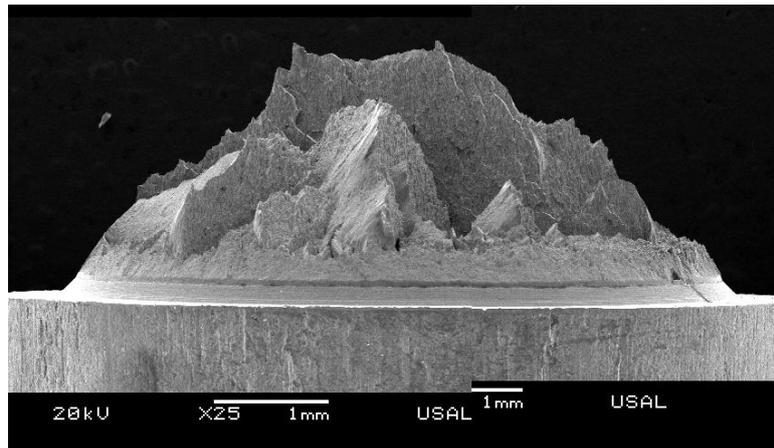
PCC7-2



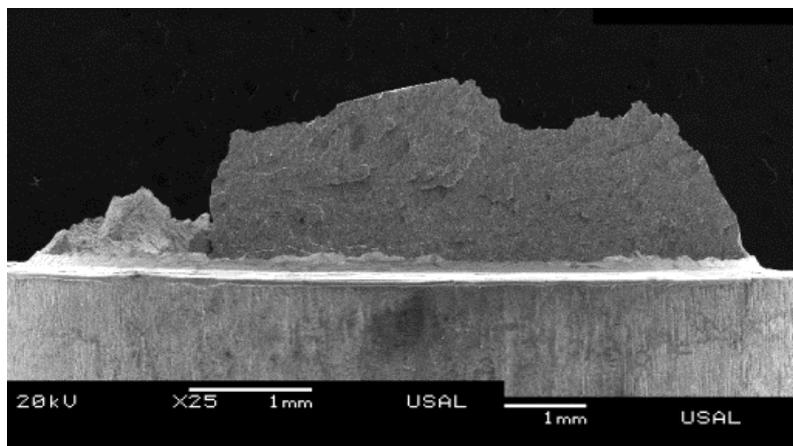
4A-1



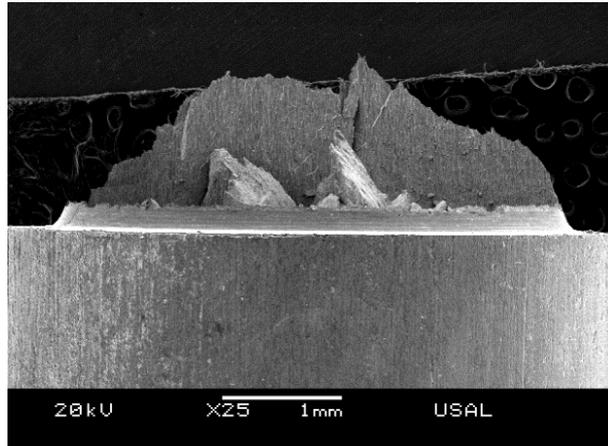
4A-2



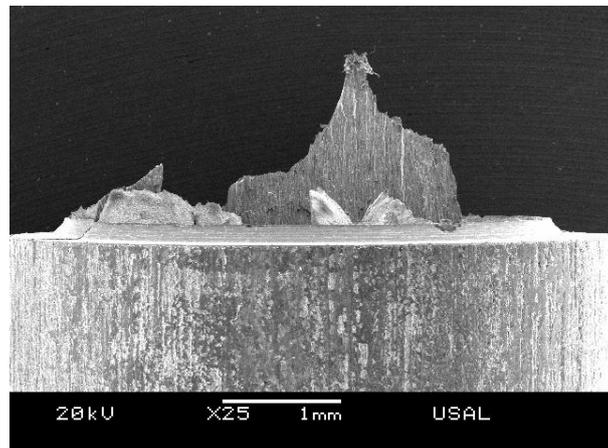
4A-3



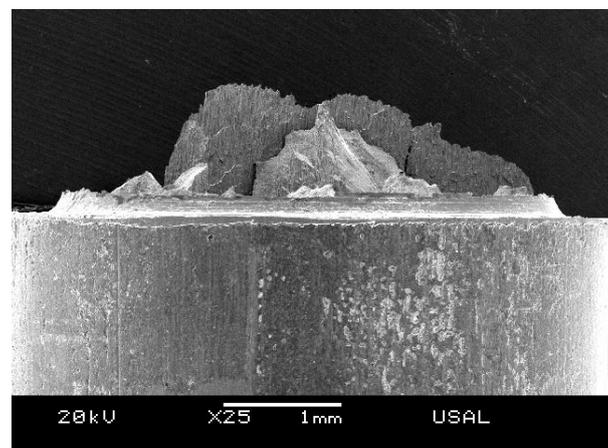
7A-1



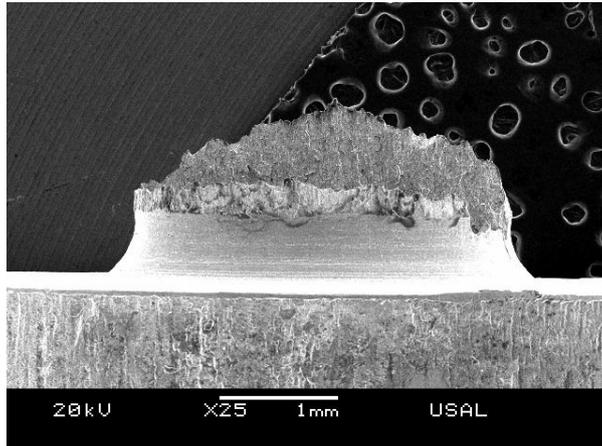
7A-2



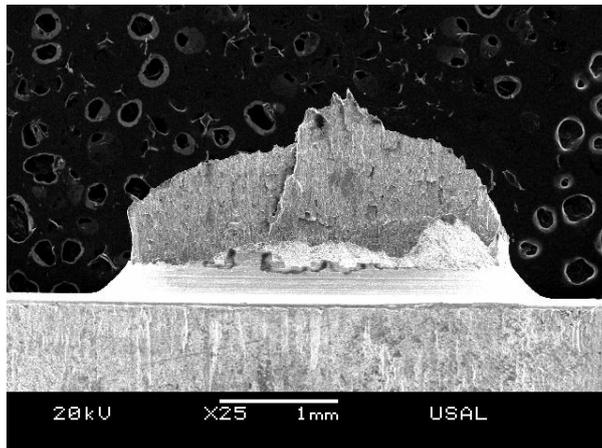
7A-3



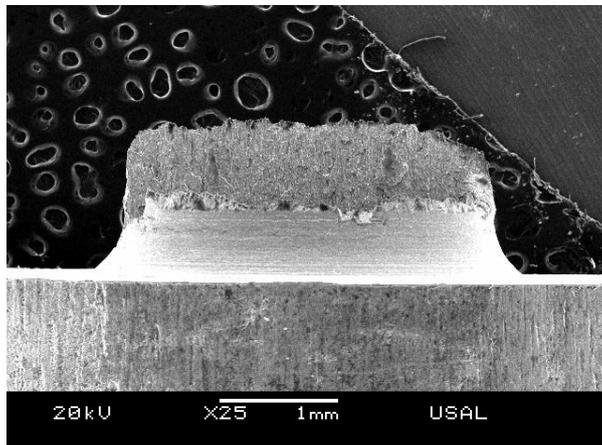
4B-1



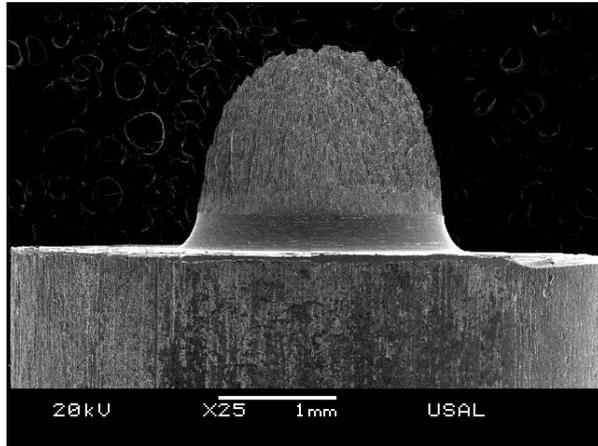
4B-2



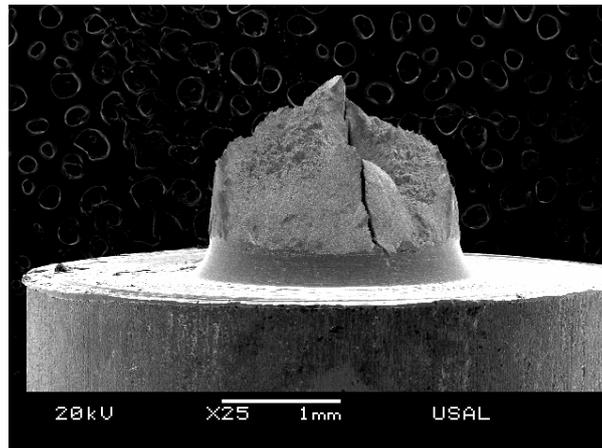
4B-3



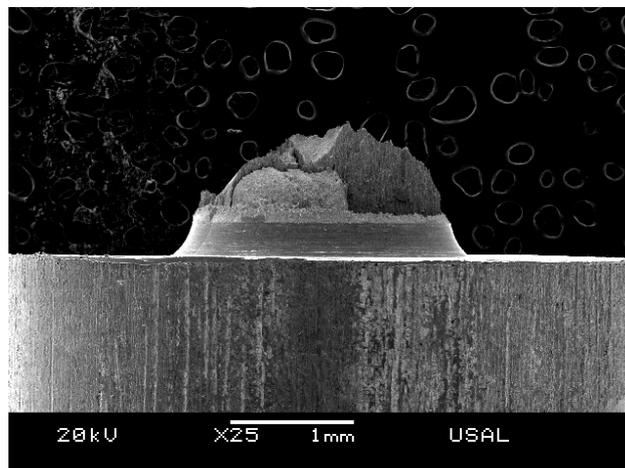
7B-1



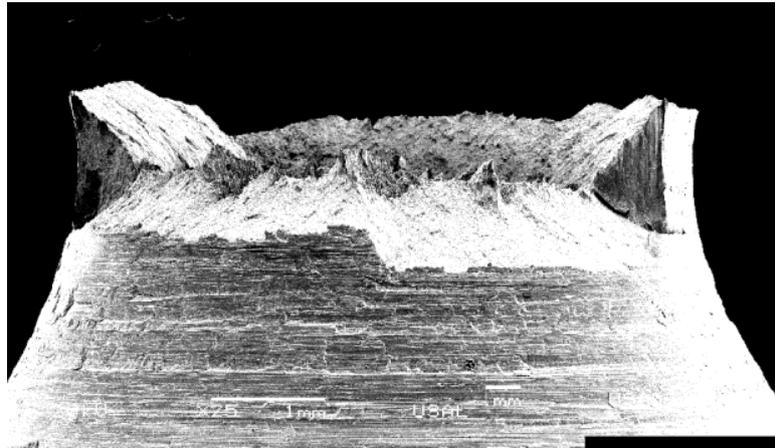
7B-2



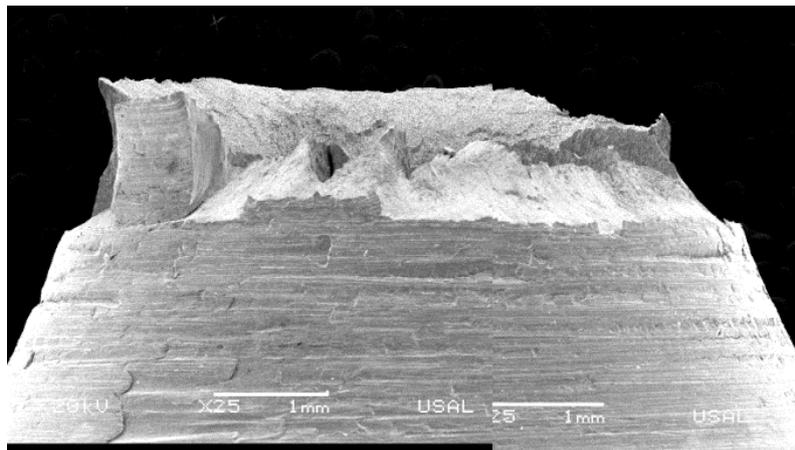
7B-3



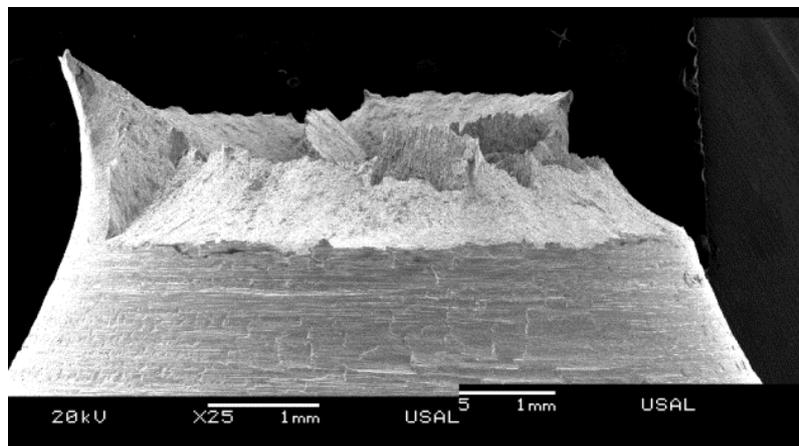
4C-1



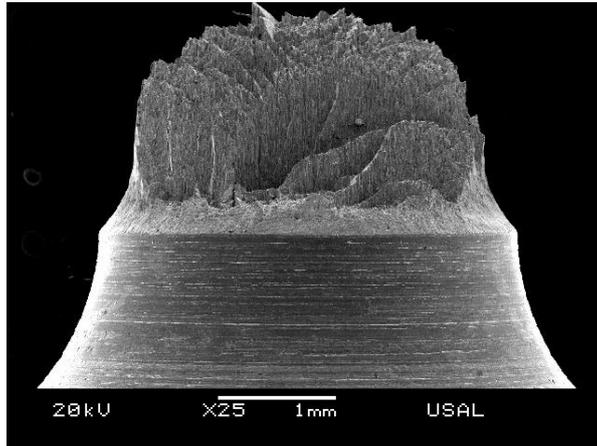
4C-2



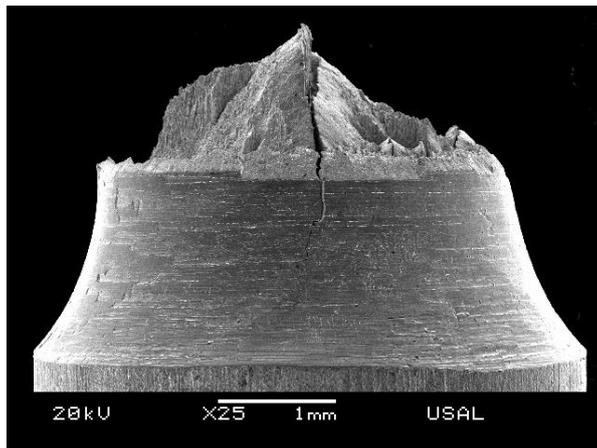
4C-3



7C-1

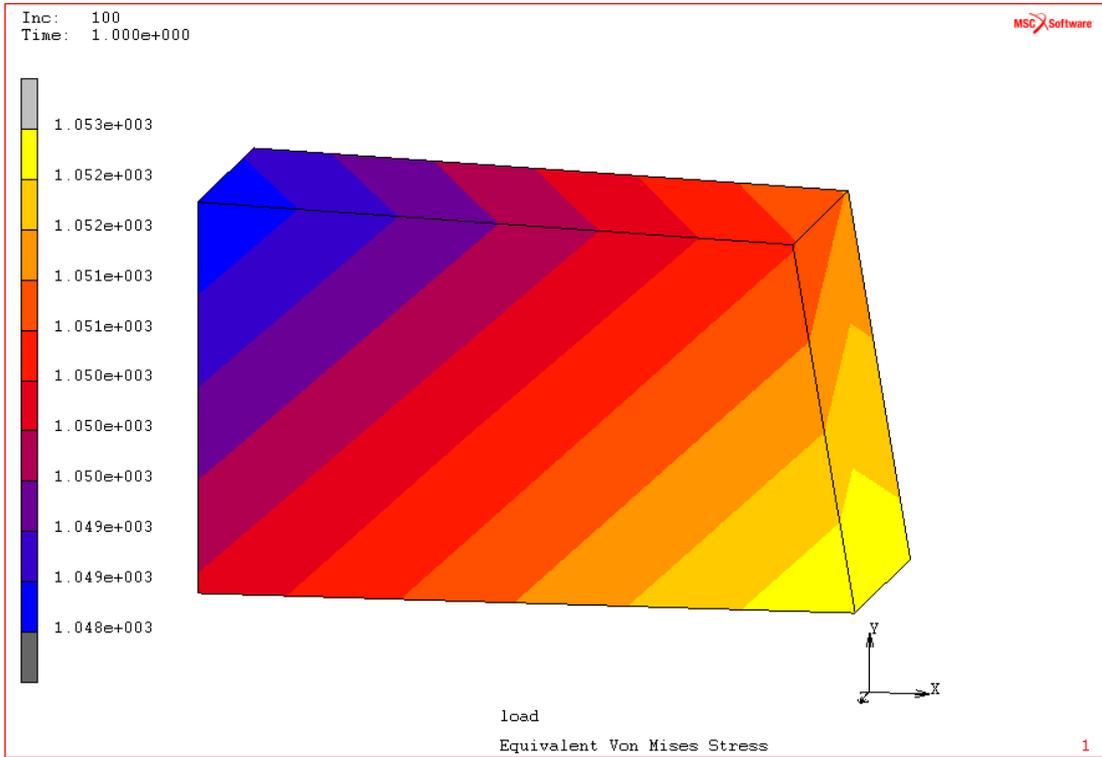


7C-2

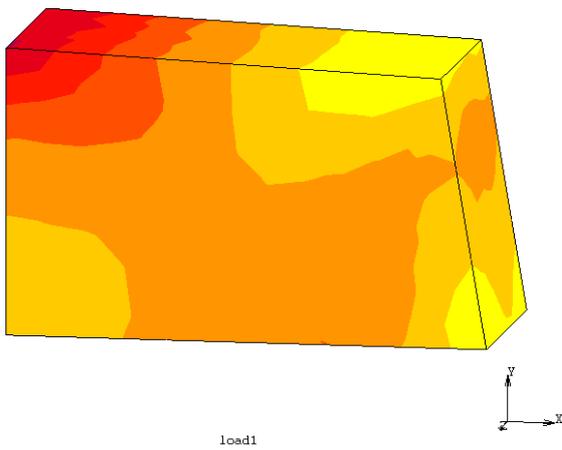


ANEXO IV: COMPROBACIONES CON LACELDA UNIDAD

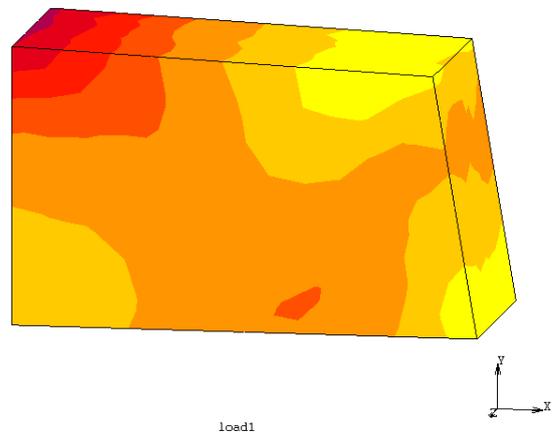
PAA0_CENTRO



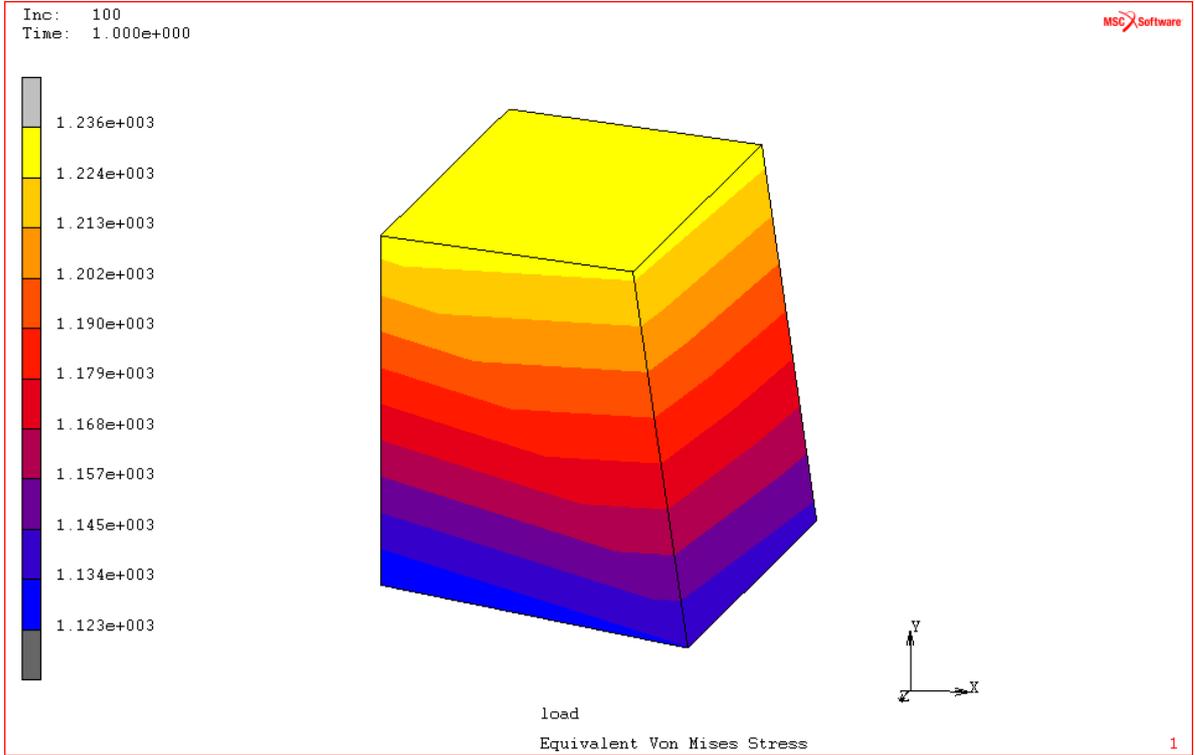
PAA0_BLANDA



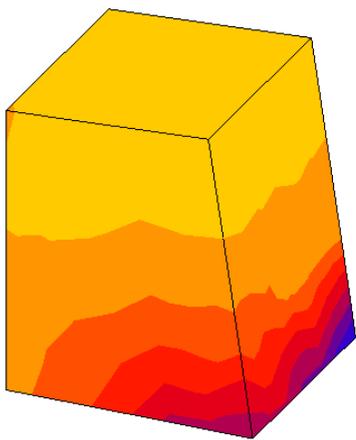
PAA0_DURA



PAA0_ENTALLA



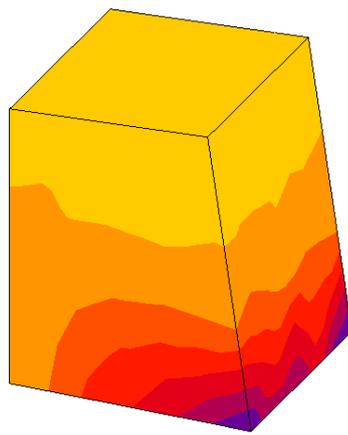
PAA0_BLANDA



load1



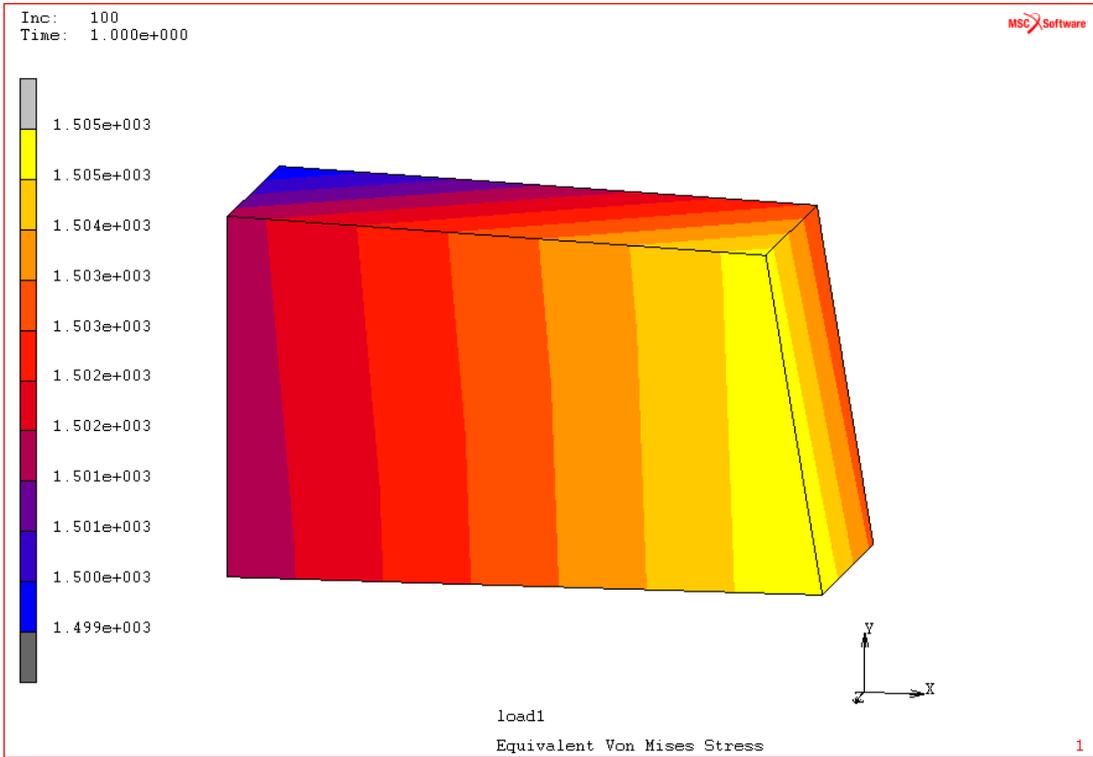
PAA0_DURA



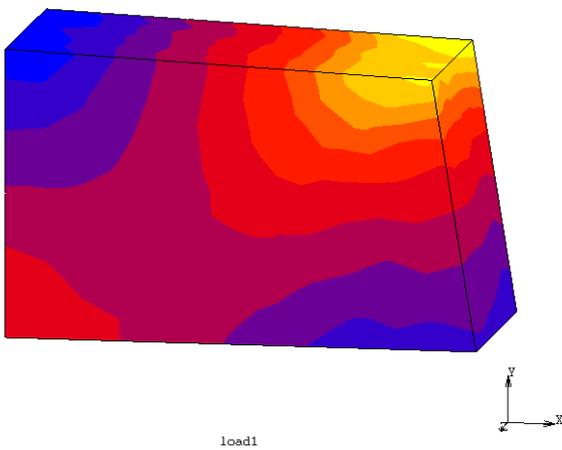
load1



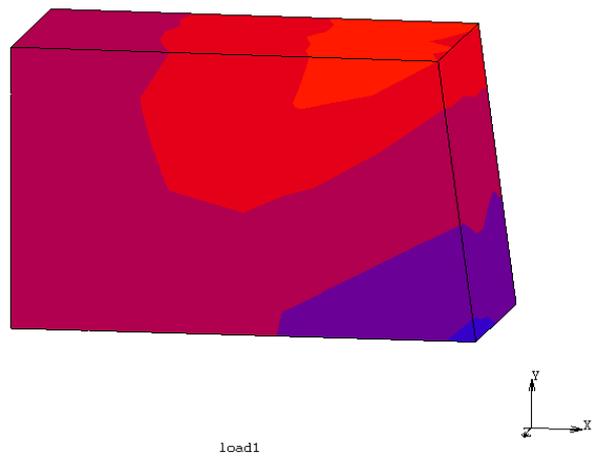
PAA7_CENTRO



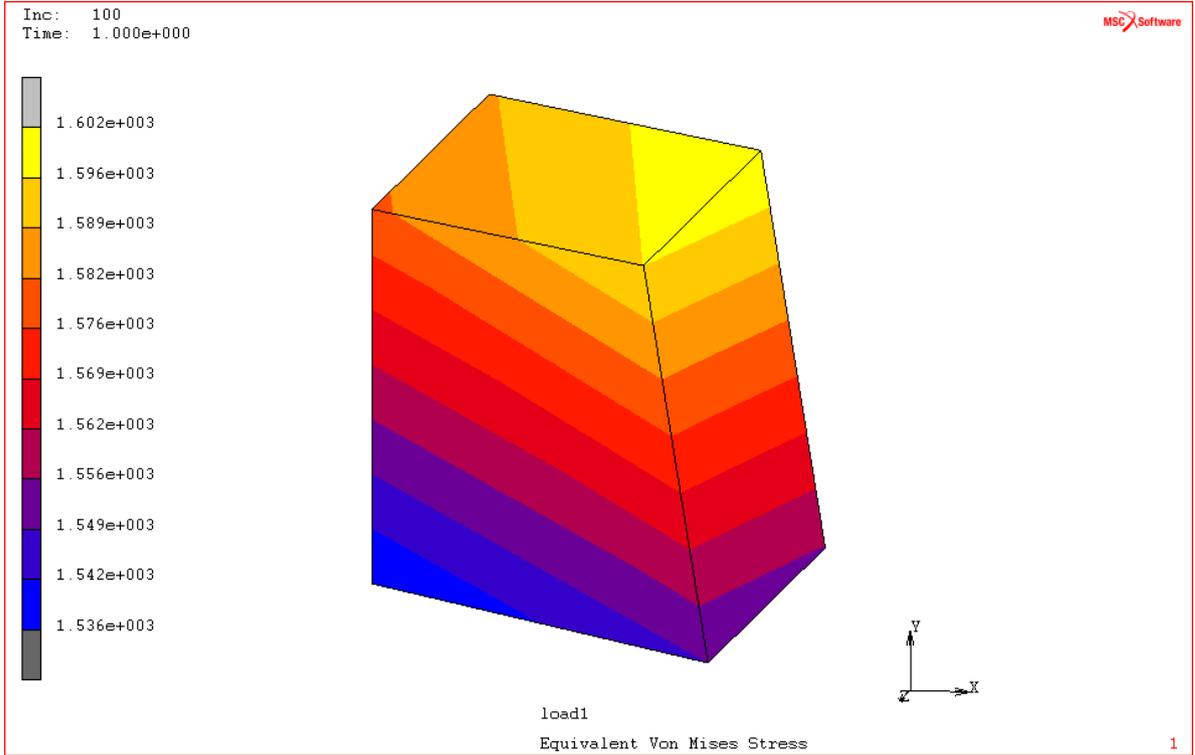
PAA7_BLANDA



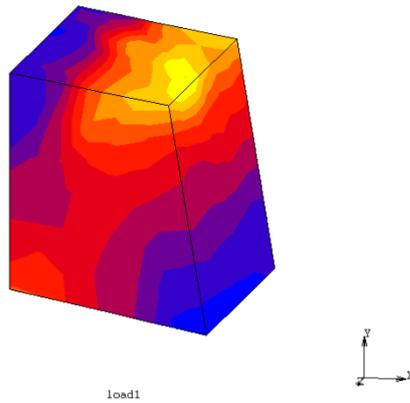
PAA7_DURA



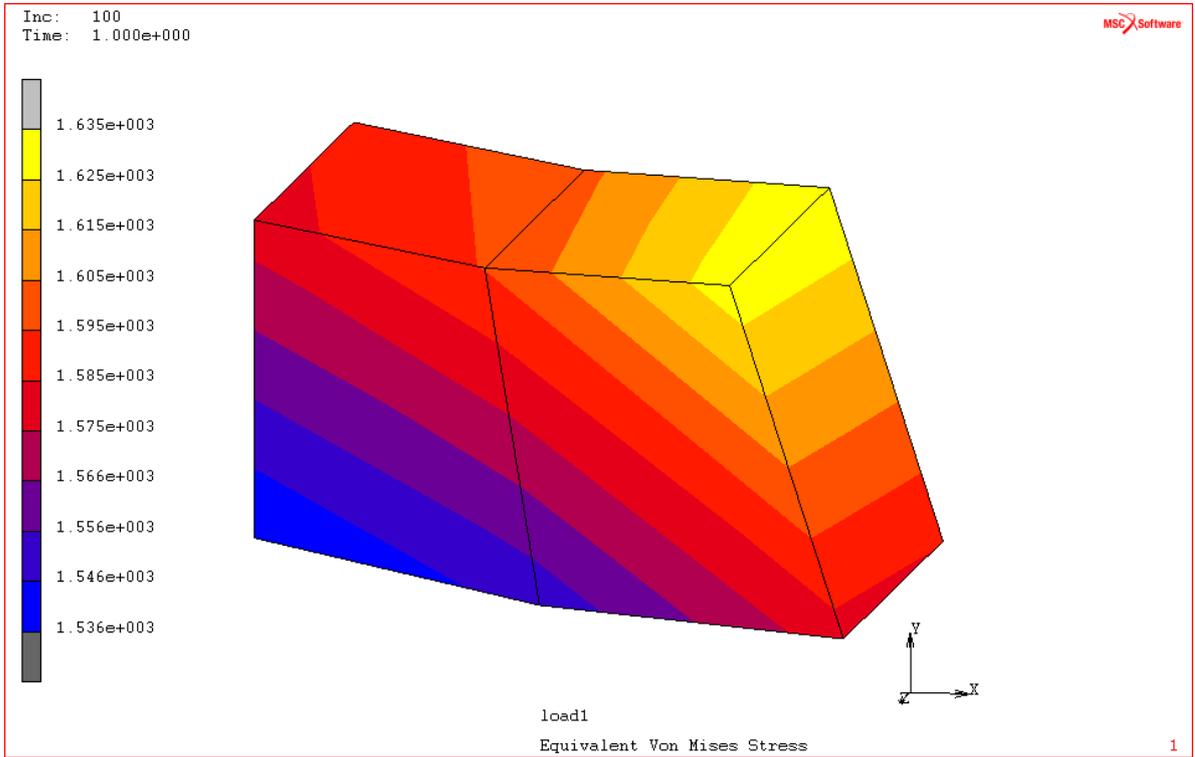
PAA7_ENTALLA



PAA7_DURA



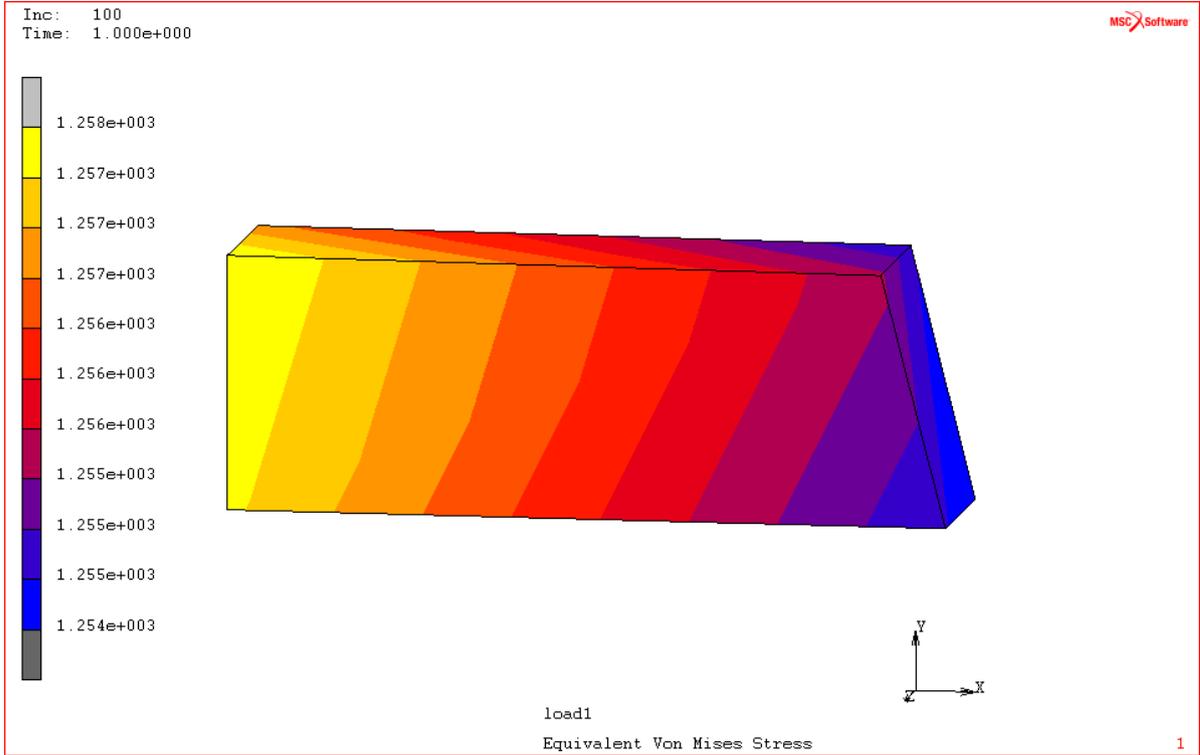
PAA7_ENTALLA_2



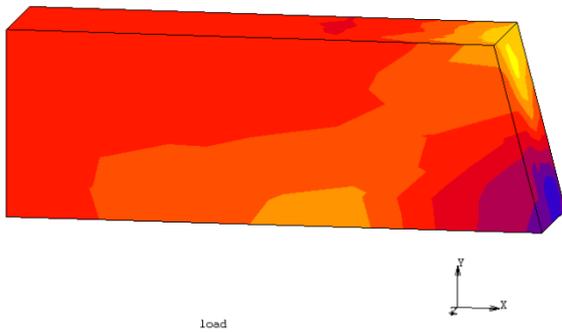
PAA7_BLANDA



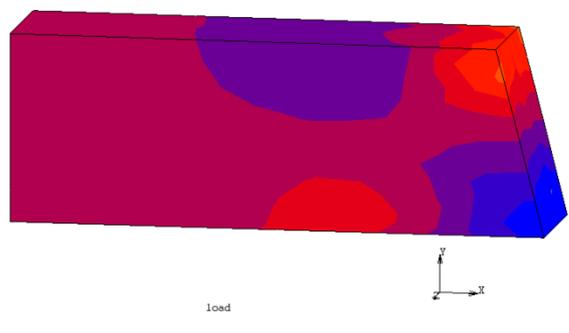
PCC0_CENTRO



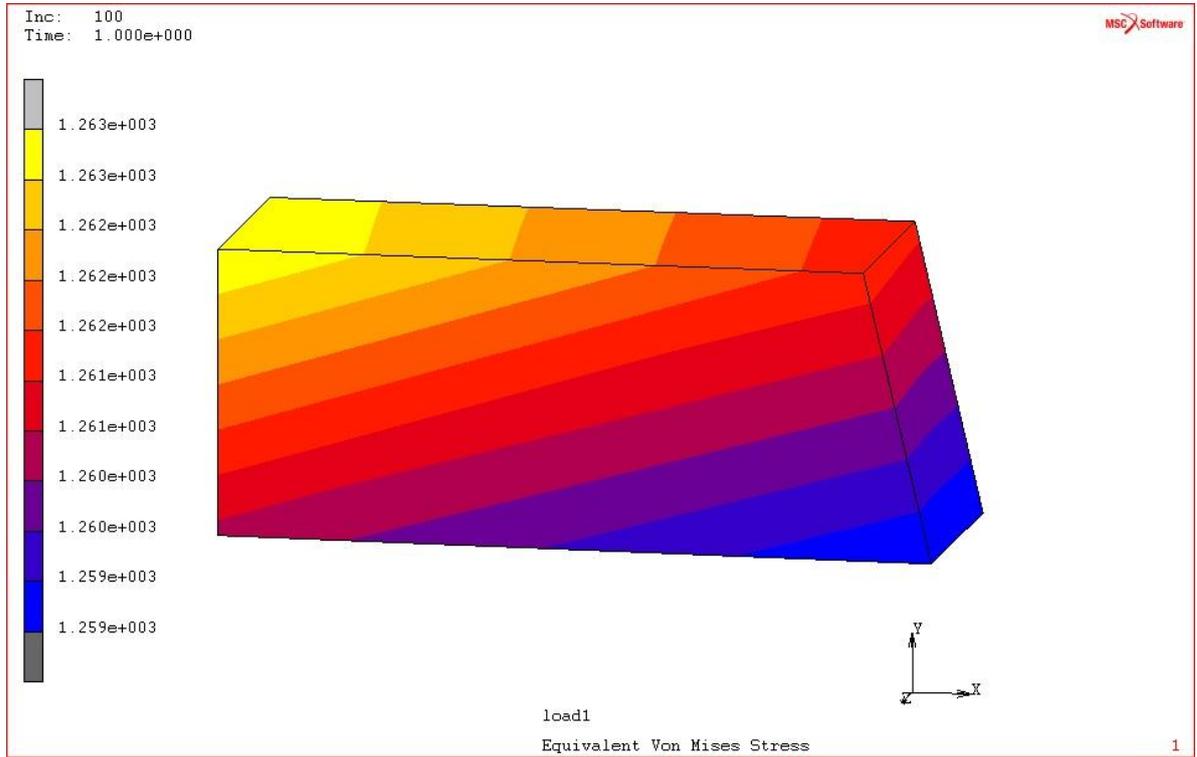
PCC0_BLANDA



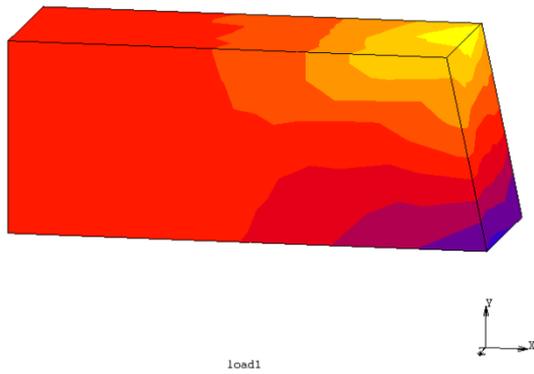
PCC0_DURA



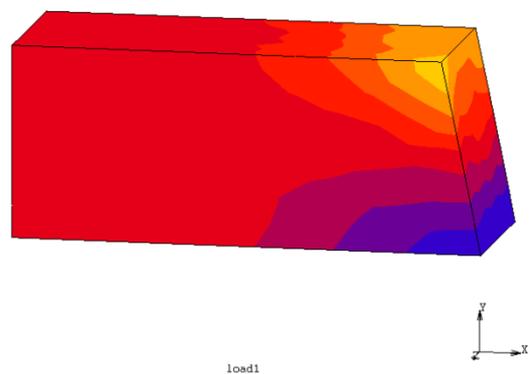
PCC0_ENTALLA



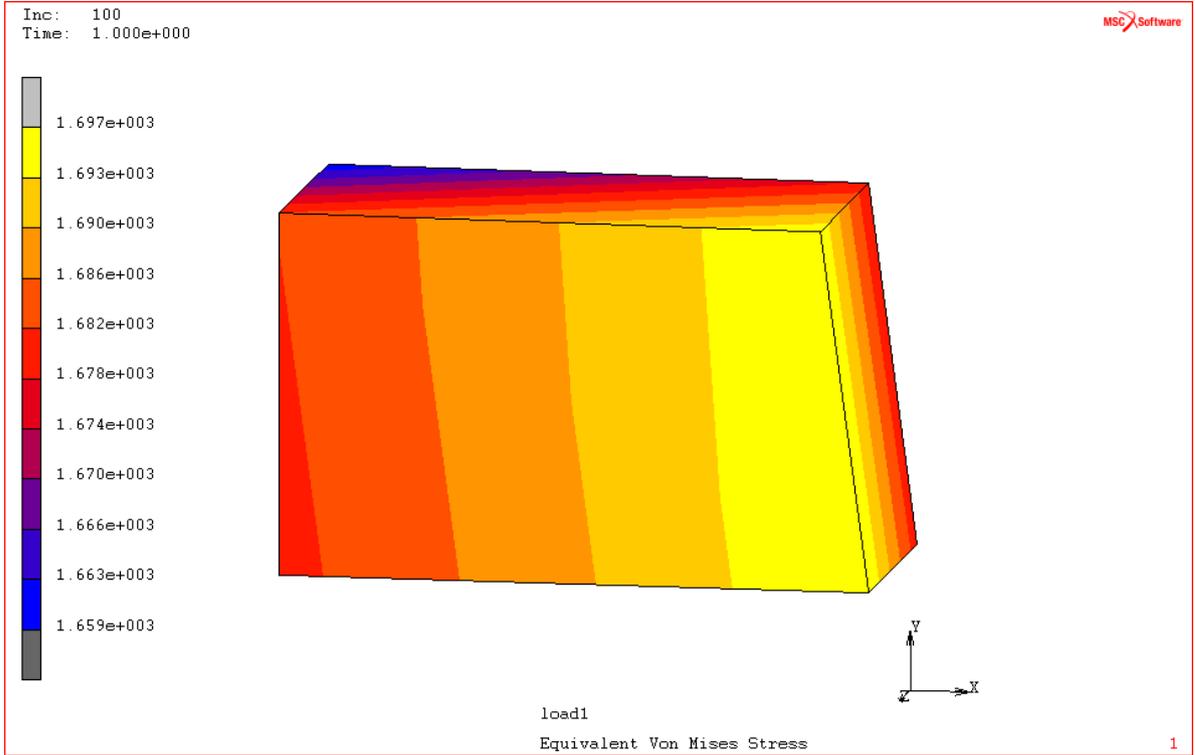
PCC0_BLANDA



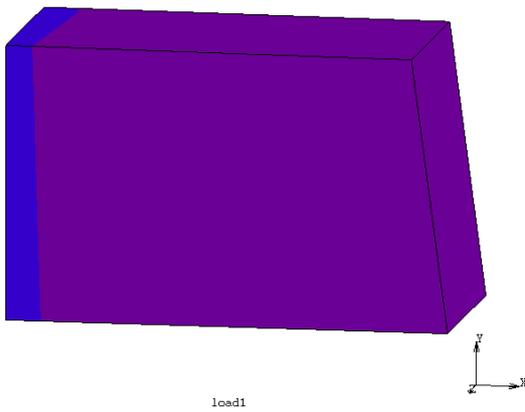
PCC0_DURA



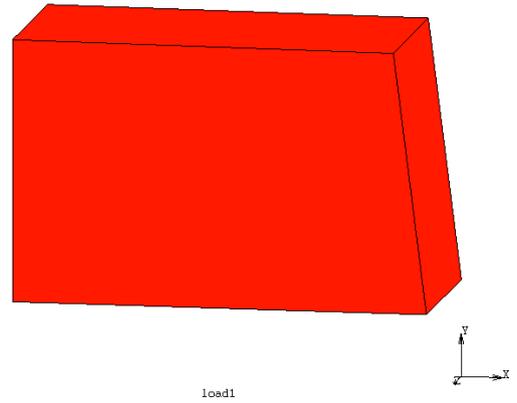
PCC7_CENTRO



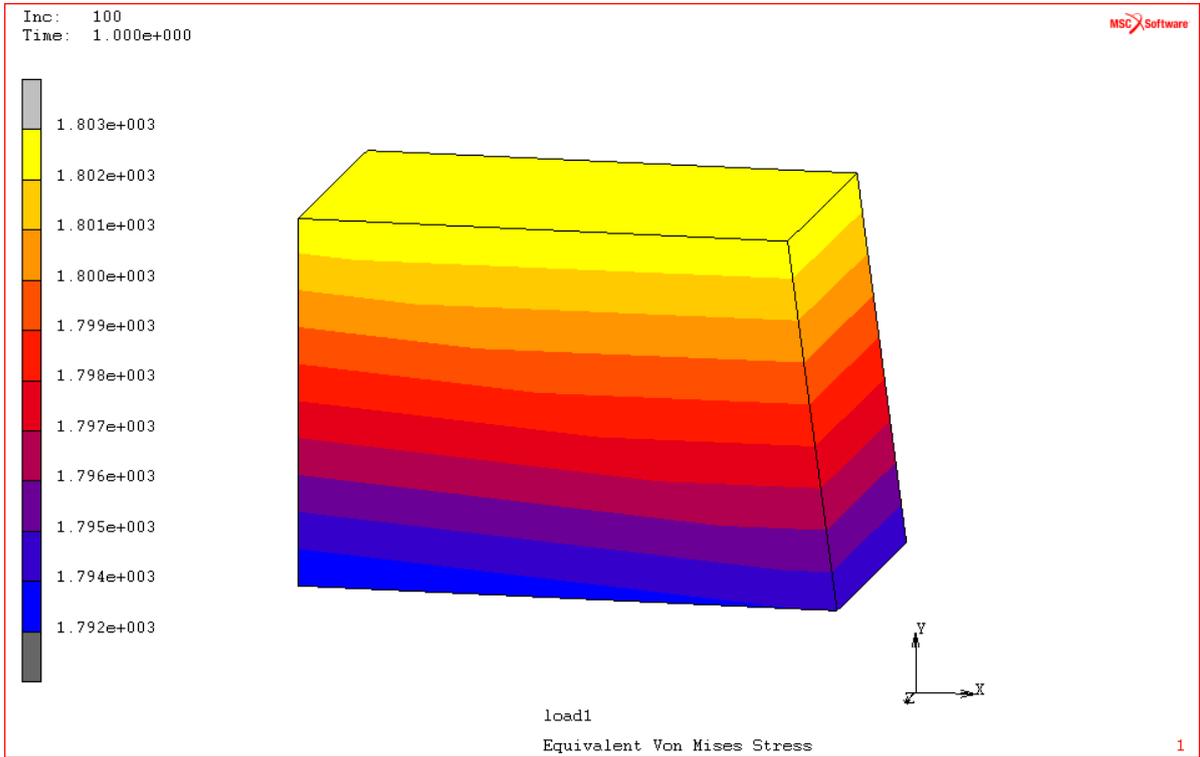
PCC7_BLANDA



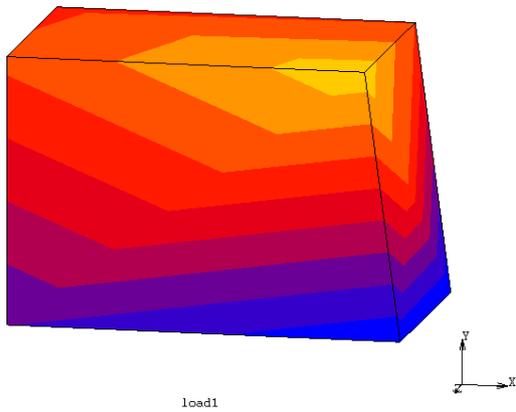
PCC7_DURA



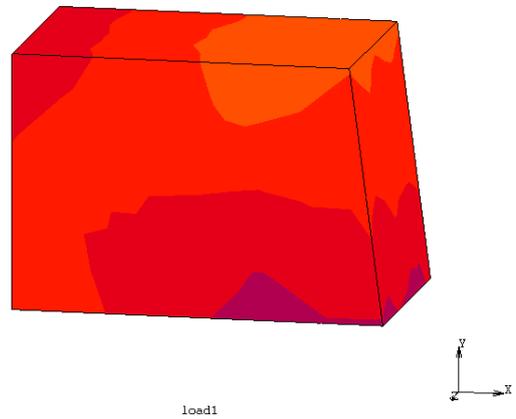
PCC7_ENTALLA



PCC7_BLANDA



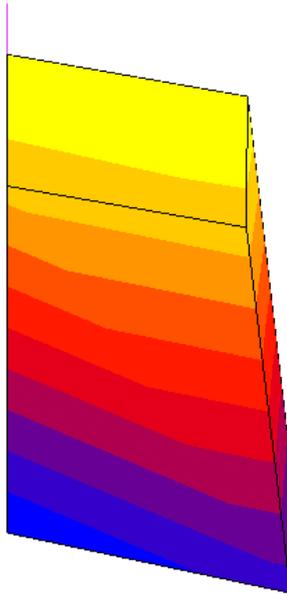
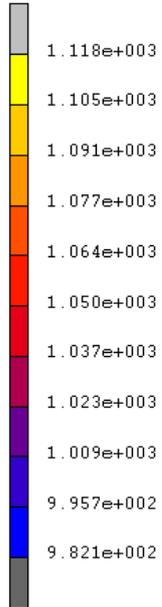
PCC7_DURA



0A

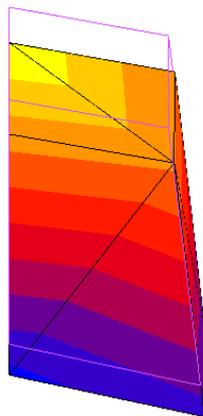
Inc: 200
Time: 2.000e+000

MSC Software



lcase1
Equivalent Von Mises Stress

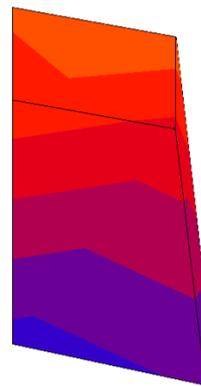
0A_BLANDA



lcase1



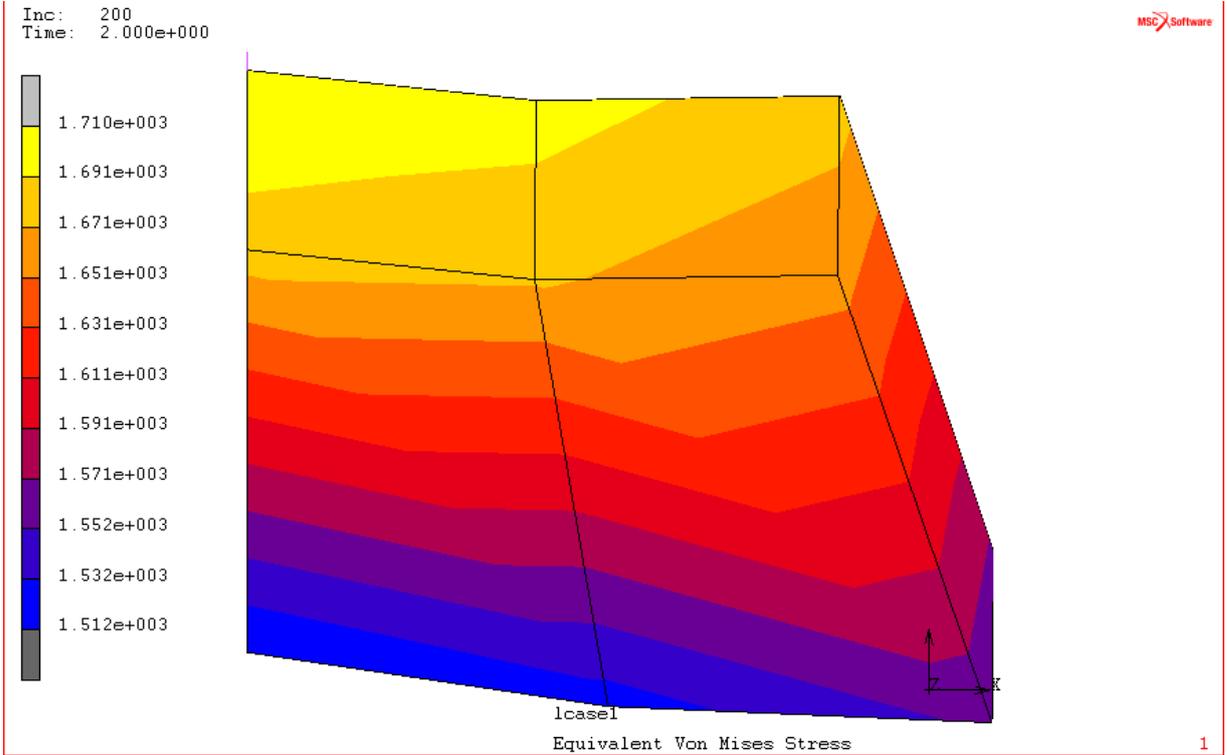
0A_DURA



lcase1

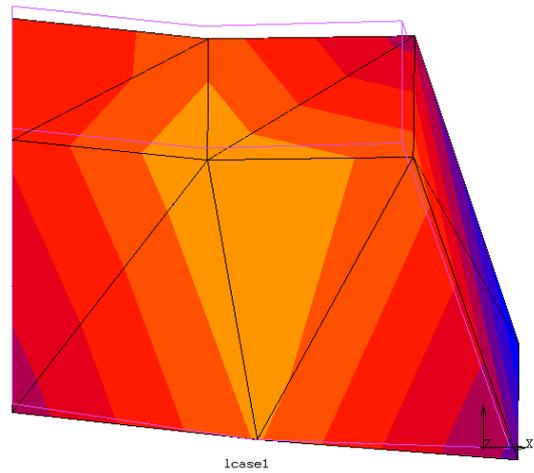
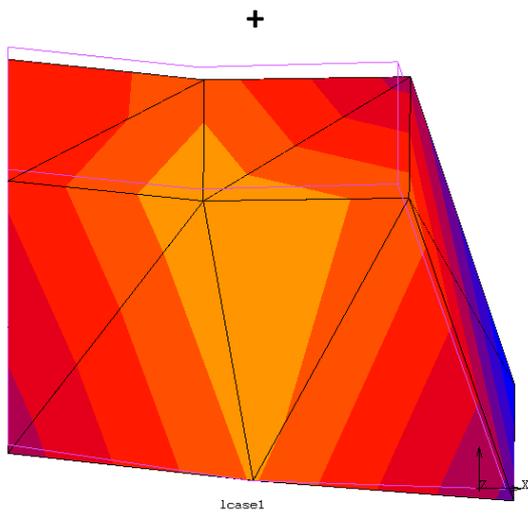


7A

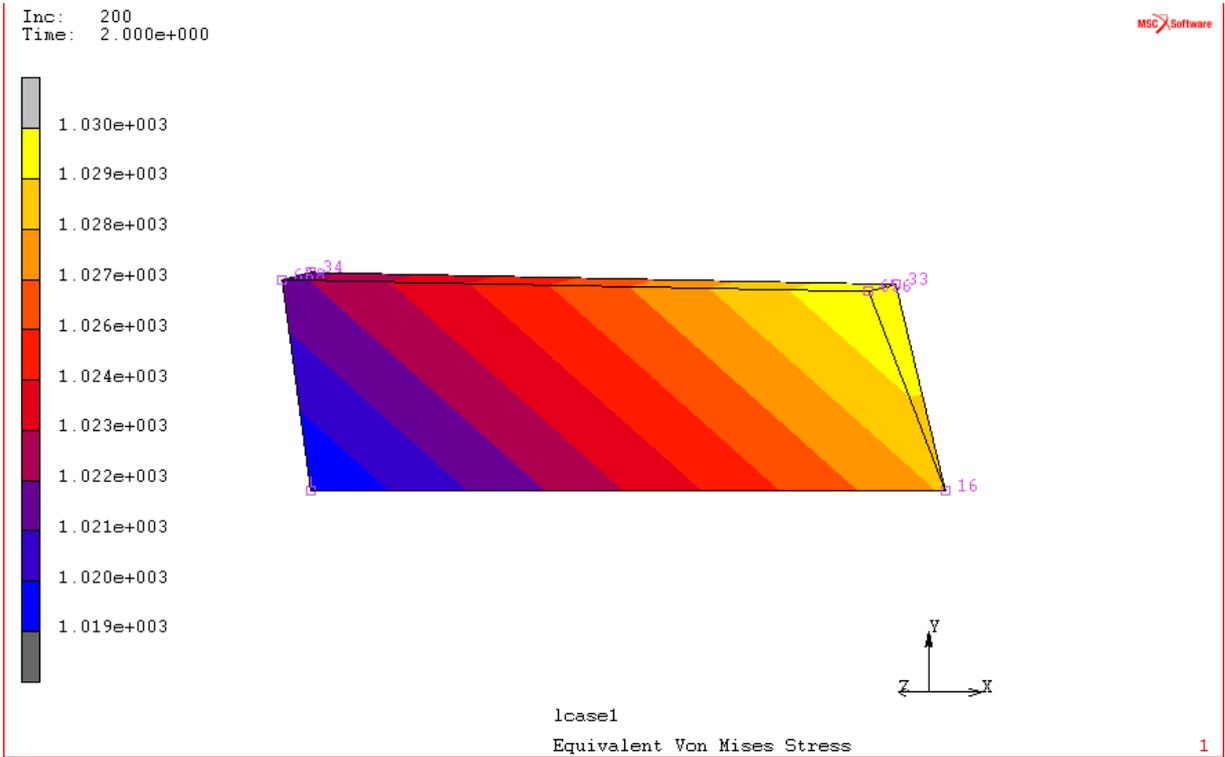


7A_BLANDA

7A_DURA



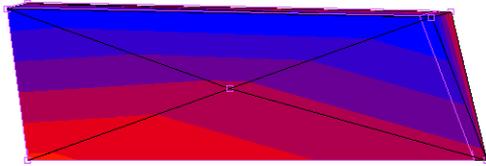
0B



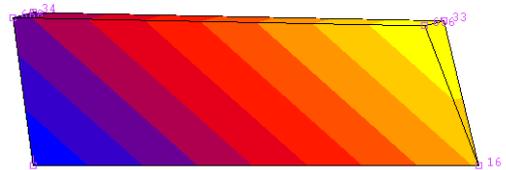
0B_BLANDA

+

0B_DURA



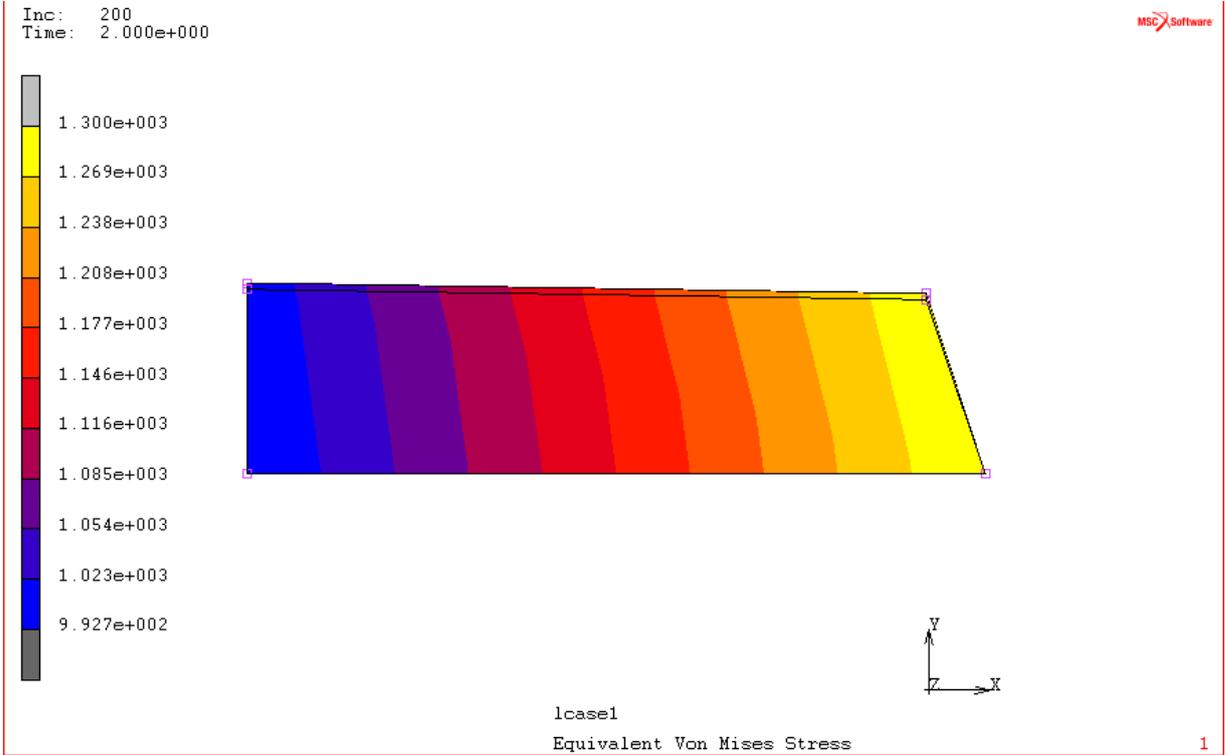
lcase1



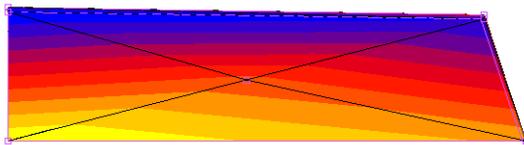
lcase1



7B



7B_BLANDA

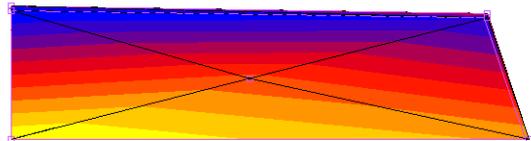


lcas1

+



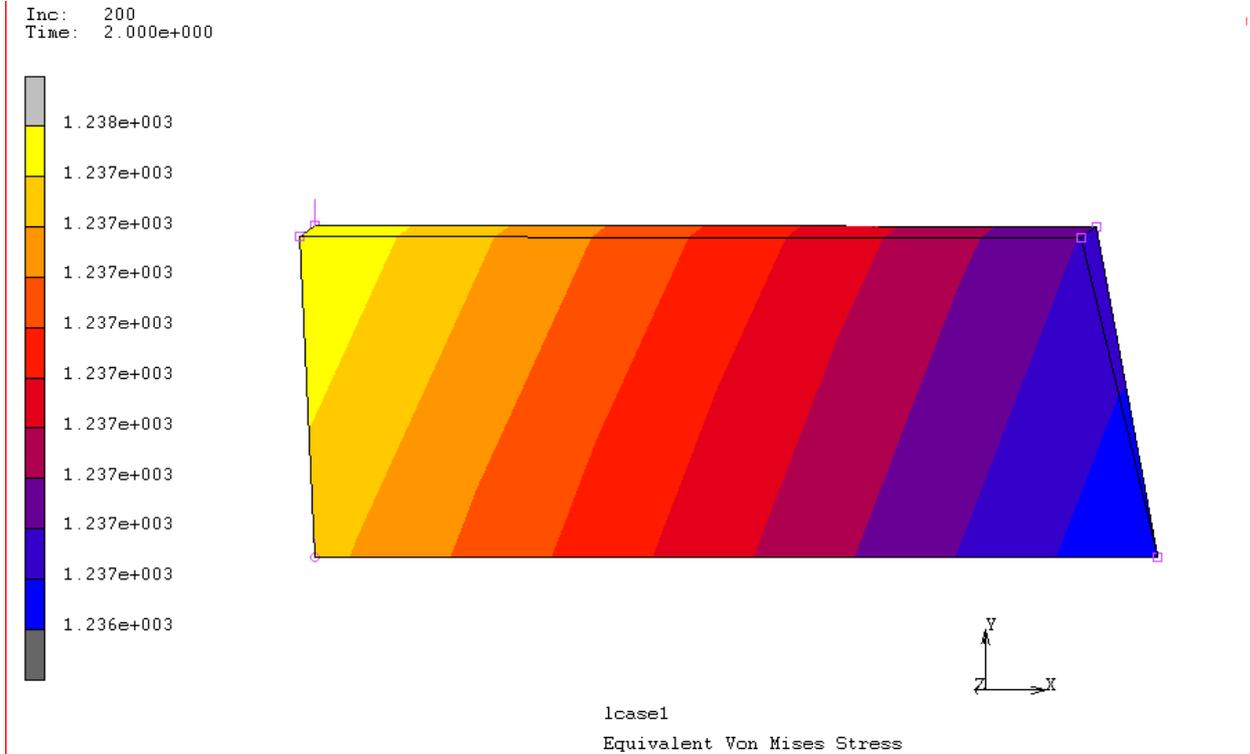
7B_DURA



lcas1



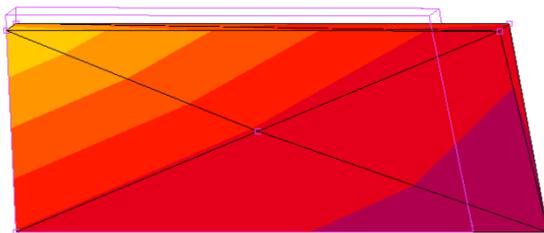
0C



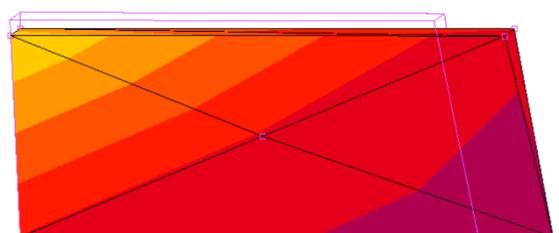
0C_BLANDA

0C_DURA

+



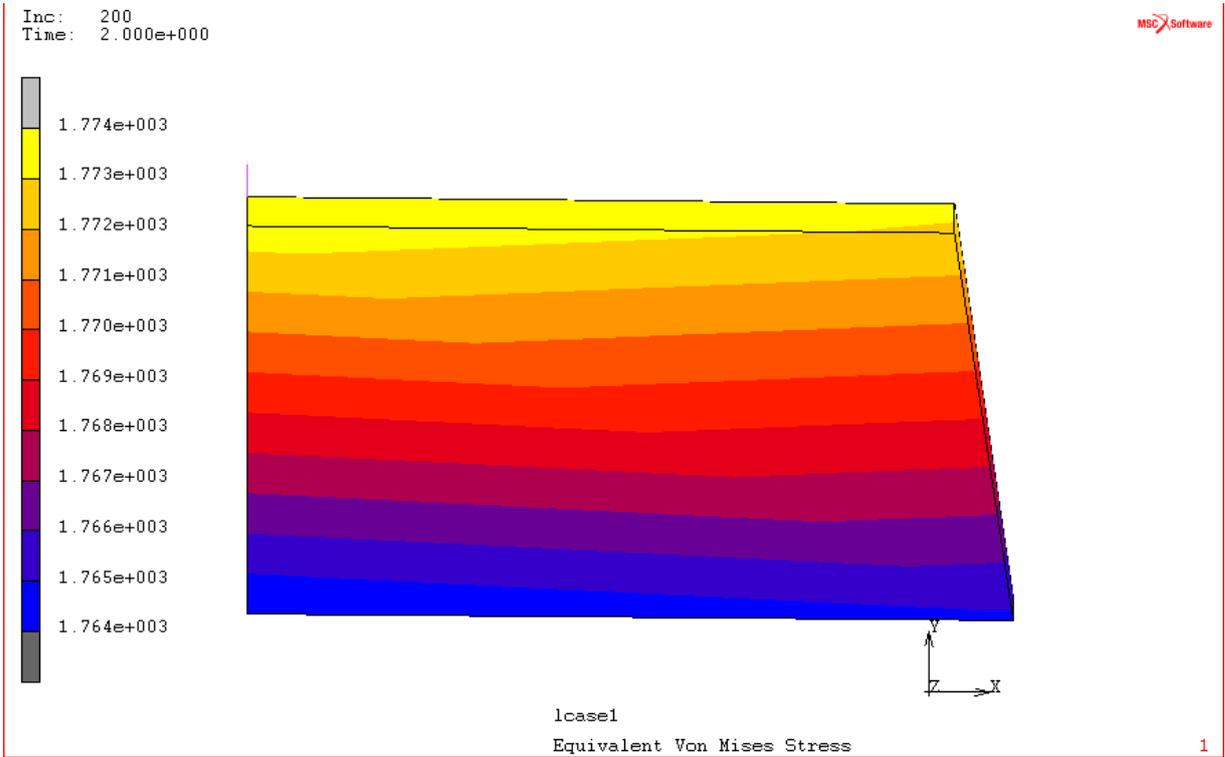
lcase1



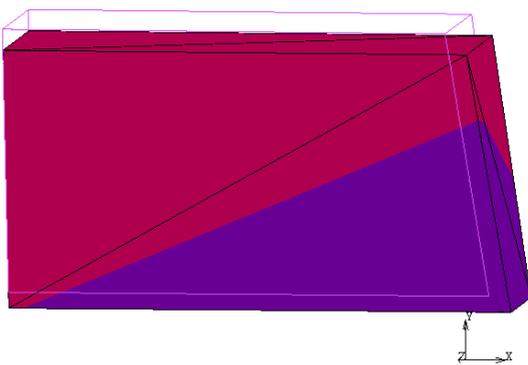
lcase1



7C

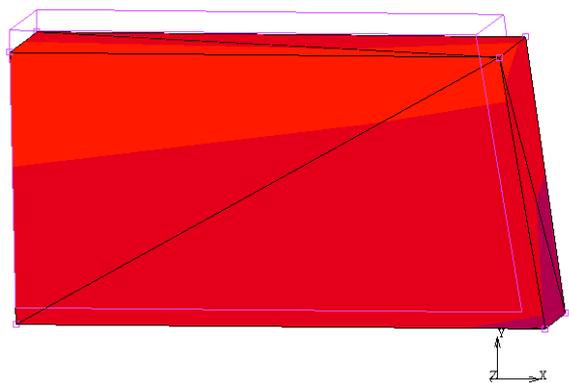


7C_BLANDA



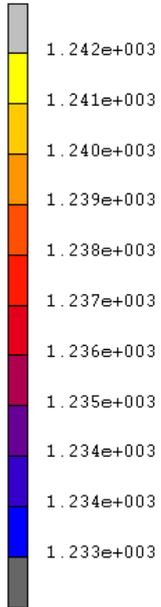
+

7C_DURA



0D

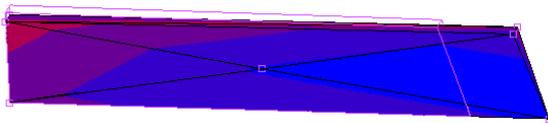
Inc: 200
Time: 2.000e+000



lcase1
Equivalent Von Mises Stress

0D_BLANDA

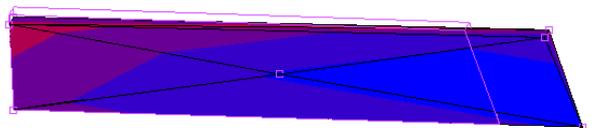
+



lcase1



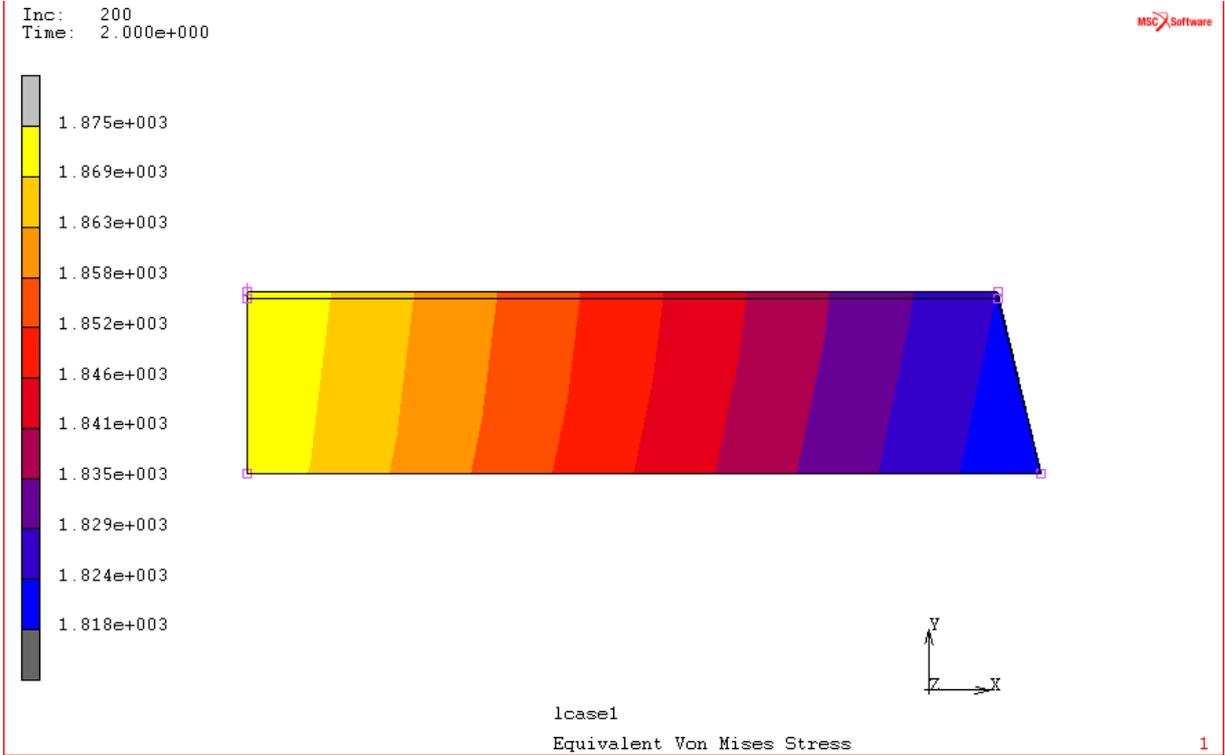
0D_DURA



lcase1

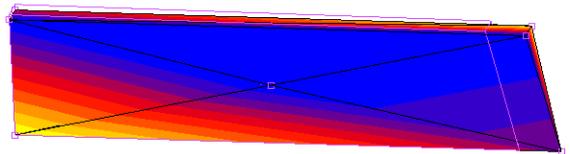
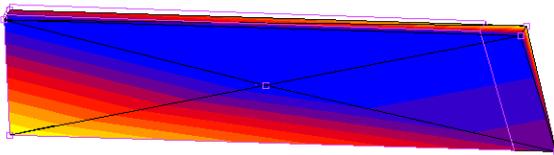


7D

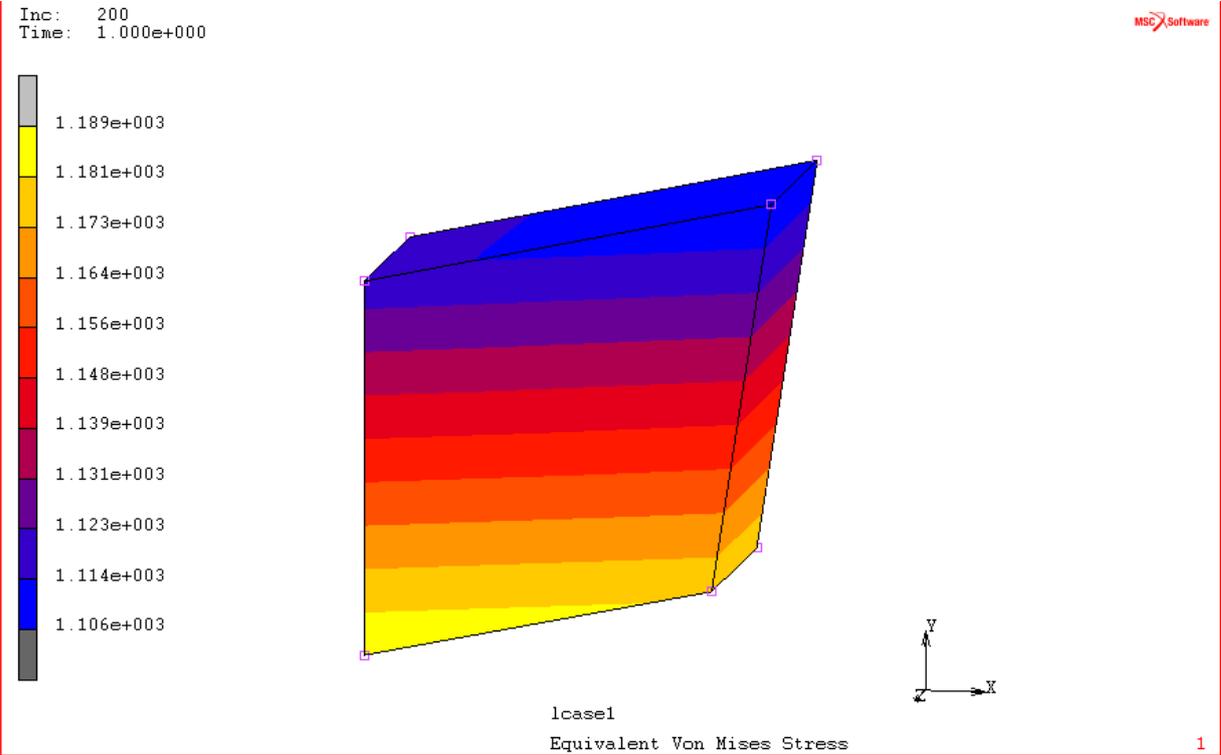


7D_BLANDA

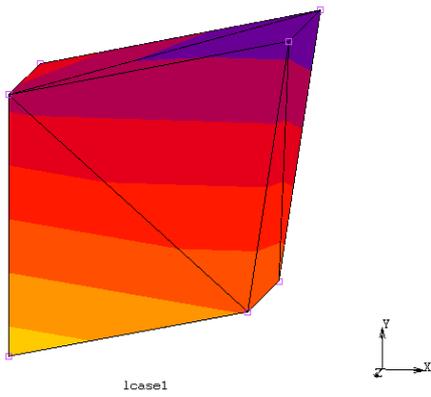
7D_DURA



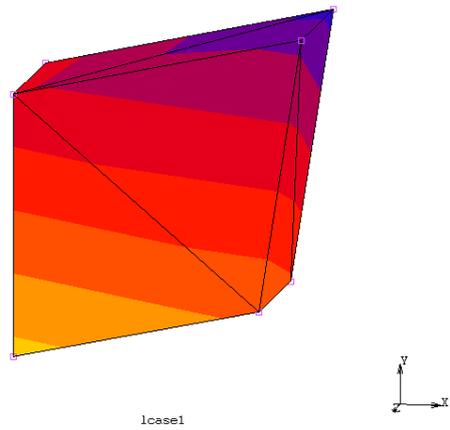
PA0



PA0_BLANDA



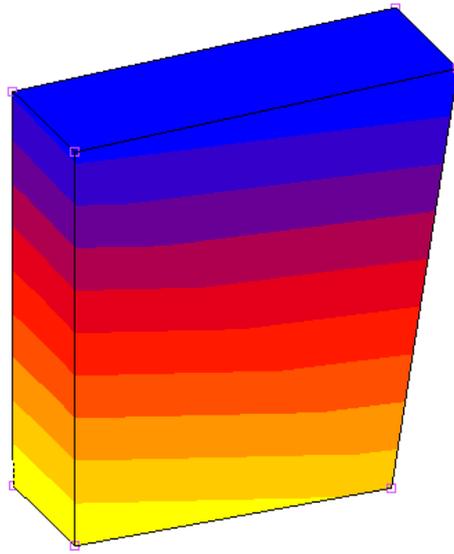
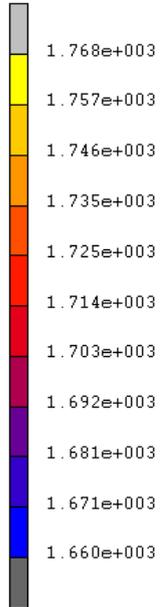
PA0_DURA



PA7

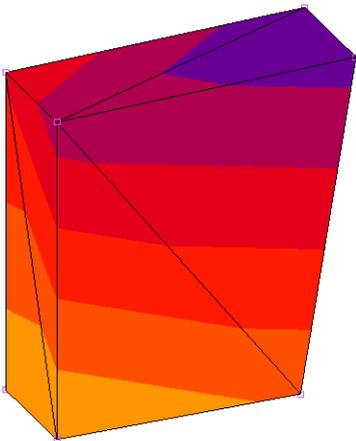
Inc: 200
Time: 1.000e+000

MSC Software



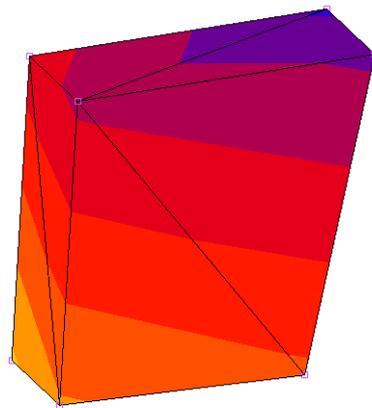
lcase1
Equivalent Von Mises Stress

PA7_BLANDA



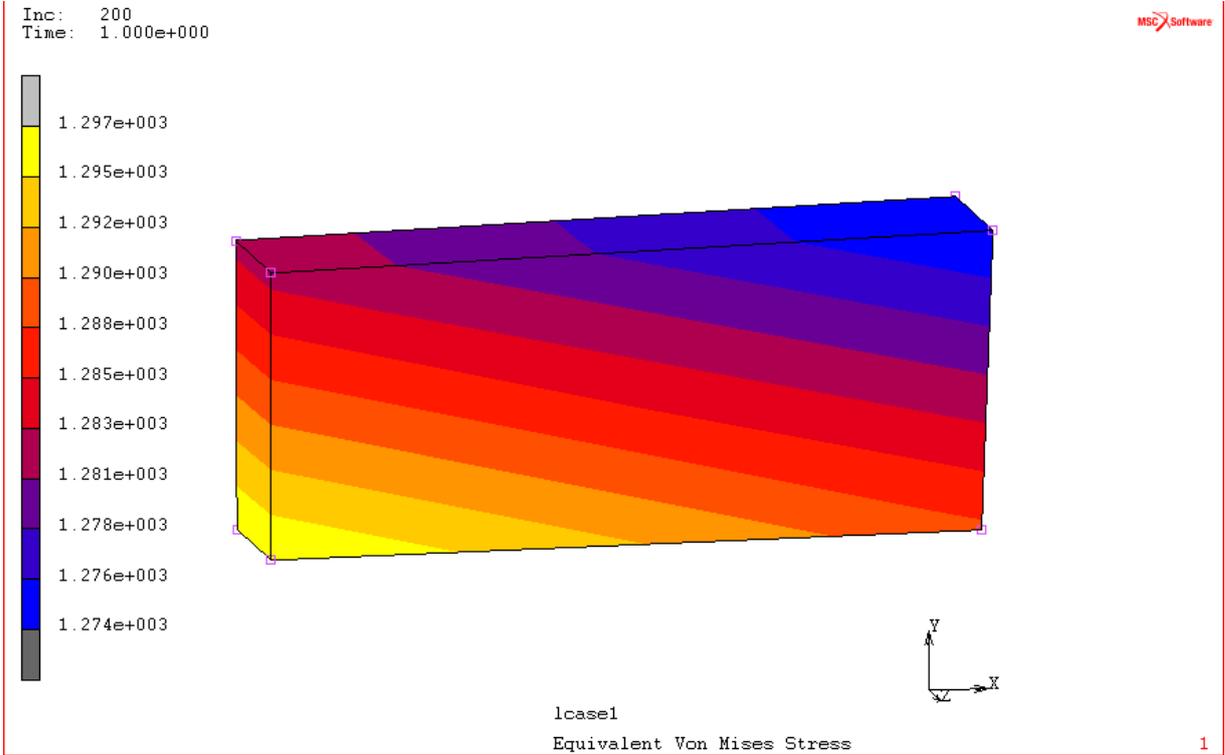
lcase1

PA7_DURA

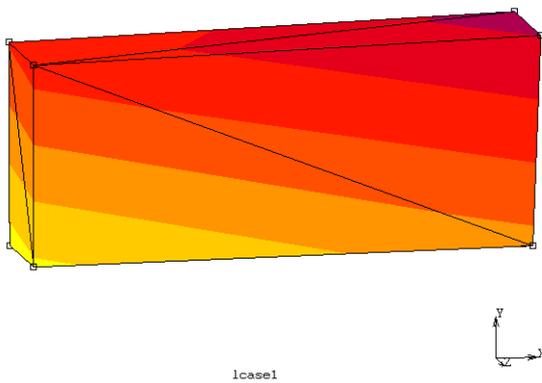


lcase1

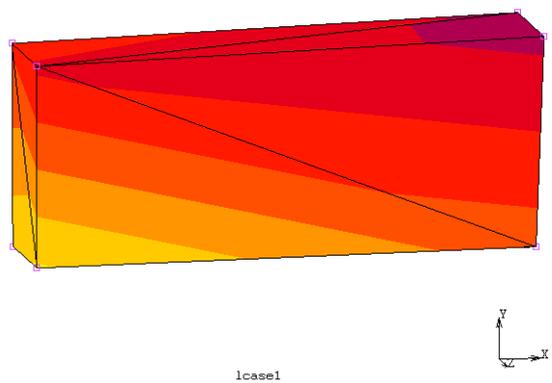
PC0



PC0_BLANDA

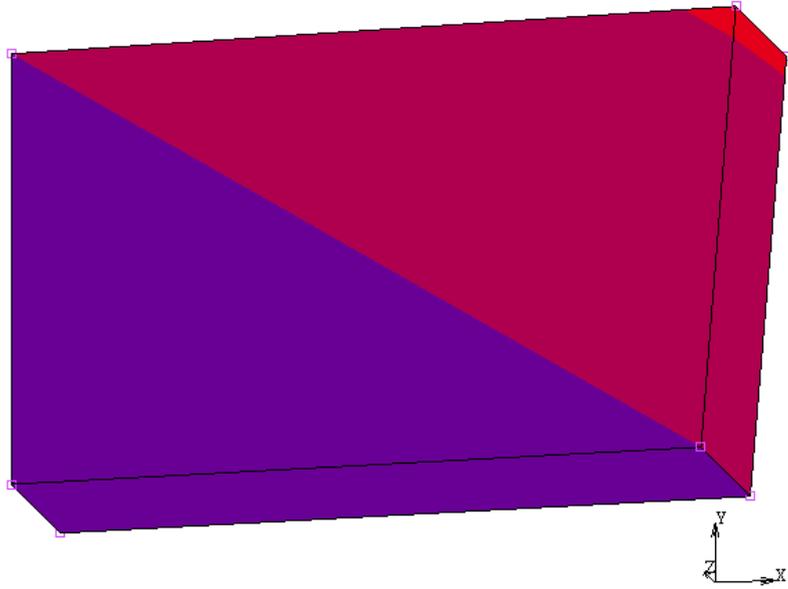
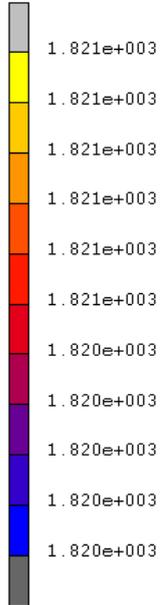


PC0_DURA



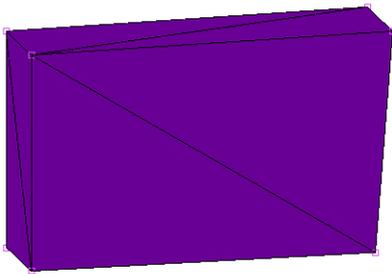
PC7

Inc: 200
Time: 1.000e+000



lcase1
Equivalent Von Mises Stress

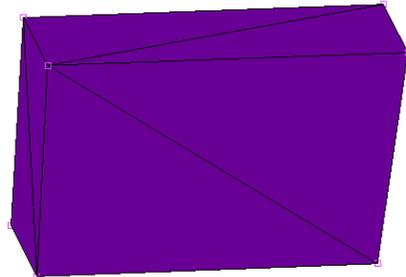
PC7_BLANDA



lcase1



PC7_DURA



lcase1

