

**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN FRACTURA E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL**



**TESIS DOCTORAL**

**COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE PROBETAS  
PRISMÁTICAS ENTALLADAS DE ACERO  
PERLÍTICO PROGRESIVAMENTE TREFILADO BAJO  
SOLICITACIONES DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN**

*por:*

MARÍA JESÚS JUÁREZ NÚÑEZ  
*Ingeniero de Materiales*

*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

M<sup>a</sup> Jesús Juárez Núñez

Jesús A. Toribio Quevedo

Fco. Javier Ayaso Yáñez

## RESUMEN

---

El principal objetivo de la presente Tesis es poner de manifiesto cómo la presencia de entallas induce cambios en el comportamiento mecánico y en fractura de probetas de acero perlítico con distinto grado de trefilado bajo solicitaciones de tracción y flexión; para ello la Tesis se vertebra en dos ejes fundamentales: el primero de ellos pretende establecer la susceptibilidad a la entallas de los aceros B0, B4 y B7 en los procesos que induzcan en ellos solicitaciones de tracción y flexión; y el segundo eje vertebrador consiste en determinar cuál es la influencia que las pequeñas desviaciones en el mecanizado, de las entallas de las probetas, inducen en el comportamiento en fractura de los aceros, cuáles son las variables que se ven más afectadas por el mismo y cuáles son aquellas en las que prevalece el mismo comportamiento a pesar de la diferencia existentes entre ellas.

Para realizar el presente trabajo se van a estudiar dos tipos fundamentales de entallado, el entallado tipo A y el entallado tipo C. El entallado tipo A presenta una entalla de pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad de penetración; el entallado tipo C, por el contrario, presenta un radio de curvatura mayor con la misma profundidad de penetración que la entalla tipo A. Para los ensayos realizados bajo solicitaciones de tracción se mecanizaron dos entallas del mismo tipo sobre tres especímenes de cada acero objeto de estudio, mientras que, para los ensayos de flexión por cuatro puntos la mecanización se restringe a una entalla situada a lo largo de la cara paralela al plano en el que se aplica la carga.

En el Capítulo I se procede a realizar una breve introducción en la que se detallan los objetivos de la tesis, así como los antecedentes que han dado lugar a ella y el porqué de la misma, así como se presentan las características mecánicas fundamentales del material objeto de ensayo (acero B) sobre el que se va a trabajar.

En el Capítulo II se desarrolla el proceso experimental, que comprende la descripción completa de los ensayos realizados, la presentación de los resultados obtenidos, así como la exposición de las primeras conclusiones que se derivan de los resultados que han sido observados en el transcurso del estudio.

En el Capítulo III se presenta el análisis fractográfico de las superficies de fractura generadas durante el procedimiento experimental. Se realiza un estudio detallado tanto desde el punto de vista numérico, con la toma de mediciones de cada una de las zonas, como desde el punto de vista textural. En el análisis de las texturas que se observan en la sección de rotura, se presentan levantamientos tridimensionales de las zonas más características y que han

presentado una buena disposición para ello. Estos levantamientos tridimensionales permiten una nueva visión de los procesos que han tenido lugar durante la fractura.

El Capítulo IV se dedica al estudio numérico mediante el método de los elementos finitos (MEF). Para ello se realizaron ensayos virtuales (de sollicitación a tracción y a flexión) de las mismas características que los ensayos realizados durante el procedimiento experimental. Los ensayos virtuales tienen lugar sobre una probeta que figura con las dimensiones reales que se han obtenido en el proceso de mecanizado y que por tanto ha sido objeto de ensayo durante el procedimiento experimental; por tanto la probeta ensayada en el laboratorio virtual tendrá los mismos parámetros de carga, de desplazamiento hasta rotura, etc, que aquella que ha sido ensayada en el laboratorio. Este estudio numérico aporta el análisis matemático que permite determinar el estado tenso-deformacional de la probeta en cualquier punto, en concreto en las zonas características del material, que en este estudio se centra en las zonas de entalla, permitiendo observar los posibles focos de inicio del proceso de fractura.

En el Capítulo V se analizan los resultados obtenidos en las fases experimental y numérica, se detalla el comportamiento de las diferentes morfologías en la sección de fractura a lo largo del proceso de trefilado y se hace un estudio exhaustivo que permite establecer las correlaciones directas entre la triaxialidad que proporciona el análisis numérico con la morfología que presenta la fractografía de la sección de rotura. Así mismo se determinan los factores de concentración de tensiones, teniendo el estudio un carácter tridimensional. El factor de concentración de tensiones se determinará en aquellos planos de trabajo en el que se verifiquen características especiales, así como se evaluará en dos instantes fundamentales: el instante de carga máxima y el instante previo a la rotura del material. Se hallarán los factores de endurecimiento y fortalecimiento por la presencia de entalla mediante un criterio extendido para dos entallas en el caso de las probetas solicitadas a tracción y, para finalizar, se determinaran los criterios de fractura para las probetas solicitadas a tracción y a flexión y se establecerá una relación directa entre ambos ensayos.

En el Capítulo VI se hace una exposición general de las conclusiones obtenidas en la Tesis, estructurado en dos partes: el análisis del comportamiento mecánico y el análisis fractográfico. En la primera parte se analiza el comportamiento mecánico desde un punto de vista general en el que se vinculan los resultados experimentales con los resultados numéricos obtenidos, aportando así una visión global de conjunto. En la segunda parte del capítulo en cuestión, se vinculan los resultados del estudio fractográfico y los resultados obtenidos a partir del estudio numérico. Esta forma de presentar las conclusiones obedece a un criterio que se beneficia del máximo vínculo que existe entre los procedimientos experimentales y el análisis numérico.

Se incorporan así mismo un total de cuatro Anexos con el fin de facilitar la lectura de la presente Tesis Doctoral como son: la fractografía comparada de las diferentes probetas (Anexo I), campos de tensión hidrostática y distribución de la tensión hidrostática y desplazamiento en los fondos de entalla (Anexo II), análisis de la distribución de las diferentes variables a lo largo del perfil del fondo de entalla (Anexo III) y análisis de la distribución de triaxialidad sobre la fractografía de la zona (Anexo IV).



## APORTACIONES ORIGINALES

---

- La recreación tridimensional incorporada en el análisis fractográfico ha permitido analizar fragmentos de material que de otro modo pasarían inadvertidos, puesto que ha hecho posible realizar levantamientos de cualquier parte de la superficie que se preste para ello, facilitando de este modo la observación de detalles fractográficos característicos, como son la presencia de cortados insertos en el material, la intersección de los diferentes planos de clivaje y la observación directa de la textura de los huecos inmersos, tanto en la zona de proceso de fractura como dentro de las facetas de clivaje, así como de la corona exterior.
- El análisis numérico aportado se ha llevado al extremo, realizando un trabajo minucioso en el que se han reproducido al detalle las diferencias existentes entre las diferentes mecanizaciones de las entallas de las probetas preparadas para el ensayo de tracción, presentando para ello un mallado cuasi-simétrico (ensayos de sollicitación a tracción) que permite visualizar de un modo claro las diferencias que se manifiestan entre las variables más características que concurren en el proceso de ensayo.
- La visualización tridimensional de las superficies que se definen a partir de las principales variables (deformación plástica, tensión equivalente de von Mises, tensión hidrostática) que rigen los diferentes procesos que tienen lugar en las probetas durante la carga, ha hecho posible visualizar el comportamiento de la evolución interna del material desde los primeros instantes de carga hasta el instante en que se produce la rotura del material por separación total de las superficies de fractura.
- El diseño minucioso de la forma geométrica de las entallas ha hecho posible una descripción de la influencia directa de la forma física de la geometría de las entallas en el proceso de rotura del material, permitiendo establecer la evolución durante la carga de las variables principales, así como facilitando la identificación de aquellas diferencias que se manifiestan como consecuencia de la geometría de las mismas y que podrían conducir a la rotura del material. La simulación del entallado real en las probetas virtuales ha inducido una mejora clara en la comprensión de los procesos que están teniendo lugar en el transcurso de la rotura del material y ha permitido, en función de la distribución de las trazas de los campos de tensión constante, establecer de forma razonable aquellos puntos del material en que se podrían localizar los focos de fractura, así como prever cómo va a ser la forma física de las superficies de fractura resultantes. Así mismo se ha determinado cuáles son las variables principales más



susceptibles a las pequeñas diferencias en la forma física de la geometría de las entallas y cuáles se manifiestan indiferentes ante este hecho.

- El análisis tridimensional realizado ha permitido, por tanto, la localización de los posibles focos de inicio del proceso de fractura, estableciéndose una relación directa entre la distribución de los campos de tensión constante en la superficie de fractura y la forma física de la rotura de la probeta.
- La reunión de la fractografía junto con el análisis numérico ha dado como resultado el establecimiento y la acotación de las distintas zonas de fractura en los diferentes tipos de acero analizado, permitiendo establecer, a partir del diseño numérico, una acotación de los entornos del material, en las que quedarían delimitadas las diferentes zonas en las que se localizan los diferentes micro-mecanismos básicos de fractura del material.
- El establecimiento del factor de concentración de tensiones en los ensayos de tracción y de flexión, así como el estudio detallado de las tensiones perpendiculares al plano de entalla, han determinado una correlación directa entre los ensayos de tracción y de flexión en la cual se ha establecido una tensión de rotura para el material. Esta tensión de rotura ha resultado independiente del tipo de sollicitación que esté actuando sobre ella, de modo que ha sido establecido de modo claro un *criterio de fractura global* para cada uno de los aceros presentes.

## AGRADECIMIENTOS

---

Se hace necesario en este punto agradecer a quienes directa o indirectamente han colaborado en el desarrollo de la presente Tesis y en particular a:

- A mis directores de Tesis: Dr. Jesús Andrés Toribio Quevedo, Catedrático de la Universidad de Salamanca y Director del Grupo de Investigación en Fractura e Integridad Estructural (GIFIE) y a D. Francisco Javier Ayaso Yáñez, Doctor por la Universidad de La Coruña y Profesor Titular de la Universidad de Salamanca, por brindarme sus capacidades y conocimientos científicos, así como su esfuerzo y dedicación en el transcurso del desarrollo de la Tesis.
- A los Doctores Viktor Kharin Serafimovich, Miguel Ángel Lorenzo Fernández y Beatriz González Martín, profesores de la Universidad de Salamanca, porque es a ellos a quienes les debo, sin lugar a dudas, mis comienzos en el mundo del cálculo numérico.
- Al Grupo de Investigación en Fractura e Integridad Estructural (GIFIE) de la Universidad de Salamanca por facilitar todas las investigaciones previas que han concluido con este nuevo enfoque, así como por el aporte de los datos relativos a las curvas de comportamiento (tensión vs deformación plástica) de los materiales utilizados en la presente Tesis (B0, B4 y B7).
- A D. Juan José Morillo Vega, técnico de los laboratorios de Ensayos Mecánicos y Análisis Microestructural, por el saber hacer que ha permitido la consecución correcta de los ensayos realizados.
- A D. Javier Valcárcel que fue el impulsor en sus comienzos y que facilitó parte del trabajo experimental.
- A D. Rubén Tino Ramos por ser un gran compañero de fatigas a lo largo de todo el Doctorado.
- A mi familia y amigos por su comprensión y apoyo.



## ÍNDICE

### CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DE LA TESIS.....	3
3. ANTECEDENTES.....	7
4. EL MATERIAL DE ENSAYO.....	9

### CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Probetas prismáticas para solicitaciones de tracción.....	11
1.2. Probetas prismáticas para solicitaciones de flexión por 4 puntos.....	12
1.3. Presentación de los datos experimentales.....	13
2. ENSAYOS BAJO SOLICITACIONES DE TRACCIÓN.....	14
2.1. Medidas de mecanización primaria, adquisición de forma prismática. Medidas de mecanización secundaria.....	14
2.2. Sistema de designación de las probetas.....	16
2.3. Dimensiones resultantes del mecanizado de la entalla.....	17
2.4. El ensayo de tracción.....	19
2.5. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PAA.....	22
2.5.1. Acero B0 con entalla tipo AA.....	22
2.5.2. Acero B4 con entalla tipo AA.....	23
2.5.3. Acero B7 con entalla tipo AA.....	24
2.5.4. Comparación de resultados experimentales: probetas tipo PAA.....	25
2.6. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PCC.....	25
2.6.1. Acero B0 con entalla tipo CC.....	25
2.6.2. Acero B4 con entalla tipo CC.....	26
2.6.3. Acero B7 con entalla tipo CC.....	27
2.6.4. Comparación de resultados: probetas PCC.....	29
2.7. Probetas prismáticas entalladas PAA vs. PCC.....	29
3. ENSAYOS BAJO SOLICITACIONES DE FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS.....	32
3.1. Medidas de mecanización primaria. Adquisición de forma prismática. Medidas de mecanización secundaria.....	32
3.2. Sistema de designación de las probetas.....	34

3.3. Dimensiones resultantes del mecanizado de la entalla.....	35
3.4. El ensayo de flexión.....	36
3.5. Presentación de las curvas carga-desplazamiento.....	39
3.6. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PA.....	40
3.6.1. Acero B0 con entalla tipo A.....	40
3.6.2. Acero B4 con entalla tipo A.....	41
3.6.3. Acero B7 con entalla tipo A.....	43
3.6.4. Comparación de resultados experimentales: probetas tipo PA.....	45
3.7. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PC.....	46
3.7.1. Acero B0 con entalla tipo C.....	46
3.7.2. Acero B4 con entalla tipo C.....	47
3.7.3. Acero B7 con entalla tipo C.....	49
3.7.4. Comparación de resultados: probetas tipo PC.....	51
3.8. Probetas prismáticas entalladas PA vs. PC.....	52

## CAPÍTULO III: ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

1. INTRODUCCIÓN.....	55
2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO: PROBETAS PRISMÁTICAS DE TRACCIÓN.....	61
2.1. Análisis fractográfico de la muestra B0-AA.....	61
2.2. Análisis fractográfico de la muestra B4-AA.....	68
2.3. Análisis fractográfico de la muestra B7-AA.....	77
2.4. Análisis fractográfico de la muestra B0-CC.....	84
2.5. Análisis fractográfico de la muestra B4-CC.....	91
2.6. Análisis fractográfico de la muestra B7-CC.....	98
2.7. Análisis cuantitativo de las superficies de fractura.....	104
3. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO: PROBETAS PRISMÁTICAS DE FLEXIÓN.....	106
3.1. Análisis fractográfico de la muestra B0-A.....	106
3.2. Análisis fractográfico de la muestra B4-A.....	112
3.3. Análisis fractográfico de la muestra B7-A.....	118
3.4. Análisis fractográfico de la muestra B0-C.....	124
3.5. Análisis fractográfico de la muestra B4-C.....	130
3.6. Análisis fractográfico de la muestra B7-C.....	135
3.7. Análisis cuantitativo de las superficies de fractura.....	139

## CAPITULO IV: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

1. INTRODUCCIÓN.....	143
1.1. Consideraciones sobre el proceso de cálculo.....	145
1.2. Consideraciones sobre el material empleado.....	146
1.3. Evaluación de las variables internas.....	148
2. SIMULACIÓN DEL ENSAYO BAJO SOLICITACIÓN DE TRACCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	149
2.1. Análisis numérico de la muestra B0-AA.....	152
2.1.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	153
2.1.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	156
2.1.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	158
2.1.4. <i>Evolución de las variables internas en el fondo de entalla</i> .....	160
2.2. Análisis numérico de la muestra B4-AA.....	161
2.2.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	163
2.2.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	164
2.2.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	165
2.2.4. <i>Evolución de las variables internas en el fondo de entalla</i> .....	166
2.3. Análisis numérico de la probeta B7-AA.....	168
2.3.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	169
2.3.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	171
2.3.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	172
2.3.4. <i>Evolución de las variables internas en el fondo de entalla</i> .....	173
2.4. Análisis numérico de la probeta B0-CC.....	176
2.4.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	177
2.4.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	179
2.4.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	181
2.4.4. <i>Evolución de las variables internas en el fondo de entalla</i> .....	182
2.5. Análisis numérico de la muestra B4-CC.....	183
2.5.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	185
2.5.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	185
2.5.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	186
2.5.4. <i>Evolución de las variables internas en el fondo de entalla</i> .....	187
2.6. Análisis numérico de la muestra B7-CC.....	189
2.6.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	191
2.6.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	191

2.6.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	192
2.6.4. <i>Evolución de las variables internas en el fondo de entalla</i> .....	194
3. SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS BAJO SOLICITACIÓN DE FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	196
3.1. Análisis numérico de la muestra B0-A.....	198
3.1.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	199
3.1.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	200
3.1.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	203
3.2. Análisis numérico de la muestra B4-A.....	204
3.2.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	205
3.2.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	206
3.2.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	207
3.3. Análisis numérico de la muestra B7-A.....	208
3.3.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	209
3.3.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	210
3.3.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	211
3.4. Secciones de fractura de las probetas prismáticas entalladas tipo PA.....	212
3.5 Análisis numérico de la muestra B0-C.....	213
3.5.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	214
3.5.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	216
3.5.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	217
3.6. Análisis numérico de la muestra B4-C.....	219
3.6.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	220
3.6.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	221
3.6.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	222
3.7. Análisis numérico de la muestra B7-C.....	223
3.7.1. <i>Deformación plástica equivalente</i> .....	224
3.7.2. <i>Tensión equivalente o efectiva de von Mises</i> .....	225
3.7.3. <i>Análisis de la sección de rotura</i> .....	226
3.8. Secciones de fractura de las probetas prismáticas entalladas tipo PC.....	227

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

1. CURVAS F-U.....	229
1.1. Probetas prismáticas entalladas.....	229
1.2. Evolución de los parámetros $F_{MAX}$ y $W_R$ con el grado de trefilado.....	231

2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO.....	234
2.1. Micromecanismos básicos de fractura vs triaxialidad.....	237
3. ANÁLISIS NUMÉRICO.....	244
3.1. Análisis del comportamiento, en función del grado de trefilado, de las principales variables internas en las probetas tipo PAA.....	244
3.2. Análisis del comportamiento, en función del grado de trefilado, de las principales variables internas en las probetas tipo PCC.....	247
3.3 Estudio global de las probetas entalladas tipo PAA y PCC.....	250
3.3.1. Factor de endurecimiento por la presencia de entallas.....	252
3.3.2. Factor de fortalecimiento por la presencia de entallas.....	253
3.3.3. Factor de concentración.....	254
3.3.4. Factor de concentración de tensiones en la probeta tipo PAA.....	257
3.3.5. Factor de concentración de tensiones en la probeta tipo PCC.....	259
3.3.6. Criterio de fractura.....	261
3.4. Análisis del comportamiento en función del grado de trefilado de las principales variables internas en las probetas tipo PA.....	264
3.5. Análisis del comportamiento en función del grado de trefilado de las principales variables internas en las probetas tipo PC.....	267
3.6. Estudio global de las probetas entalladas tipo PA y PC.....	270
3.6.1. Factor de concentración.....	272
3.6.2. Factor de concentración de tensiones en la probeta entallada PA.....	272
3.6.3. Factor de concentración de tensiones en la probeta entallada PC.....	273
3.6.4. Criterio de fractura.....	274
3.7. Criterio de fractura general.....	275
3.7.1. Criterio de fractura respecto la tensión equivalente de von Mises.....	275
3.7.2. Factor de concentración de tensiones.....	276

## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

1. COMPORTAMIENTO MECÁNICO.....	281
1.1. Descripción.....	281
1.2. Análisis numérico vinculado al comportamiento mecánico.....	283
2. ANÁLISIS DE FRACTOGRÁFICO.....	284
2.1. Descripción.....	284
2.2. Triaxialidad vs. Micromecanismos de fractura.....	285



**BIBLIOGRAFÍA**.....287

**ANEXOS**

**ANEXO I:**

SUPERFICIES DE FRACTURA DE LAS DISTINTAS PROBETAS ENSAYADAS.....A1

**ANEXO II:**

CAMPOS DE TENSIÓN HIDROSTÁTICA, DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN HIDROSTÁTICA  
Y DESPLAZAMIENTO EN LOS FONDOS DE ENTALLA .....A23

**ANEXO III:**

DISTRIBUCIÓN DE LAS VARIABLES PRINCIPALES A LO LARGO DEL PERFIL DEL FONDO  
DE ENTALLA.....A37

**ANEXO IV:**

TRIAxIALIDAD VS FRACTOGRAFÍA.....A51

## SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

---

A	Entalla de radio pequeño y profundidad pequeña
$A_{CE}$	Área de la corona exterior
$A_0$	Área transversal inicial
$A_T$	Área de la sección de rotura
$A_{ZI}$	Área de la zona intermedia
$A_{ZPF}$	Área de la zona de proceso de fractura
B	Lado de la probeta resultante
C	Entalla de radio amplio y profundidad pequeña
C	Clivaje
C	Profundidad de entalla
CE	Corona o labio dúctil cortante
CMH	Coalescencia de microhuecos
CMH *	Coalescencia de microhuecos en la ZPF
D	Distancia entre los apoyos superiores del ensayo de flexión
$e$	Deformación ingenieril
E	Módulo de elasticidad
EXP	Experimental
F	Carga
$F_{Máx}$	Carga Máxima
FE	Sección definida a través del punto central del perfil del fondo de entalla
H	Longitud total (probetas de flexión)
Hex	Tipo de elemento utilizado para el cálculo MEF
ICM	Instante de carga máxima
INC	Instante de cálculo
INST	Instante
IRP	Instante de rotura de la probeta
$K_t$	Factor de concentración de tensiones
$K_{t(FE)}$	Factor de concentración de tensiones establecido en el plano definido por el punto central del perfil del fondo de entalla

$K_{t(ICM)}$	Factor de concentración de tensiones establecido en el instante de carga máxima
$K_{t(IRP)}$	Factor de concentración de tensiones establecido en el instante de rotura
$K_{t(\sigma_{Lm\acute{a}x})}$	Factor de concentración de tensiones establecido en el plano definido por el valor máximo de la tensión axial
$l_0$	Base de medida
L	Longitud
L	Distancia entre los apoyos inferiores del ensayo de flexión
$L_{AI}$	Longitud del ancho inferior
$L_{AM}$	Longitud del ancho mitad
$L_{AS}$	Longitud del ancho superior
$L_M$	Longitud de la probeta en la sección media
$L_T$	Máxima longitud de la probeta sin entalla
MÁX	Sección definida a partir del valor máximo de una variable
MEF	Método de elementos finitos
MEB	Microscopio electrónico de barrido
MET	Microscopio electrónico de transmisión
PA	Probetas prismáticas con una única entalla tipo A (solicitud de flexión)
PAA	Probetas prismáticas con dos entallas tipo A (solicitud de tracción)
PC	Probetas prismáticas con una única tipo C (solicitud de flexión)
PCC	Probetas prismáticas con dos entallas tipo C (solicitud de tracción)
TRC	Tubo de rayos catódicos
R	Radio de la entalla
s	Tensión ingenieril
t	Triaxialidad tensional
u	Desplazamiento
$u_p$	Desplazamiento del puente
W	Canto de la probeta
$W_R$	Trabajo necesario para llegar a la rotura del material
x	Distancia del punto de observación al fondo de entalla
y	Distancia del punto de observación al origen del eje
ZI	Zona intermedia

ZPF	Zona de proceso de fractura
$\alpha$	Ángulo de contracción
$\Delta C$	Variación en la profundidad de penetración
$\Delta \xi$	Variación en la distancia entre flancos de entalla
$\Delta \varepsilon_p$	Variación de la deformación plástica
$\Delta \bar{\varepsilon}^p$	Variación de la deformación plástica equivalente
$\Delta l$	Extensión de la longitud de la probeta
$\Delta \sigma$	Variación e la tensión hidrostática
$\Delta \bar{\sigma}$	Variación de la tensión equivalente de von Mises
$\Delta t$	Variación en el factor de triaxialidad
$\Delta u$	Variación en el desplazamiento
$\xi$	Distancia entre flancos de entalla
$\varepsilon$	Deformación verdadera
$\varepsilon$	Deformación plástica
$\varepsilon_e$	Componente elástica de la deformación verdadera
$\varepsilon_p$	Componente plástica de la deformación verdadera
$\varepsilon_R$	Deformación en el instante de rotura
$\varepsilon$	Tensor de deformaciones
$\varepsilon^P$	Tensor de deformaciones plásticas
$\bar{\varepsilon}^p$	Deformación plástica equivalente
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Factor de fortalecimiento por entalla
$\lambda_Y$	Factor de endurecimiento por entalla
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma$	Tensión verdadera
$\sigma$	Tensión hidrostática
$\sigma$	Tensor de tensiones
$\sigma'$	Tensor desviador de tensiones
$\sigma_{Axial}$	Tensión perpendicular al plano de entalla
$\sigma_L$	Tensión axial (eje longitudinal del alambre de acero <i>original</i> de las probetas)
$\sigma_{Lm}$	Tensión axial media (perpendicular al plano de entalla)
$\sigma_{Lm\acute{a}x}$	Tensión axial máxima (perpendicular al plano de entalla)
$\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$	Tensión equivalente de von Mises, máxima

$\bar{\sigma}_{med}$	Tensión equivalente de von Mises, media
$\bar{\sigma}_{min}$	Tensión equivalente de von Mises, mínima
$\bar{\sigma}_{min}$	Tensión equivalente de von Mises, mínima
$\sigma_N$	Tensión neta
$\sigma_{Nmáx}$	Tensión neta máxima
$\sigma_R$	Resistencia a tracción
$\sigma_X$	Tensión axial (eje X)
$\sigma_Y$	Tensión axial (eje Y)
$\sigma_y$	Límite elástico
$\bar{\sigma}$	Tensión equivalente de von Mises
$\Phi$	Diámetro
$\omega$	Densidad de energía de deformación

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Acontecimientos recientes como la catástrofe del *Prestige*, la rotura de la presa de Nueva Orleans, y la fuga de los componentes radiactivos de la central nuclear de Fukushima han puesto, si cabe más, de manifiesto la importancia del esclarecimiento del comportamiento mecánico de los materiales que se utilizan habitualmente en las construcciones. Esto ha incrementado el interés por establecer, así como por tratar de predecir, cuál es el comportamiento que presentan los materiales cuando en ellos tienen lugar el proceso de fractura, así como las causas que lo provocan.

Cualquier estructura material está sujeta a un posible de fallo cuando ésta es sometida a un proceso de carga; esto indica la necesidad de establecer el comportamiento tenso-deformacional riguroso de modo que se establezcan las máximas garantías para asegurar la *integridad estructural* de la misma. Muchos son los aspectos que pueden influir en la deformación y finalmente la fractura de las estructuras. A groso modo, las principales causas de fallo de una estructura se podrían agrupar en: fallos mecánicos, fallos metalúrgicos y fallos por condiciones de trabajo (LIU, 2005). La mayoría de los fallos mecánicos son consecuencia de las condiciones de carga, así como de la geometría de las piezas involucradas, estos fallos

así mismo se pueden encadenar produciendo un fallo global o local por inestabilidad estructural. Los fallos metalúrgicos están directamente relacionados con la estructura de la red, la fase de los constituyentes presentes, la presencia de impurezas o el tamaño de grano, y por último, y no menos importante, los fallos debidos a las condiciones de trabajo. La interacción entre los metales y el ambiente en el que se encuentran es determinante, puesto que pueden acontecer fallos como consecuencia de la temperatura de trabajo, así como de la corrosión fruto de los elementos presentes. Por todo ello en el análisis del fallo de cualquier estructura es necesario clarificar tanto los aspectos macroscópicos como los microscópicos que tienen lugar en la fractura de los materiales.

A nivel microscópico, la comprensión de los mecanismos de deformación ha sido sujeta a numerosos estudios por parte de la metalurgia mecánica (SMALLMAN, NGAN, 2007), desarrollando gran comprensión de las estructuras cristalinas y de los sistemas de deslizamiento involucrados en el proceso de deformación. A nivel macroscópico es necesario establecer la relación tenso-deformacional existente en la estructura o material objeto de estudio. El análisis tenso-deformacional requiere, actualmente, el uso de métodos basados en el análisis numérico, así como la utilización de métodos experimentales que conlleven a establecer, lo más precisa y rigurosamente que sea posible, cuándo una estructura se vuelve inestable y puede acontecer en ella el proceso de fractura.

La fractura se entiende como el proceso de separación total o parcial de una estructura material. La caracterización de los fenómenos mecánicos que tienen lugar durante el proceso de fractura son estudiados por la Mecánica de la Fractura (MARTÍN, MARTÍNEZ, 2003). La fractura de un material suele ocurrir por la propagación simultánea de multitud de pequeñas fisuras a través del mismo. Estas pequeñas fisuras se encuentran presentes en todo el sólido debido a que los materiales no son perfectos y presentan defectos que se generan en todos los procesos que tienen lugar en los mismos. Los más habituales son pequeñas cavidades, productos extraños, fronteras de grano con presencia de impurezas, cambios de fase, etc. (BROEK, D., 1991).

Los orígenes de la Mecánica de la Fractura se remontan al siglo XVI, cuando GALILEO GALILEI (1638) escribe el primer tratado en el que estudia la resistencia a la fractura de vigas y columnas y que lleva por título "*Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze*". Durante el siglo XIX la Mecánica de Fractura experimenta un auge y se proponen numerosas hipótesis sobre la importancia de la deformación en el proceso de rotura. Muchas de las hipótesis propuestas en esta época se siguen utilizando en la actualidad, así como es el concepto de cantidad de energía necesaria para que se produzca la propagación de una fisura a través de un material, propuesto por A. A. GRIFFITH (1920); W. WEIBULL (1939) propone una

formulación diferente del proceso de fractura que se basa en una formulación estadística, mientras que G. R. IRWIN (1957) se decanta por la utilización del factor de intensidad de tensiones  $K$ , como parámetro que indica la concentración de tensiones que se produce en la zona en la que se presenta una anomalía en el material y que podría inducir la fisura en el mismo, como por ejemplo una pequeña microfisura o una entalla.

A pesar de los avances de la Mecánica de Fractura, la complejidad del campo unido a la variabilidad del mismo, consecuencia directa de la amplia cantidad de materiales posibles, así como de la introducción continua de materiales nuevos y de la variabilidad de las condiciones del entorno en el que trabajan, hacen de él un campo arduo y complejo, sujeto a una intensidad de búsqueda que permita facilitar la comprensión del comportamiento de los materiales y posibilite en un futuro cercano un mejor conocimiento de los diferentes tipos de procesos que tienen lugar en estos, cuando son sometidos a un estado de carga en su entorno particular de trabajo. Garantizar, en los diseños con materiales, la estabilidad y la integridad de las estructuras con el fin de tratar de evitar cualquier tipo de daño catastrófico es el último colofón y más importante de la Mecánica de Fractura, aportando para ello todo tipo de conocimientos y estudios realizados para tal fin.

## **2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DE LA TESIS**

La amplitud y complejidad de este campo ha hecho que el presente estudio se centre en aceros de pretensado, en particular en aceros perlíticos eutectoides. Estos aceros son de uso habitual en la mayoría de los sectores industriales, y particularmente en el sector de la construcción, donde en la mayoría de sus usos se ponen a prueba las elevadas prestaciones que poseen.

Los aceros de pretensado se obtienen tras un proceso complejo de deformación, en el que el material de base se va sometiendo paulatinamente a una hilera de trefilado que causan en él elevadas deformaciones plásticas que originan un aumento de su longitud y una disminución de su sección. Este proceso induce en el acero un incremento notable de sus propiedades mecánicas que lo hacen de amplia utilización fundamentalmente en el sector industrial, siendo el elemento básico en las estructuras en las que se hace necesaria una elevada resistencia mecánica como puentes, presas y estructuras que soportan elevadas tensiones en ambientes agresivos. Esto motiva que sean numerosos los estudios dedicados a este tipo de aceros (TORIBIO, J., 1992).

En la presente Tesis se pretende poner de manifiesto como la presencia de entallas modifica el comportamiento en fractura de los aceros de pretensado, en particular, en aquellos que



presentan una forma geométrica exterior prismática, cuando son sometidos a solicitaciones que inducen en ellos esfuerzos de tracción o de flexión.

La presencia de entallas en elementos estructurales genera estados tensionales triaxiales capaces de alterar su comportamiento en fractura (susceptibilidad a las entallas) y ha sido ampliamente estudiada tanto en cuanto a la influencia del estado tensional y triaxialidad sobre los procesos de fractura dúctil (HANCOCK Y BROWN, 1983) como sobre los mecanismos que la fractura lleva asociada a nivel microscópico (BEREMIN, 1980b; PINEAU, 1981)

En general la mayoría de los estudios precedentes se han centrado en probetas que presentaban una entalla perimetral a lo largo de la sección circular de la misma (BEREMIN, 1980a). Una probeta con sección circular con entalla a través de toda la sección presenta simetría axial de modo que el análisis podría limitarse a un estudio en dos dimensiones.

El estudio de la presente Tesis se va a centrar en tres tipos de acero perlítico: el B0, el B4 y el B7. El acero B0 o alambcón es el acero base u original, a partir del cual se obtienen el resto de los aceros cuando pasan por las hileras de trefilar; es un acero que no presenta por tanto la deformación plástica que rige el comportamiento de los aceros B4 y B7. El acero B7 ha pasado siete veces por la hilera de trefilado, y ha visto incrementadas notablemente sus características mecánicas. El acero B4 ha pasado cuatro veces por la hilera de trefilado, de modo que, presenta una sección más pequeña y unas características mecánicas intermedias entre el acero B0 y el acero B7. Se puede decir entonces que se van a estudiar tres tipos de aceros pertenecientes a un mismo proceso de trefilado: el acero base sin trefilar (acero B0, alambcón inicial), un acero con un grado de trefilado medio (acero B4) y el acero fuertemente trefilado (acero B7) ó acero de pretensado comercial.

Una vez establecida la forma geométrica de las probetas así como el material a partir del cual han sido preparadas se procede a mecanizar las entallas, cuyas características básicas se describen a continuación. La mecanización de las entallas, sigue el mismo criterio realizado en estudios previos sobre probetas circulares (AYASO, 2001) y, por tanto, no se realiza al azar sino que define una relación concreta entre el ancho de la pieza prismática y la profundidad de la entalla, así como se vincula el ancho de la pieza con el radio de la entalla. Estas relaciones se preservan para cada uno de los aceros estudiados. Esto hace que la entalla generada en el acero B4 sea proporcional a la generada en el acero B0, y lo mismo se podría concluir para el acero B7. Las dimensiones resultantes se presentan en cada uno de los apartados correspondientes, ya sea en el apartado de probetas preparadas para tracción o en el apartado de probetas con preparación para flexión.

Para caracterizar el comportamiento del material cuando es ensayado frente a sollicitación de tracción se estudian dos tipos de entallas: la denominada entalla tipo AA y la entalla tipo CC. Estas entallas se caracterizan por estar mecanizadas a lo largo de dos de las caras paralelas de la probeta, y no a lo largo de todo el perímetro de la misma. En el caso de flexión las entallas estudiadas se denominarán: entalla tipo A y entalla tipo C; siendo única la entalla mecanizada a lo largo de la probeta.

La entalla designada por A o por AA (en el caso de una o dos entallas) se caracteriza por presentar un radio de curvatura pequeño, siendo la profundidad de penetración también pequeña. Las entallas tipo C o CC, por contra, presentan un radio de curvatura amplio con una profundidad de penetración igual que las entallas tipo A o AA. Aunque, ambas entallas presentan la misma profundidad de penetración en la probeta, el área de afectación de las mismas es diferente, consecuencia directa ésta del radio de curvatura. Esta característica se pone de manifiesto en el entorno de material que circunda una entalla y la otra, como se puede observar en la Fig. 1.1, donde se señala en sombreado gris la diferencia existente entre ambos tipos de geometría.

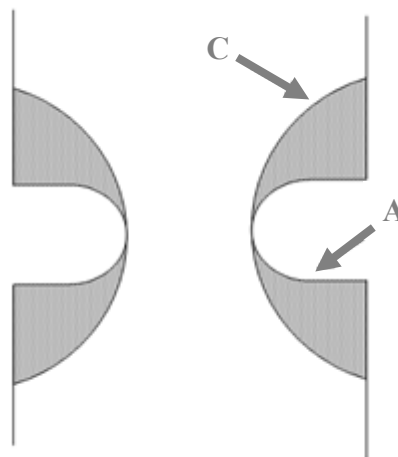


Fig. 1.1. Detalle de la diferencia entre la geometría de la entalla A y la entalla C (sin escala).

En los estudios anteriormente descritos la mecanización se considera perfecta, de modo que, en el proceso de generación de la entalla las dimensiones resultantes son: precisas, exactas e iguales en cada uno de los puntos de tallado. La realidad difiere bastante de este proceso ideal, debido a que los aceros analizados muestran tal nivel de calidad, que el proceso de mecanizado resulta complejo y esto hace que las entallas generadas no sean exactas y por tanto difieran sensiblemente unas de las otras.

En la presente Tesis en el análisis tenso-deformacional se va a tener en cuenta las medidas reales de las entallas, esto implica aceptar las diferencias existentes entre las entallas mecanizadas en ambos planos y que en ocasiones se van a denotar como entallas izquierda y derecha. Esta aceptación conlleva a realizar un análisis independiente de cada una de las entallas teniendo en cuenta sus características geométricas particulares. Estas pequeñas diferencias geométricas, observadas en sus dimensiones, se manifiestan en una modificación en las variables (deformación plástica, tensión equivalente de von Mises, tensión hidrostática, triaxialidad, etc.), de modo que se pretende poner de manifiesto la consecuencia directa de las diferencias existentes entre ambas entallas, y así poder establecer cuáles son las variables más susceptibles a la forma física de las mismas.

Establecido el comportamiento de las variables características que rigen el proceso de rotura, se pretende determinar criterios de fractura que permitan establecer, *a priori*, la conducta de los materiales con este tipo de entallas. Esto permite conocer cuáles son los parámetros de carga que puede tolerar una estructura en la que se presente este tipo de entalla, así como prever el nivel de criticidad cuando este tipo de daño se observa en una.

Al igual que se analiza cuál es el comportamiento de las probetas con entallas A y C cuando son solicitadas a tracción, se valorará también su comportamiento frente a las solicitaciones de flexión. La característica del ensayo de flexión hace que el proceso de entalla sólo se realice en una cara de la misma, de modo que las probetas preparadas para solicitaciones de flexión presentan una única entalla y se designarán como probetas entalladas PA o PC, según cuáles sean las características geométricas de las mismas.

Una vez que se establezca el comportamiento de las probetas solicitadas a flexión con entallas A y C, se tratará de determinar si es posible un criterio de fractura, así como observar si existe algún criterio común que se pueda extender tanto a aquellas muestras que estén solicitadas a procesos de tracción como a procesos de flexión.

El estudio tienen un carácter global, puesto que se van analizando simultáneamente tanto los aspectos macroscópicos como los aspectos microscópicos, estableciendo la relación entre los datos experimentales observados, el análisis numérico obtenido y los datos fractográficos medidos. Esta característica, unida con la recreación tridimensional de la zona de entalla durante el proceso de fractura, permite visualizar cuáles son los caminos más probables de fractura de los diferentes aceros analizados.

### 3. ANTECEDENTES

Numerosa la bibliografía dedicada al estudio de los aceros eutectoides, en este punto se hará una revisión temporal de algunos trabajos sin pretender entrar en detalles ni abarcar todo el conjunto de estudios que se ha llevado a cabo.

BRIDGMAN (1952) estudia la distribución de tensiones y deformaciones en el cuello de estricción de una barra cilíndrica sometida al ensayo de tracción simple. Bridgman propone una distribución de tensiones y deformaciones equivalentes haciendo aplicación de la teoría matemática de la Plasticidad.

EMBURY y FISHER (1966) estudian la estructura y las propiedades del acero perlítico trefilado y logran establecer una correlación entre la alta tenacidad de fractura de estos aceros y su microestructura.

MILLER y SMITH (1970) estudiando mecanismos de fractura en aceros con distinto contenido en carbono y diferentes tratamientos térmicos, llegan a la conclusión de la importancia de la orientación de las láminas con respecto al eje de tensión en el desarrollo de fisuras dentro del material.

HYZAK y BERSTEIN (1976) analizan la influencia de la microestructura en el límite elástico y la tenacidad de fractura de estos aceros, concluyendo que la colonia no era un factor determinante en el comportamiento mecánico de estos aceros, pero se identificó una unidad microestructural que tendría el control sobre los procesos de fractura frágil por clivaje.

ASTIZ (1976) obtiene por primera vez el factor de intensidad de tensiones en un alambre fisurado sometido a una sollicitación axial mediante el método de elementos finitos.

VALIENTE (1980) estudia las tasas de liberación de energía en un alambre fisurado obteniendo nuevas expresiones para el FIT utilizando el método de flexibilidad y resultados tenso-deformacionales obtenidos por elementos finitos.

KAVISHE y BAKER (1986) relacionan el espaciado interlaminar de las colonias de perlita con las propiedades mecánicas de tenacidad y resistencia a tracción.

LANCHA (1987) investiga el acero perlítico no trefilado (alambrón) y el acero perlítico trefilado (acero de pretensado) y concluye que la orientación de la microestructura es responsable en gran medida de la anisotropía mostrada en la fractura de estos aceros.

GIL SEVILLANO (1993) nombra la unidad microestructural como bloque perlítico y establece su constitución por colonias de perlita que presentan la orientación cristalográfica de la ferrita.

OVEJERO (1998) realiza un estudio exhaustivo en la evolución microestructural en aceros eutectoides trefilados y concluye que el trefilado produce una orientación progresiva en la dirección del trefilado tanto de las colonias de perlita como de las láminas constituyentes dotando la estructura de una mayor densificación lo que se traduce en una reducción significativa del espacio interlaminar.

TOLEDANO (1998) estudia los procesos de fatiga y fractura en aceros perlíticos abarcando toda la cadena de fabricación, partiendo del acero no trefilado hasta el acero fuertemente trefilado (0 → 7) proponiendo un criterio de fractura en alambres fisurados válido para los diferentes grados de trefilado.

TORIBIO, OVEJERO y TOLEDANO (1998) proponen un micromecanismo de fractura capaz de explicar la marcada anisotropía propia de los aceros fuertemente trefilados.

VALIENTE (2001) demuestra la inexactitud de la solución de Bridgman para predecir el radio en el fondo de la entalla y la carga aplicada sobre la probeta a partir del instante de inestabilidad en modo control de carga. Pese a ello, la solución aportada por Bridgman ha sido profusamente utilizada para obtener las distribuciones de triaxialidad tensional en la sección mínima de probetas entalladas.

Las probetas entalladas han sido utilizadas ampliamente para caracterizar la resistencia y la ductilidad de los materiales estructurales; sin embargo, detallar exactamente el estado tenso-deformacional de un material requiere de la utilización del método de elementos finitos, el cual aporta información puntual e instantánea del comportamiento de la probeta frente a las diversas sollicitaciones que pudieran tener lugar en ella.

El análisis numérico posibilita la valoración de la evolución de los parámetros característicos que más influencia tienen sobre los distintos procesos de ensayo. Es quizás, la herramienta matemática más potente de análisis del siglo XXI, ya que permite establecer el estado tenso-deformacional de cada uno de los puntos del sólido en cada instante del proceso de ensayo. Para la utilización de este recurso, se hace necesario diseñar un ensayo virtual que reproduzca fielmente las condiciones de los ensayos de laboratorio. Una vez que se ha diseñado el ensayo virtual se procederá a realizar el cálculo y, obtenido éste, se habrá de valorar la fiabilidad del resultado obtenido.

#### 4. EL MATERIAL DE ENSAYO

El presente estudio se centra en el acero tipo B. La letra característica indica la composición química del acero objeto de estudio, en este caso se trata de acero B cuya composición química se detalla en la Tabla 1.1. El número que acompaña la letra B especifica el número de hileras que ha atravesado el alambre de acero durante el proceso de trefilado, de este modo, el acero B0, también denominado alambrón, no ha experimentado el proceso de trefilado y presenta una sección circular con un diámetro aproximado de 12.10 mm, mientras que el acero B7 ha pasado por siete pasos de trefilado con una sección circular de diámetro aproximado 7 mm. En la Tabla 1.2 se dan los diámetros correspondientes al acero B en sus sucesivos pasos por las hileras de trefilado.

Tabla 1.1. Composición Química del Acero B.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Al	% Cr	% V
<b>0.789</b>	0.698	0.226	0.011	0.005	0.003	0.271	0.078

Tabla 1.2. Diámetros Acero B.

Acero	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
$\Phi(\text{mm})$	<b>12.10</b>	11.23	10.45	9.68	<b>9.02</b>	8.54	8.18	<b>7.00</b>
$\epsilon^P_{\text{acum}}$	<b>0.00</b>	0.15	0.29	0.45	<b>0.59</b>	0.70	0.78	<b>1.10</b>

Como consecuencia de sus pasos por las hileras de trefilado el acero ve modificadas sus características mecánicas, en la Tabla 1.3 se recogen los parámetros mecánicos más característicos, así mismo en la Fig. 1.2 se presentan las gráficas correspondientes a las curvas de comportamiento de los aceros B0, B4 y B7. Los pasos intermedios correspondientes con los aceros B1, B2, B3, B5 y B6 no se presentan por no ser objeto de este estudio de la presente Tesis; no obstante, se indica que las características que presentan son intermedias de modo que las gráficas que presentarían serían intermedias a las de los aceros B0, B4 y B7.

Tabla 1.3. Parámetros mecánicos Acero B.

Acero	E (GPa)	$\sigma_Y$ (GPa)	$\sigma_R$ (GPa)	P	m	$\epsilon_R$
<b>B0</b>	<b>202</b>	<b>0.72</b>	<b>1.27</b>	<b>2.13</b>	<b>5.7</b>	<b>0.066</b>
B1	204	0.84	1.34	2.41	5.6	0.057
B2	204	0.88	1.37	2.22	6.6	0.061
B3	203	0.95	1.43	2.46	0.4	0.052
<b>B4</b>	<b>203</b>	<b>1.01</b>	<b>1.49</b>	<b>2.76</b>	<b>6.0</b>	<b>0.042</b>
B5	201	1.09	1.55	3.07	5.8	0.038
B6	201	1.12	1.58	3.15	5.8	0.035
<b>B7</b>	<b>205</b>	<b>1.58</b>	<b>1.84</b>	<b>2.02</b>	<b>23.8</b>	<b>0.052</b>

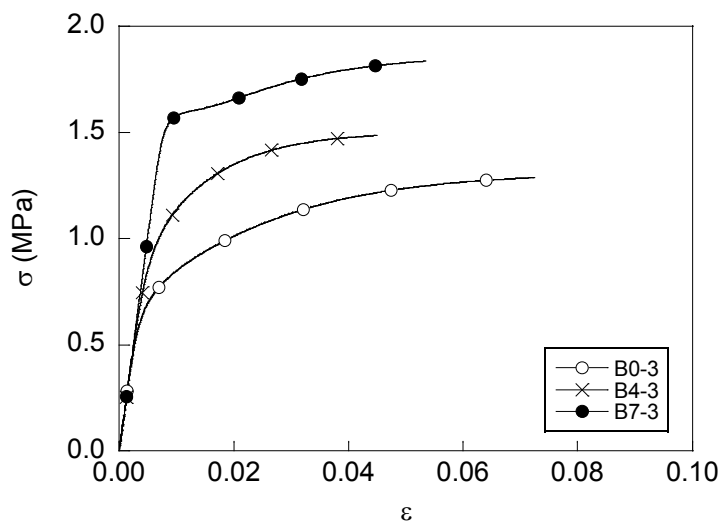


Fig. 1.2. Variación de los parámetros mecánicos según su paso por la trefiladora.

## **CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

---

### **1. INTRODUCCIÓN**

El presente capítulo se centra en el estudio del comportamiento en fractura bajo solicitaciones de tracción y de flexión de probetas prismáticas entalladas mecanizadas a partir de alambres de acero perlítico progresivamente trefilado: el alambroón inicial (B0), el alambre correspondiente al 4º paso de la cadena de trefilado (B4) y alambre de pretensado comercial (B7). El acero empleado en la presente Tesis se denomina acero tipo B, tratándose de un acero perlítico eutectoide cuya composición química es la siguiente: 0.789% de C, 0.698% de Mn, 0.226% de Si, 0.011% de P, 0.005% de S, 0.003% de Al, 0.271% de Cr y 0.078% de V.

#### **1.1. Probetas prismáticas para solicitaciones de tracción**

Para realizar el análisis del comportamiento de los aceros B0, B4 y B7 frente a solicitaciones de tracción se procede en primer lugar a la preparación de las probetas. La preparación consta de dos pasos, en un primer paso se produce un mecanizado que se denominará primario, y en un segundo paso se realiza el entallado característico de cada probeta:

- > El mecanizado primario consiste en dotar las probetas de la forma prismática adecuada, ya que, en un principio las probetas presentan, de fábrica, una forma



geométrica cilíndrica. Las dimensiones buscadas en el mecanizado primario se han elegido de modo que se busca una relación  $\Phi/B$  concreta, donde  $\Phi$  denota el diámetro de partida y  $B$  es el lado de la sección cuadrada resultante. La relación  $\Phi/B$  será característica del tipo de ensayo y será la misma para todos y cada uno de los tres alambres de acero estudiados: B0, B4 y B7.

- > En el mecanizado secundario se define el tipo de entalla específica de cada probeta. Para el ensayo de tracción se van a definir dos tipos de entallas, el entallado tipo AA y el entallado tipo CC (probetas PAA y PCC), cuyas características se detallan en los siguientes apartados. Para cada acero y tipo de entalla se preparan tres ejemplares, con el fin de establecer un valor medio en el comportamiento de las mismas.

El elevado grado de dureza del acero B ha condicionado considerablemente las características del mecanizado, de manera que no siempre ha sido posible obtener las dimensiones teóricas buscadas. Esto ha motivado que, en cada apartado, se hayan presentado tanto las medidas teóricas pretendidas como las medidas reales obtenidas en el proceso de mecanizado.

Aunque la pretensión original era la obtención de probetas idénticas, el mecanizado ha condicionado notablemente este hecho, de modo que las probetas obtenidas, aunque de dimensiones muy similares, no son idénticamente iguales unas a las otras. Estas pequeñas diferencias en la forma geométrica de las entallas van a ser objeto de un análisis minucioso, tanto en el presente capítulo como en los capítulos posteriores.

Una vez que ha sido establecida sobre las probetas la mecanización secundaria, y por tanto ya presentan su entallado específico, se procede a realizar en ellas los ensayos de sollicitación a tracción correspondientes.

## **1.2. Probetas prismáticas para sollicitaciones de flexión por 4 puntos**

Para proceder a evaluar experimentalmente el comportamiento de los aceros B0, B4, y B7 frente a sollicitaciones de flexión por cuatro puntos, se hace la preparación de las probetas muestra, que como ya sucediese para aquellas probetas sollicitadas a tracción requerirán de un mecanizado primario y de un mecanizado secundario. En el mecanizado primario se dotará a la probeta de forma prismática, si bien, la relación de  $\Phi/B$  será característica del ensayo de flexión y, como para el ensayo de sollicitación de tracción, será la misma para los aceros B0, B4 y B7. Durante el mecanizado secundario se procederá a mecanizar en las muestras la entalla característica. Para el ensayo de flexión se van a mecanizar en los aceros dos tipos de entallas, la entalla tipo A y la entalla tipo C (cuyos detalles característicos se mostrarán en los

apartados correspondientes), dando lugar así a las probetas tipo PA y PC. Como ya se observara en la mecanización de las probetas preparadas para ensayar a solicitud de tracción, la mecanización secundaria no ha satisfecho las condiciones de exactitud requeridas para el proceso, de modo que se hará necesaria una determinación exhaustiva de las dimensiones de cada una de las tres probetas que se preparan para el ensayo de solicitud de flexión. Una vez que han sido obtenidas las probetas muestra de cada uno de los tipos de acero, se procede a realizar el ensayo de solicitud de flexión sobre cada una de ellas.

### **1.3. Presentación de los datos experimentales**

Tras la realización de los ensayos de solicitud de tracción y de flexión, el siguiente paso consistirá en valorar los resultados obtenidos. Para ello se procederá a la representación gráfica de los datos aportados por las máquinas de ensayo, y que se presentan principalmente en forma de curvas tipo carga-desplazamiento. Con el fin de facilitar la valoración de los resultados obtenidos, se ha optado por la representación en una misma gráfica de los ensayos realizados a las tres probetas de cada muestra considerada. Esta definición de los datos permite determinar no sólo el comportamiento de las tres probetas, sino evaluar la posible dispersión de los mismos, como consecuencia de las características dimensionales de cada una de las entallas que presenta la probeta objeto de análisis; no obstante, por cada gráfica en la que se presenten los datos de las tres probetas muestra de cada tipo de acero, se mostrará también una tabla en la que quedará patente cada una de las medidas de las entallas que se presentan en las probetas objeto de análisis.

En la representación de los datos derivados del ensayo de solicitud de flexión se hace necesario introducir una nueva variable que generará nuevas gráficas adicionales, la cual se denotará como  $u_p$  y que se corresponderá con el desplazamiento del puente. Esto se debe a que en algunos casos, el extensómetro no es capaz de tolerar las deformaciones que se imponen en la solicitud del ensayo de flexión y, por tanto, se habrá de recurrir a los datos aportados por el desplazamiento del puente, magnitud ésta aportada por la propia máquina de ensayo; de modo que, el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de solicitud de flexión se hará tanto desde el punto de vista de las gráficas que se realizan a partir de los datos que aporta el extensómetro, como de las gráficas que se realizan a partir de los datos que proporciona la propia máquina de ensayo.

Como conclusiones a cada uno de los ensayos realizados se presentan las gráficas que resumen el comportamiento de los tres aceros estudiados (alambres B0, B4, y B7), así como, las gráficas representativas del comportamiento de cada uno de estos aceros en función de la entalla característica que presenten.

## 2. ENSAYOS BAJO SOLICITACIONES DE TRACCIÓN

### 2.1. Medidas de mecanización primaria, adquisición de forma prismática. Medidas de mecanización secundaria

Como se ha comentado en los apartados previos, para la realización del ensayo de tracción ha sido necesaria la mecanización previa de probetas de acero B, el cuál presenta originalmente una sección circular. Con el proceso de mecanización primaria se pretende que las probetas adopten una forma geométrica prismática de sección cuadrada. En estas nuevas probetas se generará la entalla objeto de estudio.

La mecanización primaria se hace de modo que se busca establecer una relación de proporcionalidad ( $\Phi/B$ ) entre el diámetro de partida y el lado resultante, que para el ensayo de tracción se trata de  $\Phi/B = 1.62$ . Establecida la forma prismática en las probetas se procede a realizar el entallado, para cada acero sometido a tracción se van a realizar dos tipos diferentes de entallas: la entalla tipo AA y la entalla tipo CC. El entallado tipo AA se mecaniza a lo largo de dos caras paralelas de cada probeta (1 par de caras paralelas posee las entallas, el otro no). El entallado tipo AA se caracteriza por presentar una pequeña profundidad de penetración a la vez que un radio de curvatura pequeño, estas dos características hacen que la entalla tipo AA sea una entalla marcadamente agresiva, *i.e.*, un excelente concentrador de tensiones. En la imagen de la Fig. 2.1 se presenta un recreación tridimensional, a escala, de una de las probetas de acero B0 con entalla tipo AA (probeta PAA) que se ha obtenido en el proceso de mecanizado.

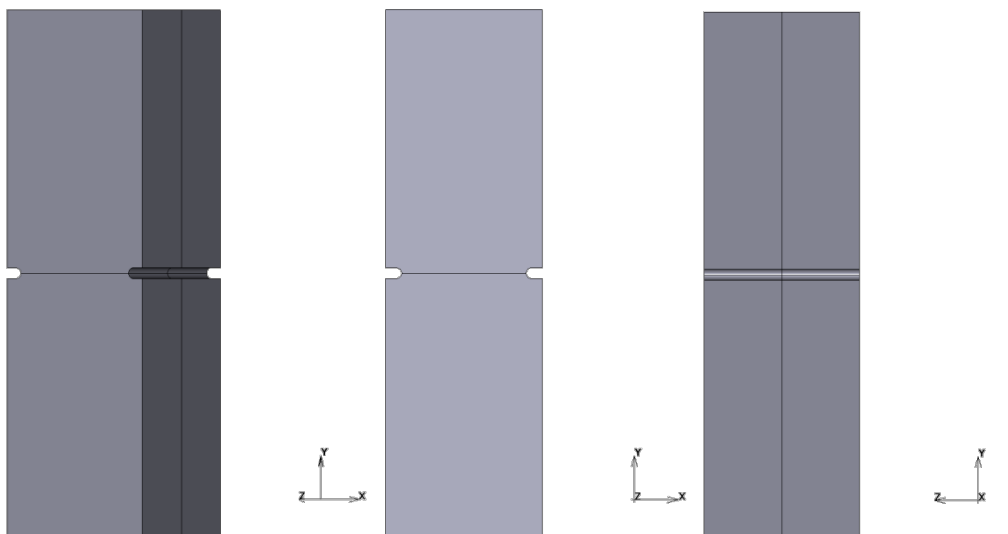


Fig. 2.1. Imagen, a escala, de una probeta B0-AA. De izquierda a derecha: vista en isométrico, alzado y perfil.

Al igual que con la entalla tipo AA, la entalla tipo CC se dispone a lo largo de dos caras paralelas de la probeta con geometría prismática; no obstante, las características de la entalla CC son sustancialmente diferentes a las de la entalla AA, aunque en ambas entallas se presenta una profundidad de penetración similar, el acabado de las mismas es lo que las hace esencialmente diferentes: la entalla AA presenta un acabado que da lugar a un radio de curvatura pequeño, mientras que, el acabado de la entalla CC se determina mediante un gran radio de curvatura. La Fig. 2.2 muestra una representación tridimensional, a escala, del isométrico, alzado y perfil de una probeta real de acero B0, con entalla tipo CC, que se ha obtenido en el proceso de mecanizado.

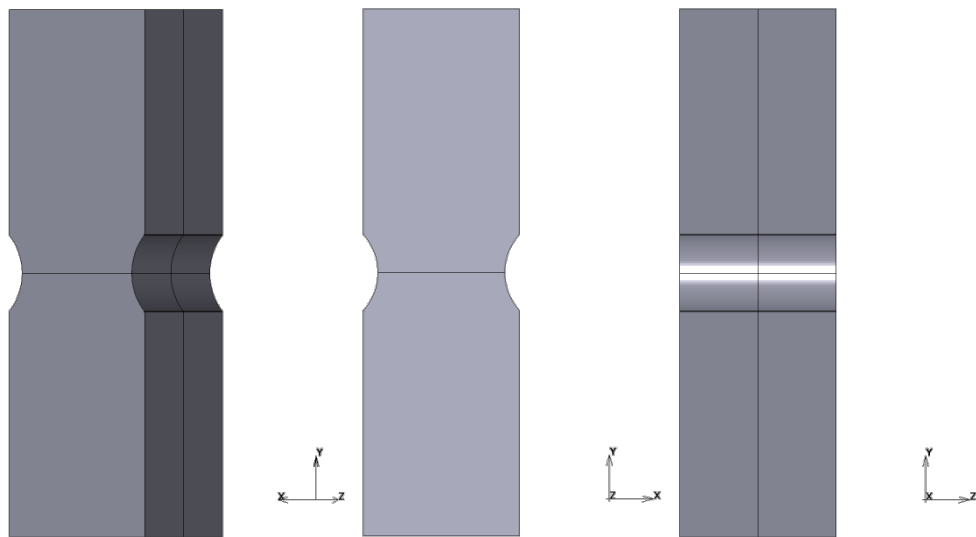


Fig. 2.2. Imagen en isométrico (izda.), alzado (centro), y perfil (dcha.) de la probeta PCC.

En las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan los datos de las dimensiones solicitadas en la mecanización de las probetas. En ella, se denota la profundidad de penetración de la entalla como  $C$  y el radio de curvatura como  $R$ . Con el fin de aclarar los parámetros utilizados, en la Fig. 2.3 se presenta un esquema general en la que se indican las dimensiones características.

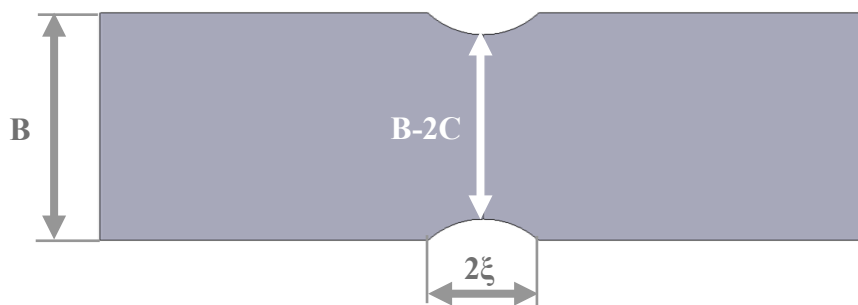


Fig. 2.3. Esquema de los parámetros medidos.

Tabla 2.1. Datos previos para la mecanización de las probetas entalladas tipo PAA.

PAA	$\Phi/B$	B (mm)	C (mm)	R (mm)	$2\xi$ (mm)
<b><math>\Phi 12</math> (B0)</b>	1.6216	7.40	0.73	0.25	0.50
<b><math>\Phi 9</math> (B4)</b>	1.6216	5.55	0.55	0.19	0.38
<b><math>\Phi 7</math> (B7)</b>	1.6204	4.32	0.43	0.15	0.29

Tabla 2.2. Datos previos para la mecanización de las probetas entalladas tipo PCC.

PCC	$\Phi/B$	B(mm)	C(mm)	R(mm)	$2\xi$ (mm)
<b><math>\Phi 12</math> (B0)</b>	1.6216	7.40	0.69	2.70	3.61
<b><math>\Phi 9</math> (B4)</b>	1.6216	5.55	0.52	2.03	2.71
<b><math>\Phi 7</math> (B7)</b>	1.6204	4.32	0.40	1.28	2.11

## 2.2. Sistema de designación de las probetas

Antes de mostrar las dimensiones resultantes del mecanizado sobre cada una de las probetas, se procede a establecer el sistema de designación que se va a seguir, con el fin de facilitar el seguimiento de cada uno de los especímenes que constituyen la muestra de cada uno de los aceros analizados. Para establecer el sistema de designación de cada una de las probetas se han tenido en cuenta tres factores: el acero a partir del cual se han mecanizado, el ensayo al que se van a solicitar, y el tipo de entalla que presentan. A modo de ejemplo del sistema de designación de probetas, considérese la probeta nombrada B0-AA-2, en este caso se trata de una probeta mecanizada a partir del alambión del acero tipo B (B0), que posee un entallado tipo AA (dos entallas de pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad) y, en cuanto al número final se refiere, éste indica cual es el espécimen concreto dentro de la terna considerada, que en este caso particular se correspondería con la probeta número 2 de las tres que constituyen la muestra.

Los ensayos realizados sobre las probetas de acero B se contemplan en forma de tablas. En la Tabla 2.3 se presenta la designación utilizada para las probetas preparadas a tracción de acero B0. En la Tabla 2.4 se presenta la designación para las probetas de acero B4 y en la Tabla 2.5, se presentan las probetas preparadas a partir de acero B7.

Tabla 2.3. Probetas mecanizadas a partir del acero B0 (alambrón).

Acero B0	Entalla AA	B0-AA-1
		B0-AA-2
		B0-AA-3
	Entalla CC	B0-CC-1
		B0-CC-2
		B0-CC-3

Tabla 2.4. Probetas mecanizadas a partir del acero B4 (4º paso de trefilado).

Acero B4	Entalla AA	B4-AA-1
		B4-AA-2
		B4-AA-3
	Entalla CC	B4-CC-1
		B4-CC-2
		B4-CC-3

Tabla 2.5. Probetas mecanizadas a partir del acero B7 (alambre de pretensar).

Acero B7	Entalla AA	B7-AA-1
		B7-AA-2
		B7-AA-3
	Entalla CC	B7-CC-1
		B7-CC-2
		B7-CC-3

### 2.3. Dimensiones resultantes del mecanizado de la entalla

En la Tabla 2.6 se indican las dimensiones *reales* de las probetas PAA y en la Tabla 2.7 las de las probetas PCC. En ambas tablas, el parámetro C indica la profundidad específica de la entalla, R denota el radio de entalla y  $2\xi$  indica el ancho de la misma o distancia entre flancos. Debido a las pequeñas diferencias en el mecanizado secundario de las dos entallas de cada probeta (nombradas como entalla 1 y 2 para cada probeta en particular) se muestran dos valores de la profundidad ( $C_1$  y  $C_2$ ), del radio de entalla ( $R_1$  y  $R_2$ ) así como de la separación entre flancos de entalla ( $2\xi_1$  y  $2\xi_2$ ). Para realizar la medición de las dimensiones características de las entallas se ha recurrido a la utilización de un proyector de perfiles de la marca NIKON.

Tabla 2.6. Dimensiones reales de las probetas entalladas tipo PAA.

PAA	C (mm)		2 $\xi$ (mm)		R (mm)	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	2 $\xi_1$	2 $\xi_2$	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
<b>B0-AA-1</b>	0.762	0.765	0.503	0.55	0.252	0.275
<b>B0-AA-2</b>	0.756	0.755	0.503	0.530	0.252	0.265
<b>B0-AA-3</b>	0.808	0.796	0.513	0.492	0.257	0.246
<b>B4-AA-1</b>	0.528	0.530	0.382	0.433	0.191	0.217
<b>B4-AA-2</b>	0.566	0.538	0.380	0.378	0.190	0.189
<b>B4-AA-3</b>	0.567	0.557	0.382	0.425	0.191	0.213
<b>B7-AA-1</b>	0.461	0.438	0.305	0.300	0.153	0.150
<b>B7-AA-2</b>	0.423	0.450	0.306	0.329	0.153	0.165
<b>B7-AA-3</b>	0.435	0.429	0.297	0.347	0.149	0.174

Tabla 2.7. Dimensiones reales de las probetas entalladas tipo PCC.

PAA	C (mm)		2 $\xi$ (mm)		R (mm)	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	2 $\xi_1$	2 $\xi_2$	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
<b>B0-CC-1</b>	0.697	0.704	3.619	3.608	2.697	2.663
<b>B0-CC-2</b>	0.703	0.710	3.638	3.644	2.705	2.693
<b>B0-CC-3</b>	0.711	0.714	3.668	3.627	2.721	2.660
<b>B4-CC-1</b>	0.569	0.552	2.833	2.763	2.048	2.005
<b>B4-CC-2</b>	0.563	0.548	2.799	2.774	2.021	2.029
<b>B4-CC-3</b>	0.537	0.569	2.782	2.806	2.070	2.014
<b>B7-CC-1</b>	0.433	0.447	2.180	2.175	1.588	1.546
<b>B7-CC-2</b>	0.442	0.564	2.149	2.385	1.527	1.543
<b>B7-CC-3</b>	0.465	0.439	2.200	2.189	1.534	1.584

## 2.4. El ensayo de tracción

Con el fin de establecer cómo es el comportamiento mecánico del acero en la forma de probetas prismáticas entalladas se realiza un ensayo de tracción sobre las mismas. En cuanto a máquina utilizada para este fin se trata de una máquina de ensayos universales marca MTS modelo *Alliance RT/100*.

El ensayo de tracción es uno de los más ampliamente utilizados para caracterizar el comportamiento mecánico de un material. Para su realización se coloca la probeta a ensayar entre dos mordazas perfectamente alineadas de la máquina, de esta forma el eje longitudinal de la probeta se encuentra alineado con el eje longitudinal de las mordazas (Fig. 2.4).

La máquina de tracción tiene la misión de ir separando progresivamente las mordazas mediante la aplicación de una fuerza monoaxial que se va incrementando progresivamente. Este hecho provoca que la probeta sufra un aumento de longitud en la dirección axial y una contracción en la sección perpendicular a la misma. El proceso dura hasta el instante en que la carga es tan elevada que el material sucumbe y se produce la rotura total en una sección del mismo. El proceso de registro de la máquina permite conocer en todo momento la fuerza que se está aplicando sobre la probeta así como la distancia entre las mordazas.

La variación en la carga aplicada puede ser controlada bien mediante un proceso definido como control de carga o bien en control de desplazamiento. En el proceso de control de carga el usuario define la curva de carga que se aplica instantáneamente a la probeta. En el proceso de control de desplazamiento el usuario define la curva de desplazamiento instantáneo de la probeta en el que se establece la carga aplicada en cada momento.

Para el presente estudio el proceso utilizado es control de desplazamiento. En los ensayos realizados se ha impuesto una velocidad de desplazamiento entre mordazas de 0.01 mm/s en las probetas con entallas de tipo PAA y de 0.025 mm/s en las probetas con entalla PCC, basándose en estudios previos (AYASO, 2001).

Desde el inicio del ensayo, y hasta su conclusión debido a la fractura final de la probeta, se registran de forma continua las lecturas correspondientes al alargamiento de la probeta, así como la carga aplicada instantáneamente. Los datos de carga los proporciona la célula de carga de la propia máquina. Para la determinación del alargamiento de la probeta ha sido necesaria la introducción de un extensómetro. El extensómetro utilizado pertenece a la misma casa que la máquina de ensayo MTS (Fig. 2.5). El extensómetro se encuentra situado en frente de la entalla con sus extremos a 12.5 mm del centro de la misma. Esta medida se debe a la



aplicación del principio de San Venant, que establece que los efectos de la entalla se estabilizan a una distancia relativamente corta de la misma. Los datos principales de salida de la máquina de ensayo son: la carga aplicada (kN) y la extensión de la probeta registrada por el extensómetro (mm).

Con el fin de explicar ciertos términos que aparecen en la Tesis se van a detallar los resultados que se obtienen en un ensayo de tracción simple, y que son:

- > **La tensión ingenieril  $s$** , se define como la relación entre la fuerza aplicada  $F$  y el área inicial de la probeta  $A_0$ .
- > **La deformación ingenieril  $e$** , establece la relación que existe entre el aumento de longitud sufrido por la probeta y la longitud inicial de la misma.
- > **La tensión verdadera  $\sigma$** , que es la tensión ingenieril corregida por un factor  $(1+e)$  y que representa la *verdadera tensión* que soporta la probeta debido a la actualización geométrica de la sección de la probeta (aumento progresivo de longitud y disminución paulatina de sección).
- > **La deformación verdadera  $\varepsilon$** , que es la deformación instantánea de la misma, es decir la relación entre el incremento de longitud en un instante dado y la longitud en un instante anterior y cuyo valor es:  $L_n (1+e)$ .

Si se representa en una gráfica la tensión verdadera frente a la deformación verdadera se obtendrá que la mayoría de los materiales metálicos presenten dos tipos de zonas:

- > **Zona de deformación elástica** donde las deformaciones son proporcionales a las tensiones aplicadas, con una constante de proporcionalidad llamada módulo de elasticidad o modulo de Young ( $E$ ). Durante esta etapa si se retira la carga aplicada el material recupera su longitud inicial. La tensión máxima correspondiente a este tramo se denomina límite elástico ( $\sigma_y$ ). A menudo, resulta complicado determinar con exactitud este valor de modo que se suele tomar como límite elástico práctico el valor de la tensión correspondiente una deformación plástica del 0.2 %.
- > **Zona de deformación elasto-plástica:** tras el periodo elástico se presenta una parte de la gráfica donde el material no recupera su longitud inicial aunque cese la aplicación de la carga. Si se produjese un cese de la carga el material presentaría una deformación permanente que se corresponde con la que tendría el material en ese punto de carga menos la que recupera elásticamente. Si se volviese a cargar la probeta el material describiría una curva de carga que sería una recta con la misma pendiente inicial  $E$ . Esta zona de la gráfica presenta un máximo que se corresponde con un

cambio en el comportamiento en deformación del material, hasta este punto la probeta presenta una reducción uniforme de la sección a lo largo de la misma, pero a partir de este punto la deformación se empieza a localizar en una determinada zona, esto es, lo que se denomina cuello de estricción.



Fig. 2.4. Máquina utilizada en el ensayo de tracción.

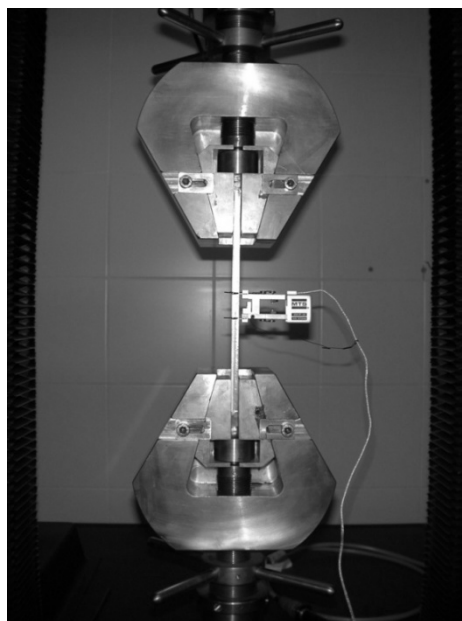


Fig. 2.5. Detalle de la colocación del extensómetro.

## 2.5. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PAA

### 2.5.1. Acero B0 con entalla tipo AA

El análisis derivado del estudio de la forma geométrica de las entallas indica que existe poca relevancia en cuanto a la divergencia dimensional existente entre las dos entallas de una misma probeta. El error cometido en la mecanización de las entallas se encuentra localizado en el orden de las centésimas de milímetro, salvo en la profundidad de penetración de la probeta B0-AA-3 que ostenta una discrepancia de 12 centésimas de milímetro. Este factor conduce a una probeta ligeramente mayor en el espécimen B0-AA-3 que en las probetas B0-AA-1 y B0-AA-2, como se puede observar en la Tabla 2.8.

A pesar de las diferencias manifiestas existentes en la forma física de las entallas de las diferentes probetas que configuran la muestra, la curva de comportamiento es esencialmente la misma en los tres especímenes, no observándose cambios sustanciales en la gráfica que representa el comportamiento, como se puede observar en la Fig. 2.6. En los tres casos analizados, el régimen elástico se mantiene hasta aproximadamente los 20 kN de carga, punto a partir del cual se produce el régimen elasto-plástico. El régimen elasto-plástico se observa, por tanto, en la mayor parte del ensayo de tracción, alcanzando con 53 kN de carga la rotura del material en los tres especímenes, con un desplazamiento máximo tolerado de 0.65 mm.

Tabla 2.8. Parámetros dimensionales (mm) de las dos entallas de la muestra B0-AA.

B0-AA-1	B0-AA-2	B0-AA-3
$C_1/C_2 = 0.762/0.765$	$C_1/C_2 = 0.756/0.755$	$C_1/C_2 = 0.808/0.796$
$2\xi_1/2\xi_2 = 0.503/0.55$	$2\xi_1/2\xi_2 = 0.503/0.530$	$2\xi_1/2\xi_2 = 0.513/0.492$

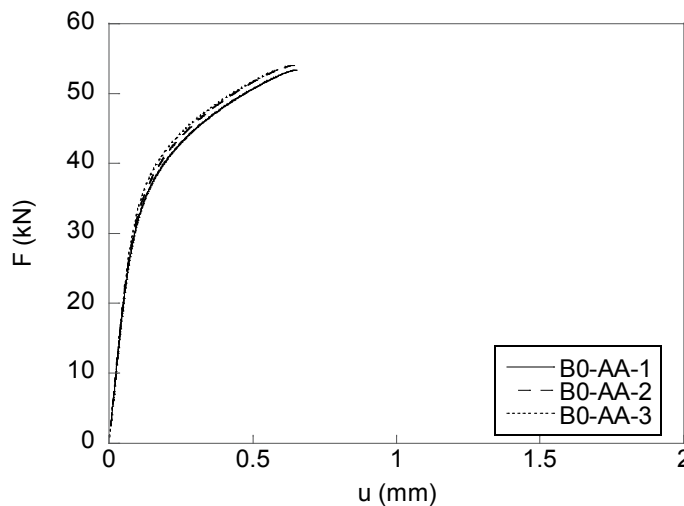


Fig. 2.6. Carga vs desplazamiento de la muestra B0-AA.

2.5.2. Acero B4 con entalla tipo AA

En cuanto a las probetas que se han preparado para el ensayo de tracción a partir del acero B4 (probetas B4-AA) se observa que en un principio las dimensiones de las entallas son bastante homogéneas, como se puede apreciar en los valores indicados en la Tabla 2.9. La diferencia más significativa, en cuanto a la falta de simetría de las entallas se refiere, se da en la profundidad de entalla de la probeta B4-AA-1, donde existe una diferencia de 51 centésimas de milímetro entre la entalla izquierda (1) y derecha (2). La mayor diferencia en profundidad de penetración entre entallas de la misma probeta se encuentra en la probeta B4-AA-2 y se establece en 28 centésimas de milímetro.

Tabla 2.9. Parámetros dimensionales (mm) de las entallas de la muestra B4-AA.

B4-AA-1	B4-AA-2	B4-AA-3
$C_1/C_2 = 0.528/0.530$	$C_1/C_2 = 0.566/0.538$	$C_1/C_2 = 0.567/0.557$
$2\xi_1/2\xi_2 = 0.382/0.433$	$2\xi_1/2\xi_2 = 0.380/0.378$	$2\xi_1/2\xi_2 = 0.382/0.425$

Los datos obtenidos en el ensayo de tracción de las tres probetas B4-AA muestran que, a pesar de las diferencias existentes en la forma física de las entallas, el comportamiento es esencialmente el mismo (Fig. 2.7); no obstante, en la probeta B4-AA-2 se ha presentado un alargamiento ligeramente superior a las probetas B4-AA-1 y B4-AA-3. A primera vista esto podría ser un indicativo consecuencia de la diferencia en la forma geométrica de las entallas, no obstante, esto sería poco preciso a la vista de un único ensayo. Todas ellas presentan un comportamiento elástico hasta alcanzar los 20 kN, valor a partir del cual el régimen de la curva cambia adoptando el estado elasto-plástico, siendo la carga de rotura final en las tres probetas de 40 kN.

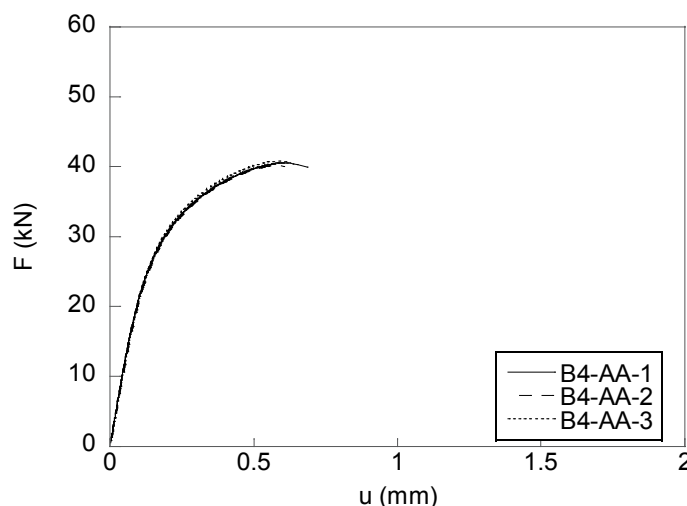


Fig. 2.7. Carga vs desplazamiento de la muestra B4-AA.

### 2.5.3. Acero B7 con entalla tipo AA

Las probetas B7-AA-1, B7-AA-2 y B7-AA-3 presentan unas dimensiones en el mecanizado de las entallas bastante semejantes, no observándose discrepancias significativas entre ellas. En cuanto a las diferencias existentes entre las dimensiones de las dos entallas de una misma probeta se observa que la mayor diferencia se da en la probeta B7-AA-2, como puede observarse en la Tabla 2.10, en la cual se localiza una diferencia de 27 centésimas de milímetro en cuanto a profundidad de penetración se refiere. El resto de las dimensiones, aunque no exactamente iguales, son menos significativas respecto a sus diferencias.

Tabla 2.10. Parámetros dimensionales (mm) de las entallas de la muestra B7-AA.

B7-AA-1	B7-AA-2	B7-AA-3
$C_1/C_2 = 0.461/0.438$	$C_1/C_2 = 0.423/0.450$	$C_1/C_2 = 0.435/0.429$
$2\xi_1/2\xi_2 = 0.305/0.300$	$2\xi_1/2\xi_2 = 0.306/0.329$	$2\xi_1/2\xi_2 = 0.297/0.347$

La representación de los datos de las tres probetas de la muestra B7-AA indica que el comportamiento mecánico de las probetas frente a la sollicitación de tracción es el mismo independientemente de las ligeras dispersiones obtenidas en su proceso de mecanizado tal y como se puede observar en la Fig. 2.8. En los tres casos ensayados las probetas presentan un comportamiento elástico que se mantiene hasta alcanzar 25 kN de carga, punto a partir del cual las probetas presentan un cambio de régimen, ostentando un comportamiento elasto-plástico. Cuando en el ensayo de sollicitación se llegan a alcanzar los 66 kN de carga se produce la rotura del material por separación total de superficies, siendo ésta la carga de rotura de los tres especímenes analizados.

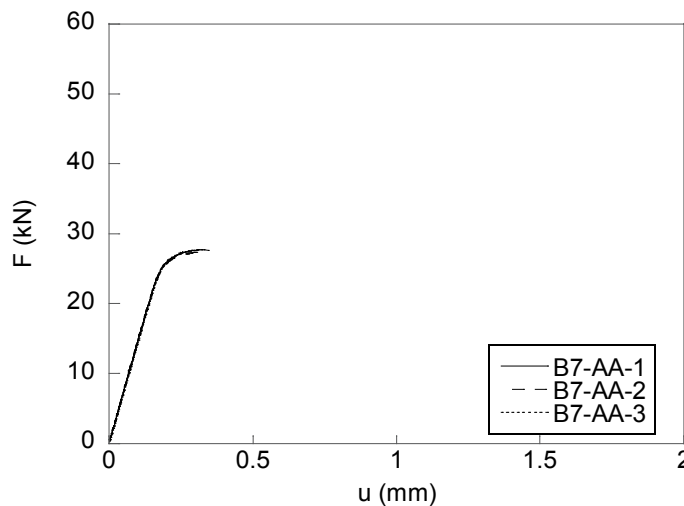


Fig. 2.8. Carga vs desplazamiento de la muestra B7-AA.

#### 2.5.4. Comparación de resultados experimentales: probetas tipo PAA

Una gráfica comparativa de las gráficas correspondientes a las probetas intermedias de cada terna considerada (B0-AA-2, B4-AA-1 y B7-AA-1) se presenta en la Fig. 2.9. De esta figura se observa que la muestra B4-AA tiene una pérdida porcentual de la carga máxima soportada del 24% con respecto a la muestra B0-AA. Del mismo modo, se puede apreciar que la muestra B7-AA tiene una pérdida de la carga máxima soportada con respecto a la muestra denominada B0-AA, de aproximadamente el 48%. Esta circunstancia, unida con la pérdida de capacidad de desplazamiento, hace que el trabajo necesario para inducir la rotura en las probetas vaya siendo significativamente menor a medida que aumenta el grado de trefilado del material de origen; de este modo se observa que para producir la rotura en el acero B0 son necesarios 27.30 kN.mm, así mismo, son necesarios 22.15 kN.mm para alcanzar la rotura en el acero B4 y de 6.80 kN.mm para el acero B7. Estos datos suponen que para llegar a la rotura en el acero B4 se necesita un 81% del trabajo necesario para romper el acero B0, mientras que para el caso del acero B7, éste sólo es capaz de soportar el 25% del trabajo necesario para romper la probeta B0.

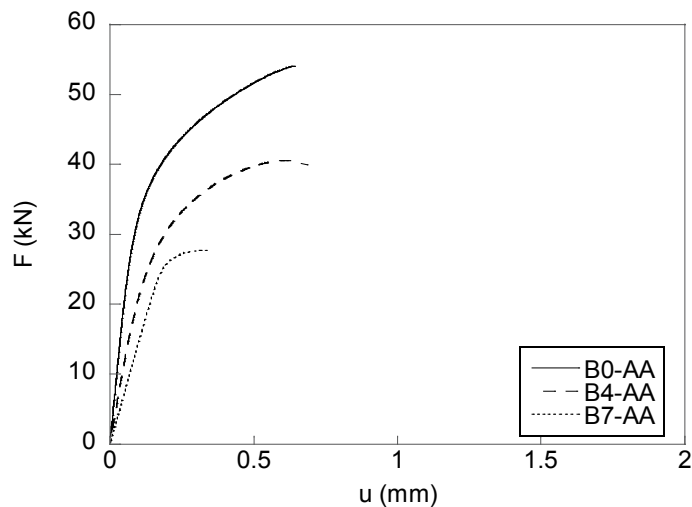


Fig. 2.9. Carga vs desplazamiento de las probetas prismáticas entalladas tipo PAA.

## 2.6. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PCC

### 2.6.1. Acero B0 con entalla tipo CC

Las dimensiones de las entallas de las probetas B0-CC son prácticamente exactas en cuanto al ancho de entalla ( $2\xi$ ), puesto que el error cometido se establece en el orden de las centésimas de milímetro. La mayor dificultad en la mecanización se ha obtenido al ajustar la profundidad

de penetración (C) de las diferentes entallas. La mayor discrepancia se observa entre la probeta B0-CC-1 y B0-CC-3, siendo la probeta B0-CC-2 intermedia a ambas (Tabla 2.11).

Tabla 2.11. Parámetros dimensionales (mm) de las entallas de la muestra B0-CC.

B0-CC-1	B0-CC-2	B0-CC-3
$C_1/C_2 = 0.697/0.704$	$C_1/C_2 = 0.703/0.710$	$C_1/C_2 = 0.711/0.714$
$2\xi_1/2\xi_2 = 3.619/3.608$	$2\xi_1/2\xi_2 = 3.638/3.644$	$2\xi_1/2\xi_2 = 3.668/3.627$

La representación de los datos obtenidos experimentalmente, Fig. 2.10, indica que las muestras presentan la misma curva de respuesta mecánica. Se podría decir que la curva de la probeta B0-CC-3 es ligeramente superior a las otras dos, lo que indica la escasa repercusión de la diferencia dimensional de la forma geométrica de las entallas, ya que es la probeta B0-CC-3 la que, en principio, presenta el entallado más profundo.

El valor de la carga máxima soportada es aproximadamente de 60 kN en las tres probetas, con un desplazamiento de 1.22 mm. La rotura se produce tras la formación del cuello de estricción con un alargamiento máximo alcanzado, en dos de las tres probetas, de 1.8 mm.

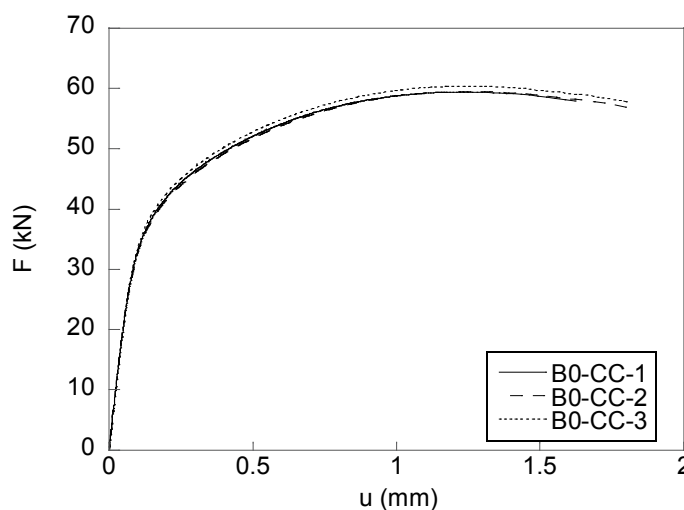


Fig. 2.10. Carga vs desplazamiento de la muestra B0-CC.

### 2.6.2. Acero B4 con entalla tipo CC

Los valores de las dimensiones de las entallas del acero B4 (Tabla 2.12) indican unas discrepancias mínimas en los valores del proceso de entallado. La mayor diferencia se

observa en la entalla de la probeta B4-CC-3, donde se presenta una diferencia en profundidad de penetración, entre ambas entallas, de 32 centésimas de milímetro.

Tabla 2.12. Parámetros dimensionales (mm) de las entallas de la muestra B4-CC.

B4-CC-1	B4-CC-2	B4-CC-3
$C_1/C_2 = 0.569/0.552$	$C_1/C_2 = 0.563/0.548$	$C_1/C_2 = 0.537/0.569$
$2\xi_1/2\xi_2 = 2.833/2.763$	$2\xi_1/2\xi_2 = 2.799/2.744$	$2\xi_1/2\xi_2 = 2.782/2.806$

Como se ha venido observando, no existe diferencia significativa entre las 3 probetas que conforman la muestra B4-CC puesto que, como se observa en la gráfica de la Fig. 2.11, se puede concluir que se trata de la misma curva de respuesta mecánica. La carga máxima soportada se sitúa sobre los 41 kN con un alargamiento de 0.6 mm. Como en el caso del acero B0, la rotura de las tres probetas se produce con la consiguiente formación de un gran cuello de estricción, como denotan tanto el alargamiento máximo alcanzado, el cual es de 1.3 mm cuando se produce la rotura de las tres probetas, como la caída de carga asociada.

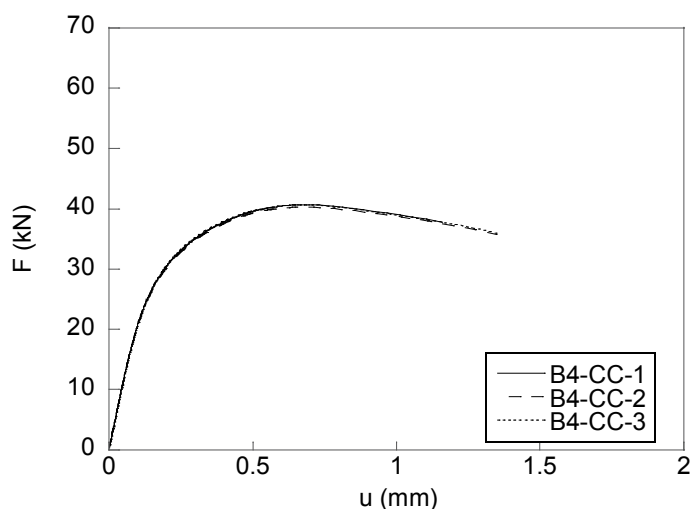


Fig. 2.11. Carga vs desplazamiento de la muestra B4-CC.

### 2.6.3. Acero B7 con entalla tipo CC

La mecanización de las probetas B7-CC ha sido bastante divergente en cuanto a sus dimensiones finales, tal y como se puede comprobar en la Tabla 2.13. Mientras que las probetas B7-CC-1 y B7-CC-3 presentan dimensiones muy similares, la probeta B7-CC-2 se desmarca de esta tendencia, y en ella se establece una diferencia significativa entre sus dos entallas, en las cuales se aprecia una diferencia tanto en cuanto a la profundidad de



penetración como en la distancia entre flancos. Siendo del orden de 100 centésimas de milímetro la diferencia existente en la profundidad de penetración de ambas entallas, que es la mayor discrepancia, hasta el momento, observada en todas las probetas que han sido objeto de análisis, asimismo, también se observa una diferencia de más de 200 centésimas de milímetro en la distancia entre flancos de entalla.

Tabla 2.13. Parámetros dimensionales (mm) de las entallas de la muestra B7-CC.

B7-CC-1	B7-CC-2	B7-CC-3
$C_1/C_2 = 0.433/0.447$	$C_1/C_2 = 0.442/0.564$	$C_1/C_2 = 0.465/0.439$
$2\xi_1/2\xi_2 = 2.180/2.175$	$2\xi_1/2\xi_2 = 2.149/2.385$	$2\xi_1/2\xi_2 = 2.200/2.189$

En cuanto al comportamiento mecánico de las tres probetas del acero B7 es significativamente el mismo para las curvas B7-CC-1 y B7-CC-3, sin embargo, se observa una ligera caída de la carga máxima soportada en la probeta B7-CC-2 respecto las anteriores, como queda reflejado en la Fig. 2.12; además de esta ligera disminución en la carga máxima también se aprecia una disminución en el alargamiento máximo soportado ( $u_{max}$ ). En cuanto al valor de la carga máxima soportada se refiere, ésta es de un valor de 28.78 kN en las probetas B7-CC-1 y B7-CC-3 y de 27.80 kN para la probeta B7-CC-2. En cuanto al alargamiento, se aprecia una ligera disminución para la probeta B7-CC-2, aunque este hecho no se ofrece relevante, puesto que las probetas B7-CC-1 y B7-CC-3 tampoco presentan el mismo dato del alargamiento máximo. A diferencia de lo que ha sucedido en las probetas mecanizadas a partir de los aceros B0 y B4, aquellas probetas mecanizadas a partir del acero B7 no manifiestan, en ninguno de los tres especímenes ensayados, un gran cuello de estricción previo a la rotura final de las mismas por separación total de superficies.

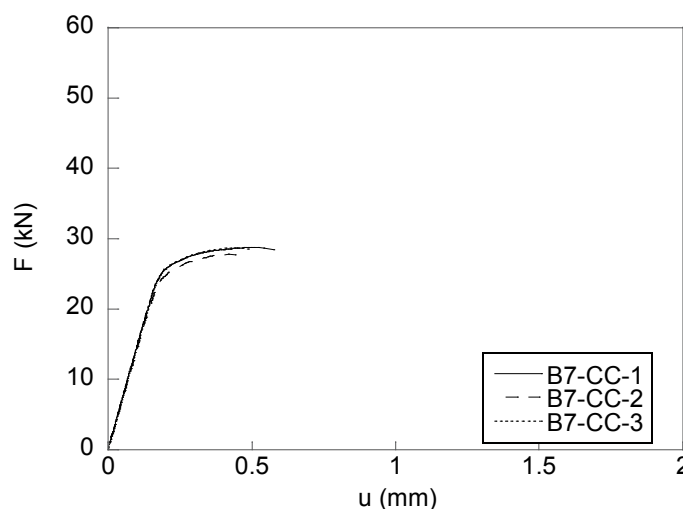


Fig. 2.12. Carga vs desplazamiento de la muestra B7-CC.

#### 2.6.4. Comparación de resultados: probetas PCC

La representación de las probetas intermedias de cada terna (B0-CC, B4-CC y B7-CC) en una misma gráfica (Fig. 2.13) indica una tendencia que ya se observara para las probetas B0-AA, B4-AA y B7-AA, y que se trata de una pérdida de la capacidad de carga y de alargamiento máximo tolerado a medida que aumenta el grado de trefilado al que pertenecen los alambres que se han empleado en la fabricación de las probetas.

Del análisis de los datos se deduce que las probetas mecanizadas a partir del acero B4 tienen un porcentaje de disminución de carga máxima soportada, con relación a aquellas procedentes del acero B0 (alambrón), de un 31%; así mismo, las probetas procedentes del acero B7 (alambre de pretensado comercial) presentan una disminución de la carga máxima soportada, respecto a las correspondientes al acero B0, de aproximadamente el 52%. Esto induce una variación en la cantidad de trabajo necesario para llegar a la rotura de los diferentes aceros. La cantidad de trabajo necesario para inducir la rotura en las probetas B0-CC es de 84.80 kN.mm, para las probetas B4-CC es de 40.74 kN.mm y para las B7-CC es de 13.46 kN.mm. Esto supone que las probetas B4-CC necesitan un 54% del trabajo necesario para romper la probeta B0 y las probetas B7-CC necesitan tan sólo un 16 % del trabajo necesario para romper la probeta B0.

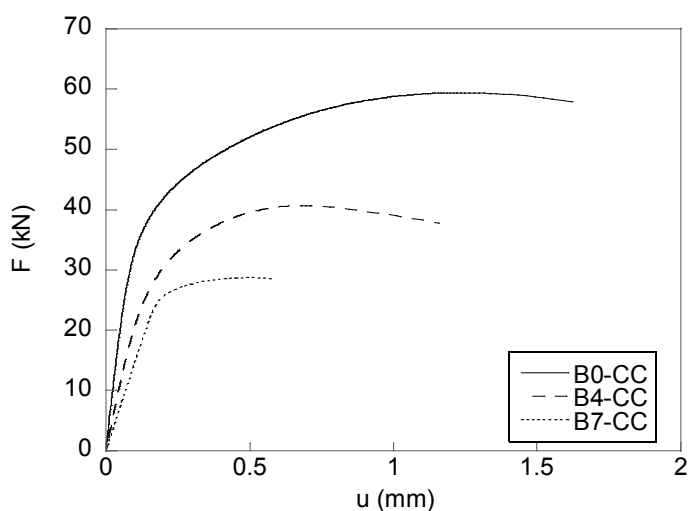


Fig. 2.13. Carga vs desplazamiento de las probetas prismáticas entalladas tipo PCC.

#### 2.7. Probetas prismáticas entalladas PAA vs. PCC

En este apartado se presentan las representaciones gráficas correspondientes a las probetas tipo de cada terna considerada, esto es, las curvas F-u correspondientes a la probeta intermedia de cada terna de acero analizado (B0, B4, B7). De las gráficas representadas a

continuación en las Figs. 2.14, 2.15, 2.16, se concluye que las dos tipologías de probetas prismáticas entalladas (PAA y PCC) presentan una curva de comportamiento con características similares en cuanto a los valores de rigidez; sin embargo, el alargamiento máximo tolerado se reduce sensiblemente para las probetas con entalla AA respecto las probetas con entalla CC.

En cuanto al valor de la carga máxima soportada, se hace necesario hacer una distinción entre el comportamiento del acero B0 y el comportamiento de los aceros B4 y B7. En el caso de los aceros B0, el valor de carga máxima soportada es significativamente menor en las probetas B0-AA que en las probetas B0-CC, mientras que en las probetas procedentes de aceros B4 y B7 el valor de la carga máxima soportada es prácticamente el mismo independientemente del tipo de entalla considerada.

Las diferencias existentes en la carga y el alargamiento máximo soportado inducen una variación en el trabajo necesario para inducir la rotura en las diferentes probetas analizadas, de modo que, se observa lo siguiente:

- > El trabajo necesario para producir la rotura del acero B0 pasa de 84.80 kN.mm en una probeta con entallas tipo CC a 27.30 kN.mm en una con entallas tipo AA, lo que supone un 32% de la soportada por la probeta entallada tipo CC (Fig. 2.14).
- > El trabajo necesario para producir la rotura del acero B4 pasa de 40.73 kN.mm en una probeta con entallas CC a 22.15 kN.mm en una entallas tipo AA, lo que supone un 54% de la soportada por la probeta entallada tipo CC (Fig. 2.15).
- > El trabajo necesario para producir la rotura del acero B7 pasa de 13.46 kN.mm en una probeta con entallas CC a 6.80 kN.mm en una con entallas tipo AA, lo que supone un 51% de la soportada por la probeta con entalla tipo CC (Fig. 2.16).

En cuanto al comportamiento frente al tipo de entalla se refiere los datos indican que cuando se evalúa la carga máxima soportada ( $F_{MÁX}$ ) es en el acero B0 donde se muestra la mayor dispersión de resultados, siendo en los aceros B4 y B7 en los que se mantiene un comportamiento más homogéneo con independencia del tipo de entalla que presenten (puesto que en ambos casos son capaces de soportar la misma carga con una caída en el trabajo necesario para producir la rotura de un 50%). El análisis de la evolución del trabajo necesario para producir la rotura en función del grado de trefilado indica una tendencia que se manifiesta ligeramente diferente, siendo tanto más lineal en las probetas con entallas CC que en las entallas AA.

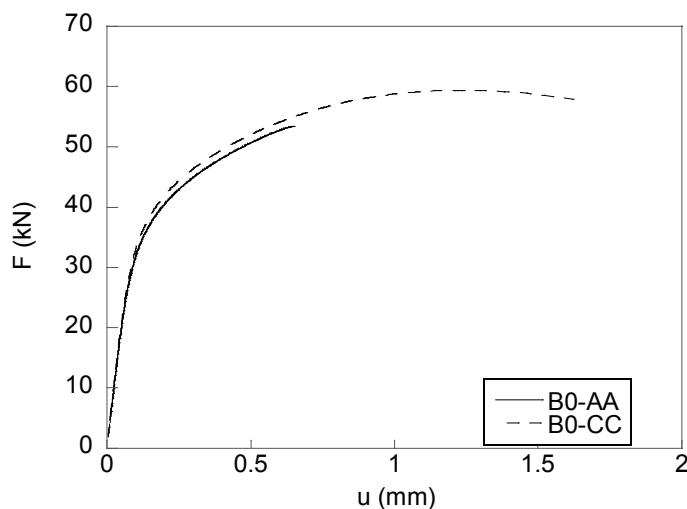


Fig. 2.14. Carga vs desplazamiento: acero B0 con entallas tipo AA y CC.

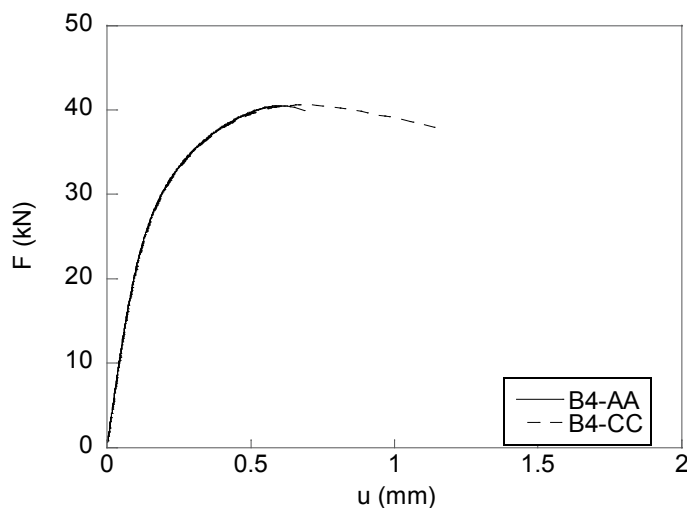


Fig. 2.15. Carga vs desplazamiento: acero B4 con entallas tipo AA y CC.

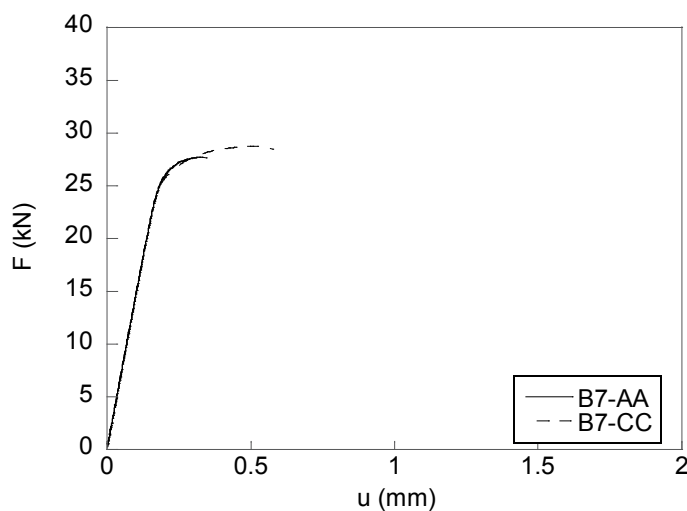


Fig. 2.16. Carga vs desplazamiento: acero B7 con entallas tipo AA y CC.

### 3. ENSAYOS BAJO SOLICITACIONES DE FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS

#### 3.1 Medidas de mecanización primaria. Adquisición de forma prismática. Medidas de mecanización secundaria

Al igual que para el proceso de tracción, para la realización del ensayo de flexión se ha procedido a mecanizar las probetas de acero B que previamente presentaban de fábrica una sección circular. Con el proceso de mecanización primario se pretende que las probetas adopten una forma geométrica exterior prismática. Es, en estas nuevas probetas de sección prismática, donde se van a mecanizar las entallas objeto de estudio mediante el ensayo de flexión por cuatro puntos.

Las dimensiones teóricas, Fig. 2.17, buscan una relación entre el diámetro original de partida ( $\Phi$ ) y el canto ( $W$ ) de la pieza resultante de  $\Phi/W = 1.33$  aproximadamente. Esta relación se pretende para todos los aceros estudiados, de modo que el acero B4 guarda proporcionalidad directa con el B0, y lo mismo se podría decir para el acero B7. El ancho o profundidad ( $B$ ) para las probetas a flexión es la mitad del canto ( $W$ ). En la Tabla 2.14 se presentan los datos teóricos buscados para la mecanización de las probetas con entalla tipo A, así mismo en la Tabla 2.15 se presentan las dimensiones teóricas buscadas en las probetas con entalla tipo C. En ambas tablas,  $H$  es el parámetro que indica la longitud en mm de la probeta.

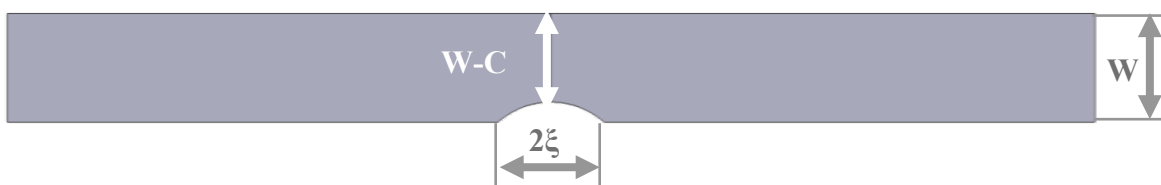


Fig. 2.17. Dimensiones de probeta tipo para ensayo de flexión

Tabla 2.14. Datos previos para la mecanización de las probetas prismáticas sometidas a solicitaciones de flexión por cuatro puntos con entalla tipo A (probetas PA).

PA	$\Phi/W$	H (mm)	B (mm)	W (mm)	C (mm)	R (mm)	$2\xi$ (mm)
$\Phi 12$ (B0)	1.33	90	4.50	9.00	1.78	0.61	1.22
$\Phi 9$ (B4)	1.33	90	3.38	6.75	1.34	0.46	0.92
$\Phi 7$ (B7)	1.33	90	2.63	5.25	1.04	0.36	0.71

Tabla 2.15. Datos previos para la mecanización de las probetas prismáticas sometidas a solicitaciones de flexión por cuatro puntos con entalla tipo C (probetas PC).

PC	$\Phi/B$	H (mm)	B (mm)	W (mm)	C (mm)	R (mm)	$2\xi$ (mm)
<b><math>\Phi 12</math> (B0)</b>	1.33	90	4.50	9.00	1.68	6.56	8.77
<b><math>\Phi 9</math> (B4)</b>	1.33	90	3.38	6.75	1.26	4.92	6.58
<b><math>\Phi 7</math> (B7)</b>	1.33	90	2.63	5.25	0.98	3.83	5.12

La entalla tipo A se caracteriza por presentar pequeña profundidad de penetración (C) así como un radio de curvatura pequeño (R). En la Fig. 2.18 se presenta el alzado y la vista inferior, a escala, de una de las probetas reales que se han obtenido durante el mecanizado. En ella se puede ver como la entalla se localiza en la zona central de la cara inferior, en correspondencia directa con la colocación de la probeta en la máquina de ensayo.

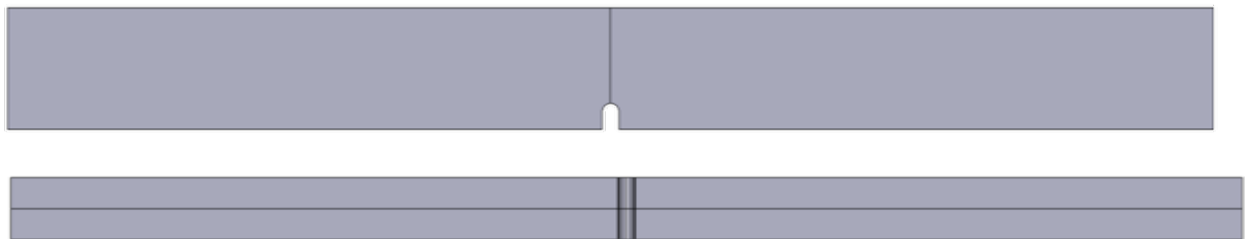


Fig. 2.18. Alzado y vista inferior de la de las probetas tipo PA.

La entalla tipo C se caracteriza por presentar un radio de curvatura mayor que la presentada en la entalla tipo A, pero coincidiendo en cuanto a la profundidad de penetración se refiere. La Fig. 2.19, muestra el alzado y la vista inferior, a escala, de una de las probetas reales que se han obtenido, como en el caso anterior, en el transcurso del proceso de mecanizado. Como se puede observar, existe una clara diferencia entre la geometría que definen en la probeta ambas entallas.

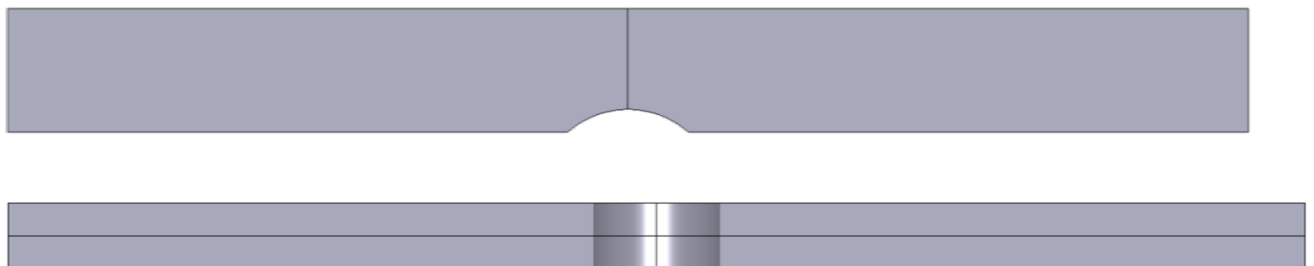


Fig. 2.19. Alzado y vista inferior de la de las probetas tipo PC.

### 3.2. Sistema de designación de las probetas

En cuanto a la identificación de las probetas se mantiene el sistema de designación que ya se presenta para las probetas preparadas para el ensayo de tracción. La única diferencia es el cambio en la designación de las entallas, ya que en este caso cada probeta tiene una única entalla en lugar de las dos del caso anterior. A modo de ejemplo considérese la probeta B0-A-3, la nomenclatura indica que se trata de una probeta mecanizada a partir de un alambión del acero tipo B (B0), la cual posee una única entalla tipo A (pequeño radio y profundidad) y que concretamente se trata de la tercera probeta (3) de la terna considerada. En la Tabla 2.16 se presentan los ensayos realizados sobre el acero B0; así mismo, en la Tabla 2.17 se presentan los ensayos realizados sobre el acero B4 y en la Tabla 2.18 aquellos realizados sobre el acero o alambre de pretensar B7.

Tabla 2.16. Probetas mecanizadas a partir del acero B0 (alambión).

<b>Acero B0</b>	<b>Entalla A</b>	<b>B0-A-1</b>
		<b>B0-A-2</b>
		<b>B0-A-3</b>
	<b>Entalla C</b>	<b>B0-C-1</b>
		<b>B0-C-2</b>
		<b>B0-C-3</b>

Tabla 2.17. Probetas mecanizadas a partir del acero B4 (4° paso de trefilado).

<b>Acero B4</b>	<b>Entalla A</b>	<b>B4-A-1</b>
		<b>B4-A-2</b>
		<b>B4-A-3</b>
	<b>Entalla C</b>	<b>B4-C-1</b>
		<b>B4-C-2</b>
		<b>B0-C-3</b>

Tabla 2.18. Probetas mecanizadas a partir del acero B7 (alambre de pretensar).

<b>Acero B7</b>	<b>Entalla A</b>	<b>B7-A-1</b>
		<b>B7-A-2</b>
		<b>B7-A-3</b>
	<b>Entalla C</b>	<b>B7-C-1</b>
		<b>B7-C-2</b>
		<b>B7-C-3</b>

### 3.3. Dimensiones resultantes del mecanizado de la entalla

El alto grado de dureza que presenta el acero B0 así como las propias dimensiones de las entallas, hace muy difícil, como se comentó previamente, la mecanización de gran precisión; como consecuencia de este factor las dimensiones de las entallas resultantes han sido ligeramente diferentes de los valores teóricos pretendidos.

En la Tabla 2.19 se presentan las dimensiones de las entallas resultantes del proceso de mecanización en las probetas tipo PA, así mismo en la Tabla 2.20 se presentan las dimensiones resultantes de las probetas tipo PC.

Como queda patente en la Tabla 2.19, el principal problema que se ha dado en el mecanizado de las diferentes probetas PA se presenta en el ajuste de la profundidad de penetración (C), ya que tanto el ancho de la entalla ( $2\xi$ ) como el radio de las misma (R) son muy parejos en cada grupo de probetas, siendo en muchos casos inapreciables las diferencias. La mayor dispersión se presenta en las probetas B0-A, donde existe una diferencia en cuanto a la profundidad de entalla de 140 milésimas de milímetro. Para las probetas PC la mayor discrepancia dimensional se observa en el ancho de entalla de las probetas B0, donde se aprecia una diferencia entre probetas de 226 milésimas de milímetro.

Tabla 2.19. Dimensiones (mm) resultantes del proceso de mecanizado secundario en las probetas prismáticas entalladas tipo PA.

PA	C	$2\xi$	R
<b>B0-A-01</b>	1.944	1.241	0.621
<b>B0-A-02</b>	1.919	1.247	0.624
<b>B0-A-03</b>	1.804	1.242	0.621
<b>B4-A-01</b>	1.409	0.935	0.468
<b>B4-A-02</b>	1.411	0.947	0.474
<b>B4-A-03</b>	1.361	0.941	0.471
<b>B7-A-01</b>	1.141	0.753	0.377
<b>B7-A-02</b>	1.095	0.753	0.377
<b>B7-A-03</b>	1.114	0.754	0.377



Tabla 2.20. Dimensiones (mm) resultantes del proceso de mecanizado secundario en las probetas prismáticas entalladas tipo PC.

PC	C	$2\xi$	R
<b>B0-C-01</b>	1.714	8.858	6.579
<b>B0-C-02</b>	1.670	8.780	6.605
<b>B0-C-03</b>	1.787	9.006	6.567
<b>B4-C-01</b>	1.221	6.488	4.920
<b>B4-C-02</b>	1.132	6.320	4.977
<b>B4-C-03</b>	1.148	6.357	4.974
<b>B7-C-01</b>	1.095	5.384	3.857
<b>B7-C-02</b>	1.079	5.358	3.865
<b>B7-C-03</b>	1.035	5.327	3.945

### 3.4. El ensayo de flexión

Hasta hace poco tiempo el ensayo de resistencia a flexión se usaba habitualmente como ensayo complementario al de tracción, reservándose para aquellos materiales que presentaban una elevada capacidad de resistencia mecánica. El utilizar el ensayo de flexión en materiales de elevada resistencia mecánica se debía fundamentalmente a la característica del ensayo, tratándose éste de un ensayo manifiestamente más agresivo que el ensayo de tracción. Esta marcada agresividad se debe fundamentalmente a la presencia de una entalla en la parte inferior de la pieza a ensayar. La entalla genera un estado de tensiones triaxiales que deja la pieza muy vulnerable a la sollicitación concurrente en el ensayo de flexión.

En el ensayo de flexión la probeta es sollicitada a cargas monoaxiales dirigidas en el plano de la entalla. Esto provoca que el material se encuentre sometido a un conjunto de esfuerzos variables según sea su posición de referencia en la probeta, ya que, por una parte se presentan planos perpendiculares a la sección sollicitados a tracción y planos perpendiculares a la sección sollicitados a compresión, pasando por lo que hasta la fecha se consideraba como un plano neutro, el cual, en principio, no se encuentra sollicitado a ningún tipo de sollicitación denominado *fibra neutra*. La posición de la fibra neutra ha sido y es determinante para el

estudio de vigas ya que son estos, elementos que en su vida útil van a estar sometidas a este tipo de solicitación.

Para la realización del ensayo la probeta se dispone sobre dos cilindros de base que actúan como soporte de la misma y que se encuentran a una distancia determinada concretamente por el ensayo específico, que para el presente estudio se ha establecido en 80 mm. Con el fin de evitar el desplazamiento de los cilindros de base en la realización del ensayo se hace necesario habilitar una estructura soporte cuya imagen aparece reflejada en la Fig. 2.20.

Sobre la probeta se disponen los rodillos de ataque que serán los encargados de aplicar la carga. Existen diferentes variedades del ensayo de flexión según sea el número de punzones de ataque. En el presente estudio se trabaja con dos punzones de ataque separados 25 mm los cuales se sitúan equiespaciados del centro de la probeta y presentan un radio de 10 mm.

La probeta previamente mecanizada con la entalla se coloca sobre la máquina teniendo en cuenta que la entalla se ha de situar en el plano inferior, de modo que queda sometida fundamentalmente a esfuerzos que provocan un abertura de la misma (Fig. 2.21).



Fig. 2.20. Máquina MTS-RT/100 con el dispositivo de flexión por cuatro puntos.

El ensayo de flexión por cuatro puntos induce en las probetas un momento flector creciente ( $M_f$ ) con la carga ( $F$ ), siendo directamente proporcional a la misma, y cuya relación se establece a partir de la expresión  $M_f = F(L-D)/4$ , siendo  $L$  la distancia entre apoyos inferiores (80 mm) y  $D$  la distancia de separación entre los dos apoyos superiores (50 mm).

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 estos sólo se ha utilizado una de las máquinas de ensayo, universal servomecánica MTS modelo Alliance RT/100 con una célula de carga de 10 kN de capacidad, y en lugar de utilizar los extensómetros axiales se han realizado las mediciones de desplazamientos con un extensómetro tipo COD (*crack opening displacement*) de la marca MTS modelo 632.03F-20 acoplado con cuchillas de forma equidistante al centro de entalla (Fig. 2.21).

Los parámetros obtenidos del ensayo de flexión que proporciona la máquina a través de sus diversos sensores son: la carga instantánea aplicada, cuyas dimensiones son kN, y el desplazamiento del puente, con dimensiones en mm. Para la medida del incremento de longitud de la zona próxima a la entalla se incorporaron unas cuchillas que permitían la colocación del extensómetro tipo COD (Fig. 2.22) con una base de medida de 12 mm.

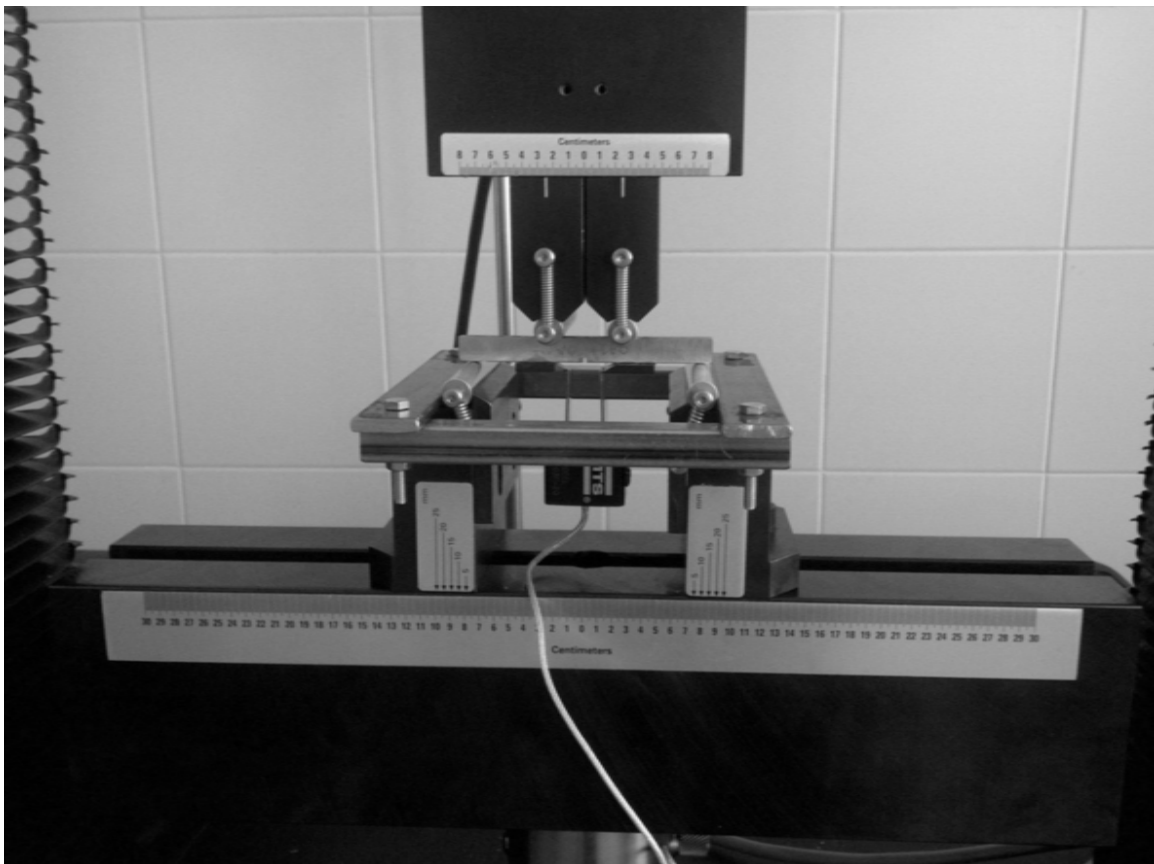


Fig. 2.21. Detalle de la colocación de la probeta con el extensómetro COD incorporado.



Fig. 2.22. Detalle de la colocación de las cuchillas que permiten el soporte del extensómetro.

### 3.5. Presentación de las curvas carga-desplazamiento.

La presentación de las curvas se realiza en dos gráficas, en una primera gráfica se presenta la curva de carga frente al desplazamiento medido por el extensómetro (curvas  $F-u$ ), en una segunda gráfica se presenta la curva de la carga soportada frente al desplazamiento medido por el puente actuador o cruceta de la máquina de ensayo (curvas  $F-u_p$ ). La presentación de ambas gráficas se debe a que no en todos los casos el extensómetro ha llegado a completar el recorrido, puesto que para fijarlo en la probeta ha sido necesario hacer uso de pegamento y en muchos casos éste no ha llegado a soportar los esfuerzos cortantes que se han producido como consecuencia de la elevada deformación que sufre la probeta, y por tanto se ha despegado. Por otra parte, y especialmente para las probetas tipo PC, en ocasiones la deformación en las cercanías de la entalla se hace tan elevada que provoca que las cuchillas se separen una distancia mayor que la que es capaz de soportar el extensómetro, y ello implica la caída del extensómetro antes de la finalización del ensayo.

Para cada acero y tipo de entalla se va a presentar una gráfica en la que se indican los tres ensayos realizados, así como una una tabla en la que se presentan los detalles de las dimensiones de las entallas reales generadas, con el fin de valorar las posibles discrepancias ocasionales que pudiesen aparecer en las gráficas.

### 3.6. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PA

#### 3.6.1. Acero B0 con entalla tipo A

Las dimensiones características de cada una de las entallas se presentan en la Tabla 2.21. Como se puede apreciar en la misma la dimensión característica de la entalla que presenta más variación es la profundidad de penetración (C) de la probeta B0-A-3, que dista en más de cien milésimas de milímetro de la probeta B0-A-2. En cuanto al ancho de entalla se puede afirmar que se trata de la dimensión más homogénea encontrada, presentando en las tres probetas una dispersión que se establece en la centésima de milímetro, siendo esta diferencia de una centésima entre el espécimen uno y tres.

En la gráfica de la Fig. 2.23 se presenta la curva de carga frente al desplazamiento aportados por el extensómetro. La incapacidad del extensómetro para soportar las deformaciones hace que sean únicamente las probetas correspondientes a los especímenes uno y tres las que aporten información referente a la evolución total del proceso de carga, puesto que en la probeta B0-A-2 se pierden los datos como consecuencia de la caída del extensómetro. Los datos reflejan un alargamiento máximo que se sitúa en el entorno de los 2 mm en ambas probetas, con una carga máxima tolerada próxima a los 6 kN.

Tabla. 2.21. Dimensiones características (mm) de las entallas de la muestra B0-A.

B0-A-1	B0-A-2	B0-A-3
$C = 1.944$	$C = 1.919$	$C = 1.804$
$2\xi = 1.241$	$2\xi = 1.247$	$2\xi = 1.242$

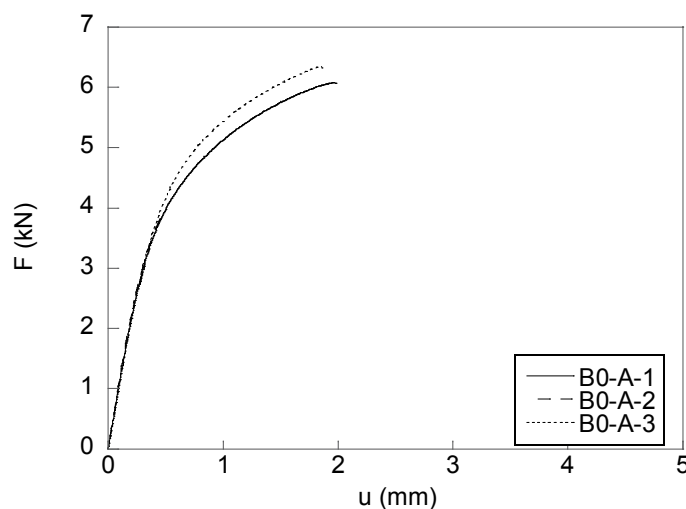


Fig. 2.23. Carga vs desplazamiento (extensómetro) de la muestra B0-A.

Con el fin de completar el estudio se presenta la gráfica de la Fig. 2.24 en la que se presentan los datos correspondientes a la carga frente al desplazamiento del puente (actuador de la máquina de ensayo). La primera observación de los datos que se pretende explicar es la aparición de dos picos en la gráfica de la probeta B0-A-1, que se deben a algún ligero fallo de la máquina de ensayo producido durante el proceso de carga. La presencia de estos picos en la parte inicial de la curva induce a pensar que se podrían deber al asentamiento de la probeta en los rodillos de apoyo como consecuencia de los primeros valores de carga (ajuste de asiento de la probeta contra los rodillos).

Otro dato a observar, aunque escasamente representativo, se debe al comportamiento de la probeta B0-A-3, la cual presenta una curva discretamente más elevada que la curva de las dos probetas previas. Este hecho podría tener una explicación lógica, puesto la probeta B0-A-3 es aquella que presentaba una profundidad de penetración de 115 milésimas de milímetro menor que la probeta B0-A-2, a la cual sigue en profundidad de penetración y que ocupa un lugar intermedio entre las dos gráficas; no obstante, las tres probetas presentan un comportamiento muy semejante y las discrepancias observadas son escasamente significativas, aunque ya son un indicio de lo que podría acontecer.

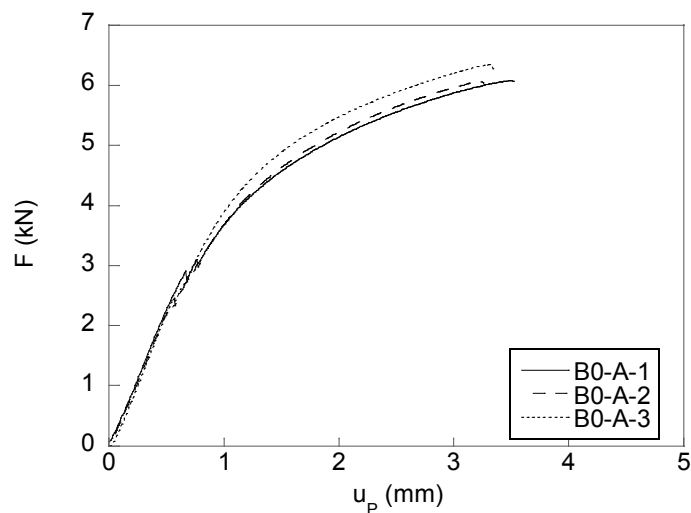


Fig. 2.24. Carga vs desplazamiento (puente) de la muestra B0-A.

### 3.6.2. Acero B4 con entalla tipo A

Las dimensiones características de las entallas de las tres probetas que conforman la muestra aparecen reflejadas en la Tabla 2.22. En este caso, se vuelve a apreciar el mismo hecho que se dio en la muestra B0-A. La probeta n° 3 de la muestra B4-A (B4-A-3) presenta una profundidad de penetración ligeramente menor que las otras dos probetas de la terna, con una diferencia de cuarenta y ocho milésimas de milímetro respecto la B0-A-1, que se trata de la

inmediata superior. En cuanto a las diferencias entre los anchos de entalla, las diferencias son menores y escasamente significativas.

Tabla 2.22. Dimensiones características (mm) de las entallas de la muestra B4-A.

B4-A-1	B4-A-2	B0-A-3
$C = 1.409$	$C = 1.411$	$C = 1.361$
$2\xi = 0.935$	$2\xi = 0.947$	$2\xi = 0.941$

En la representación gráfica de la Fig. 2.25 se presenta la curva de datos de carga frente a alargamiento del extensómetro aportada por la probeta B4-A-2. En las probetas ensayadas (B4-A-1 y B4-A-3) no es posible aportar la curva de carga, debido a que el extensómetro no fue capaz de soportar la deformación inducida en él desde los primeros instantes de carga; no obstante, a la vista de este único ensayo, se observa una disminución substancial sobre todo en la capacidad de carga respecto a los valores encontrados en las probetas mecanizadas a partir de acero B0.

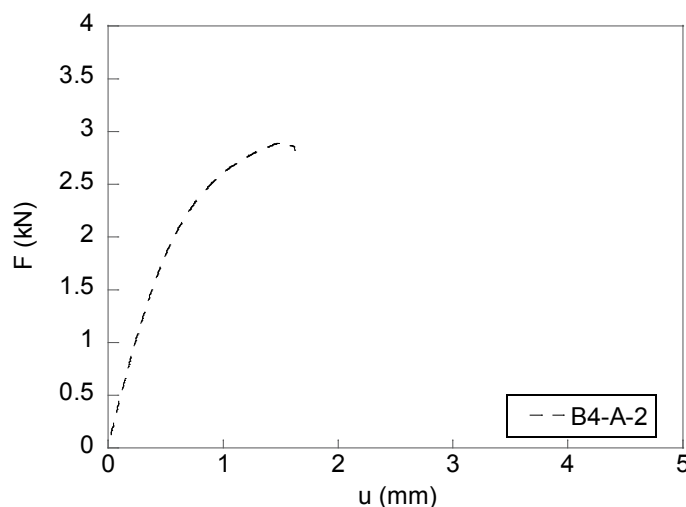


Fig. 2.25. Carga vs desplazamiento (extensómetro) de la probeta B4-A-2.

Como consecuencia de la caída del extensómetro durante el ensayo de flexión por cuatro puntos en las probetas B4-A-1 y B4-A-3, se hace necesario aportar, como en el caso anterior, la curva de carga frente al desplazamiento del puente (o cruceta) aportado por la máquina de ensayo (Fig. 2.26). Los datos del ensayo representados en forma de gráfica en la Fig. 2.26 indican una diferencia mínima entre las tres probetas, que se observa tanto en el valor de la carga máxima soportada como del desplazamiento máximo permitido. Como ya sucediese para las probetas mecanizadas a partir de acero B0, la probeta que presenta la menor

profundidad de entalla (la probeta B4-A-3) es aquella en la cual se observa la mayor carga máxima soportada.

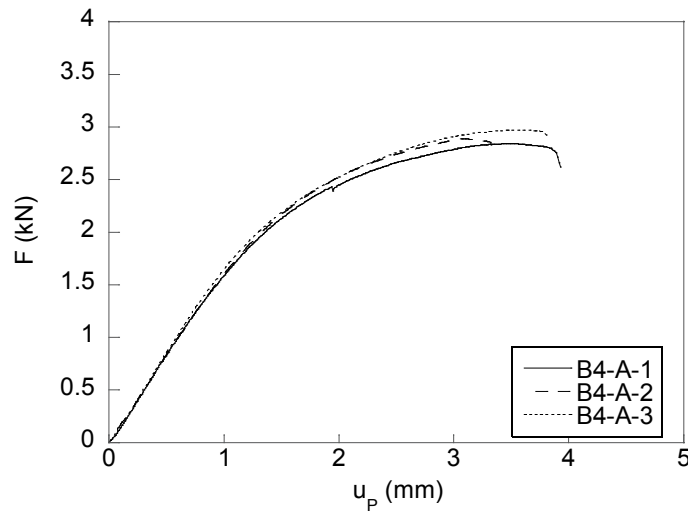


Fig. 2.26. Carga vs desplazamiento (puente) de la muestra B4-A.

### 3.6.3. Acero B7 con entalla tipo A

Observando las dimensiones que conforman la muestra de las probetas B7-A (véase la Tabla 2.23) se aprecia como las tres probetas configuran una muestra muy homogénea con unas características geométricas muy similares. La mayor diferencia observada se presenta en la profundidad de penetración de la entalla de la probeta B7-A-2 con respecto a las dos probetas restantes (B7-A-1 y B7-A-3), aunque, como se puede observar, la diferencia es de tan sólo de diecinueve milésimas de milímetro respecto la probeta inmediata superior, B7-A-3, lo que prácticamente es inapreciable.

Tabla 2.23. Dimensiones características (mm) de las entallas de la muestra B7-A.

B7-A-1	B7-A-2	B7-A-3
$C = 1.141$	$C = 1.095$	$C = 1.114$
$2\xi = 0.753$	$2\xi = 0.753$	$2\xi = 0.754$

En la gráfica de la Fig. 2.27 se presentan los datos de carga frente al desplazamiento del extensómetro, obtenidos para la muestra B7-A. Como se puede observar, la caída del extensómetro, como consecuencia de las condiciones del ensayo, en la probeta B7-A-2, hace que esta probeta no tenga representación en la gráfica. Por ello, como en casos anteriores, es necesario recurrir a la curva de carga vs desplazamiento del puente que se muestra en la gráfica de la Fig. 2.28.



Las curvas de carga vs desplazamiento del actuador de la máquina de ensayo (puente ó cruceta) de las probetas B7 con entalla tipo A se encuentran representadas en la Fig. 2.29, las cuales indican que todas las probetas presentan la misma respuesta mecánica. Esto es debido, tal y como se ha comentado anteriormente, a que la diferencia entre las medidas características de las probetas entalladas no es realmente acusada, y la diferencia entre ellas es poco relevante, tanto desde el punto de vista geométrico como desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

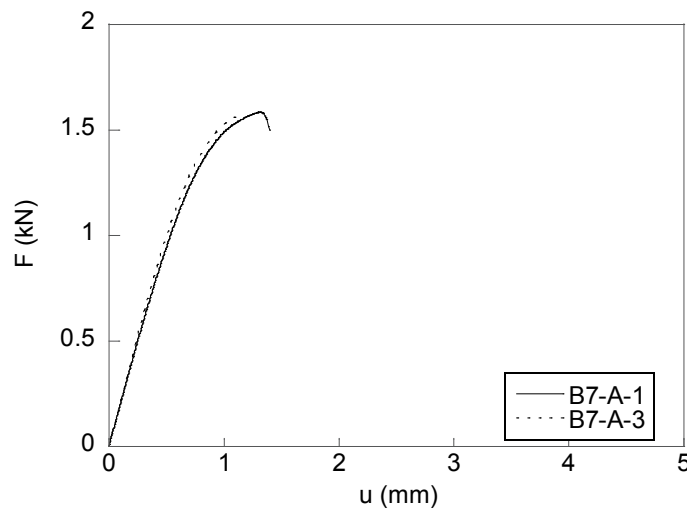


Fig. 2.27. Carga vs desplazamiento (extensómetro) de la muestra B7-A.

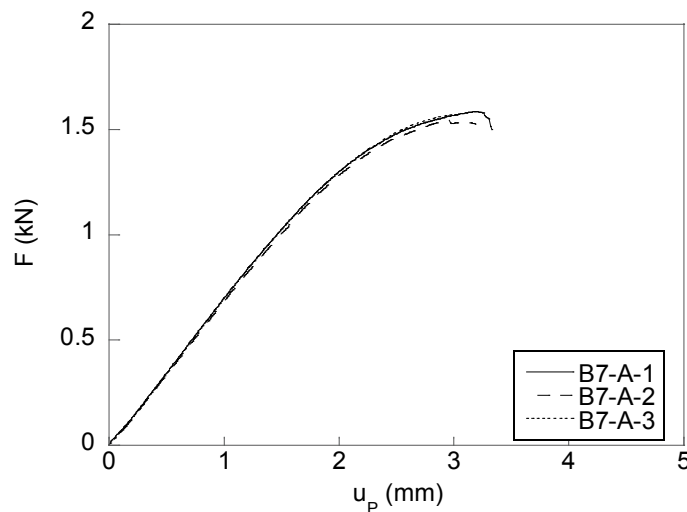


Fig. 2.28. Carga vs desplazamiento (puente) de la muestra B7-A.

### 3.6.4. Comparación de resultados experimentales: probetas tipo PA

Con objeto de analizar el comportamiento mecánico de los diferentes aceros B0, B4 y B7 en la forma de probetas prismáticas tipo PA se presenta la gráfica de la Fig. 2.29. En ella se representan las curvas de comportamiento intermedias para cada terna obtenidas en los ensayos sobre los tres aceros B0, B4, B7. Con el fin de que el análisis sea lo más representativo posible se han utilizado las curvas de comportamiento obtenidas a partir de los datos del desplazamiento del puente, puesto que las curvas obtenidas a partir de los datos obtenidos por el extensómetro en algunos casos son inexistentes, y por tanto el estudio resultaría condicionado por aquellas probetas en las que el extensómetro permaneciese acoplado hasta la finalización del ensayo.

Tras el análisis se observa como el valor de la carga máxima soportada es menor cuanto mayor es el grado de trefilado al que pertenece el alambre origen de la probeta prismática en cuestión, de modo que el acero B4 soporta un 48% de la carga soportada por el acero B0, así mismo se observa que el acero B7 únicamente soporta un 26% de la carga que soporta el acero B0. En cuanto al desplazamiento máximo alcanzado por el puente en el momento de rotura de la probeta, se observa como es aproximadamente común para todas las probetas PA estudiadas, situándose su valor próximo a los 3.5 mm.

Por otra parte, el trabajo necesario para romper la probeta indica una caída del trabajo necesario para inducir la rotura a medida que aumenta el grado de trefilado del acero de base. Esto supone que la probeta B0 necesita un trabajo de 13.81 kN.mm, la probeta B4, 6.61 kN.mm y la probeta B7, 3.34 kN.mm, lo que indica que cada probeta necesita la mitad de trabajo que su inmediata anterior.

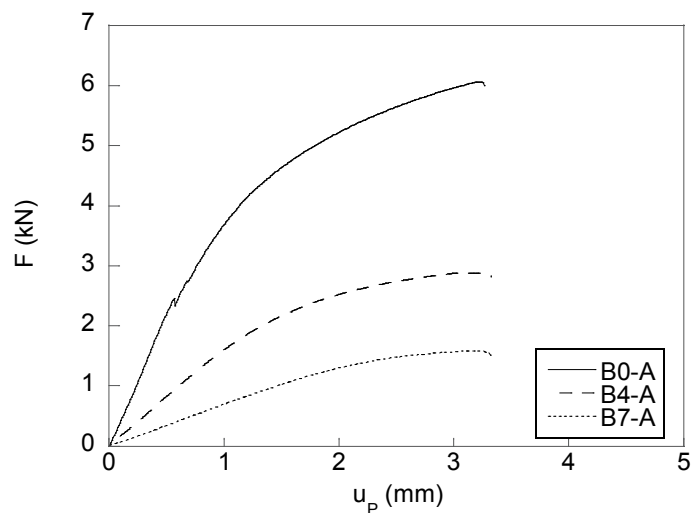


Fig. 2.29. Carga vs desplazamiento (puente) de las probetas prismáticas tipo PA.

### 3.7. Curvas carga vs desplazamiento de las probetas entalladas tipo PC

#### 3.7.1. Acero B0 con entalla tipo C

Los datos dimensionales de las probetas B0 con entalla tipo C (muestra B0-C) son los más dispares que se han encontrado hasta el momento y aparecen reflejados en la Tabla 2.24. Se puede observar como existe una entalla significativamente más pequeña que las demás y que se da en la probeta B0-C-2. Se halla una discrepancia de más de cien milésimas de milímetro entre las probetas B0-C-2 y B0-C-3 en cuanto a la profundidad de penetración de la entalla, mientras que en el ancho de entalla ( $2\xi$ ) se aprecia una diferencia de 226 milésimas de milímetro. En la probeta B0-C-1 se encuentra la entalla que, se podría denominar media, puesto que sus dimensiones se sitúan entre las otras dos que conforman la terna.

Tabla 2.24. Dimensiones características (mm) de las entallas de la muestra B0-C.

B0-C-1	B0-C-2	B0-C-3
$C = 1.714$	$C = 1.670$	$C = 1.787$
$2\xi = 8.858$	$2\xi = 8.780$	$2\xi = 9.006$

En la Fig. 2.30 se presentan los datos de la carga y desplazamiento registrado por el extensómetro. Únicamente el extensómetro de la probeta B0-C-3 fue capaz de soportar todo el ensayo en su plenitud, de modo que, no se dispone de datos para la representación de las otras dos probetas. La carga máxima soportada se halla próxima a los 7 kN (6.8 kN), con un alargamiento del extensómetro en el momento de rotura de 5.93 mm.

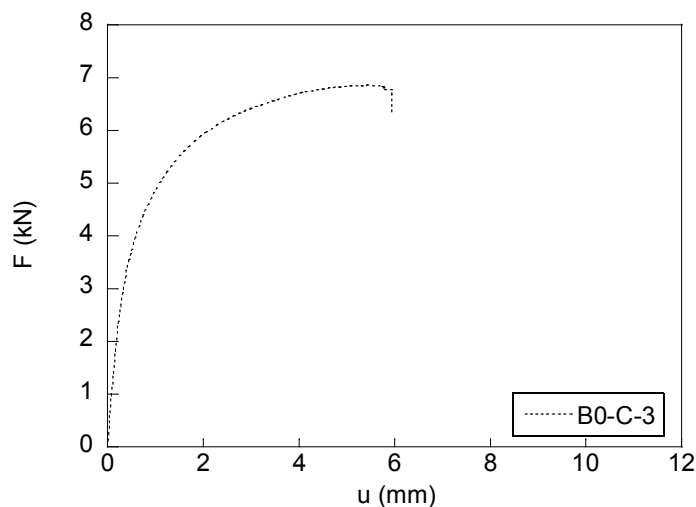


Fig. 2.30. Carga vs desplazamiento (extensómetro) de la muestra B0-C.

En la Fig. 2.31 se presenta la gráfica correspondiente a los datos de ensayo de las tres probetas obtenidos a partir del desplazamiento registrado por el puente actuador. Los datos obtenidos durante el ensayo de flexión muestran la misma tendencia que ya se encontró en los aceros con entalla tipo A. Como no podía ser de otro modo, la probeta B0-C-2 presenta la curva de comportamiento más elevada, y por tanto, es en ella donde se llega a alcanzar el mayor nivel de carga, siendo éste 0.20 kN mayor que en las probetas B0-C-1 y B0-C-3. Esto se debe a que, como ya se ha venido observando en casos anteriores, en ella se presenta la entalla más pequeña de la terna considerada (mayor concentración de tensiones).

Las probetas B0-C-1 y B0-C-3 no presentan un comportamiento significativamente diferente, a pesar de las ligeras diferencias manifiestas en sus dimensiones características. La diferencia más ostensible entre ambas se halla en el desplazamiento del puente, donde se puede apreciar como la probeta B0-C-3 presenta un desplazamiento del puente un milímetro mayor que la probeta B0-C-1 en el instante de rotura; circunstancia ésta que no se podría calificar de altamente significativa.

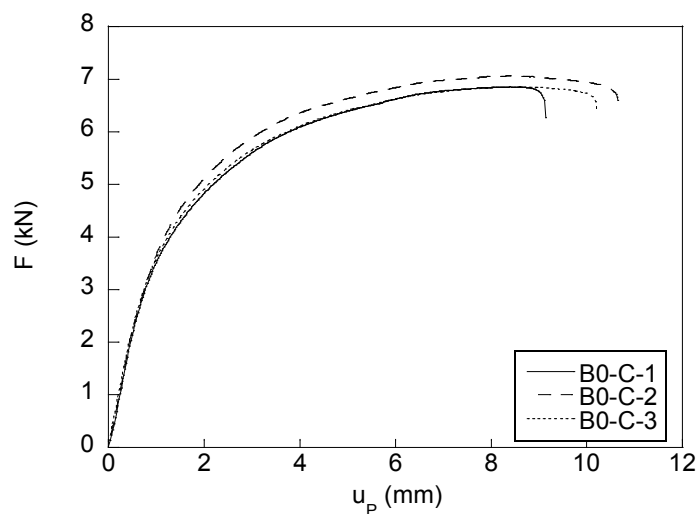


Fig. 2.31. Carga vs desplazamiento (puente) de la muestra B0-C.

### 3.7.2. Acero B4 con entalla tipo C

Del análisis dimensional de las probetas B4-C se concluye la existencia de pequeñas diferencias entre las tres probetas. La entalla más pequeña en el acero B4 se da en la probeta prismática B4-C-2, como se refleja en la Tabla 2.25. La mayor entalla se sitúa en la probeta B4-C-1, con una diferencia de ochenta y nueve milésimas de milímetro en cuanto a la profundidad de penetración se refiere y una diferencia de ancho de entalla de ciento sesenta y ocho milésimas de milímetro con respecto la probeta B4-C-2. La probeta B4-C-3 dimensionalmente presenta una entalla intermedia de las tres consideradas.

Tabla 2.25. Dimensiones características (mm) de las entallas de la muestra B4-C.

B4-C-1	B4-C-2	B4-C-3
$C = 1.221$	$C = 1.132$	$C = 1.148$
$2 \xi = 6.488$	$2 \xi = 6.320$	$2 \xi = 6.357$

En la gráfica de la Fig. 2.32 se presentan los datos que se pudieron recoger del extensómetro. Como se puede observar, únicamente en el caso de la probeta B4-C-3 el extensómetro llegó a concluir el ensayo. Para el resto de las probetas de la terna el extensómetro sucumbió ante la deformación de la probeta antes de concluir el ensayo de flexión por cuatro puntos. La carga máxima soportada por la probeta B4-C-3 se sitúa en 3.27 kN y el alargamiento máximo aportado por el extensómetro en el momento de rotura final de la probeta por separación total de superficies es de 5.20 mm.

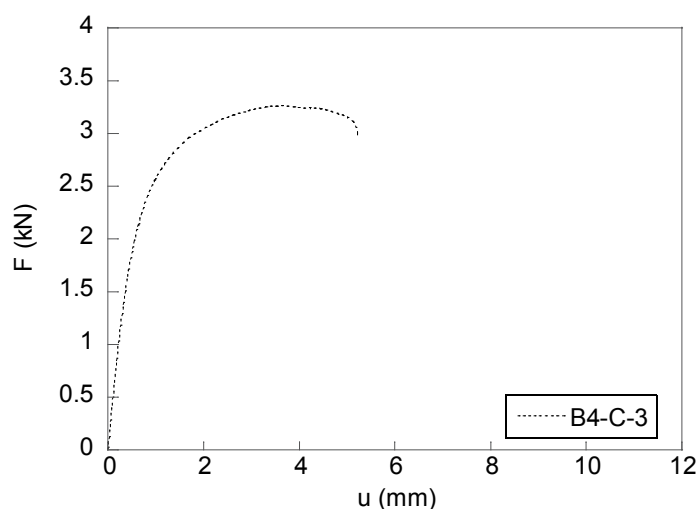


Fig. 2.32. Carga vs alargamiento (extensómetro) de la probeta B4-C.

En la Fig. 2.33 se representan los datos de los tres ensayos realizados sobre la muestra B4-C aportados por la máquina de ensayo a través de la célula de carga y del recorrido del puente. Se vuelven a reproducir los resultados que ya se obtuvieron en ensayos anteriores, donde la probeta que presentaba una menor profundidad de penetración de entalla mostraba también una mayor tolerancia al régimen de carga, de modo que en la gráfica se observa una curva ligeramente más elevada, en cuanto a la carga máxima soportada se refiere, que las probetas restantes de la terna; siendo en este caso la probeta B4-C-2 la que presenta dicha característica. Como en casos anteriores, aunque pudiese parecer una diferencia sustancial, los datos numéricos revelan que la diferencia es menor de 0.10 kN, lo que resulta significativo para la presente Tesis, pero de escaso valor práctico para los ensayos habituales que se realizan sobre este tipo de materiales.

Los desplazamientos del puente máximos registrados durante los ensayos, manifiestan diferencias que se sitúan alrededor del milímetro entre unas probetas y otras; siendo la probeta B4-C-2 la que muestra el valor del desplazamiento del puente más pequeño y de una cuantía de 8.93 mm, le sigue la probeta prismática B4-C-1 que soporta un desplazamiento de 9.73 mm, y por último la probeta prismática B4-C-3 que soporta un desplazamiento de puente de 10.50 mm.

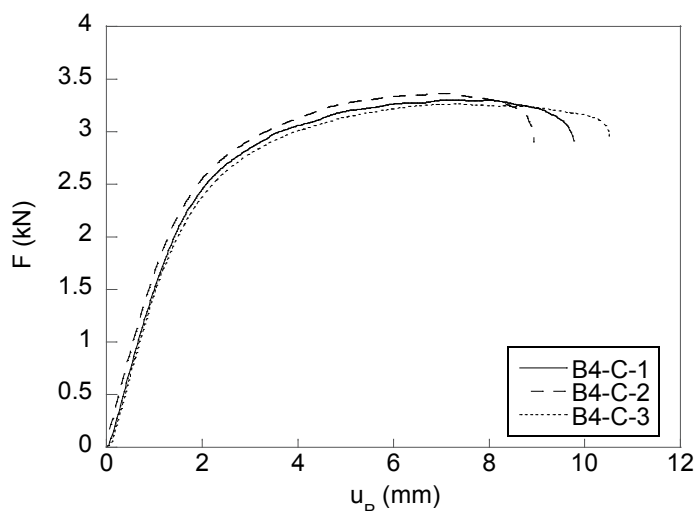


Fig. 2.33. Carga vs desplazamiento (puente) de la muestra B4-C.

### 3.7.3. Acero B7 con entalla tipo C

Las características dimensionales de las muestras con entalla tipo C obtenidas para el acero B7 se muestran en la Tabla 2.26. La probeta B7-C-2 presenta una entalla media entre las probetas números 1 y 3, siendo la probeta B7-C-3 la que presenta la entalla más pequeña con una diferencia de 65 milésimas de milímetro en profundidad de penetración y de 57 milésimas de milímetro en cuanto a ancho de entalla respecto la entalla mayor B7-C-1.

Tabla 2.26. Dimensiones características (mm) de las entallas para la muestra B7-C.

B7-C-1	B7-C-2	B7-C-3
$C = 1.095$	$C = 1.079$	$C = 1.035$
$2 \xi = 5.384$	$2 \xi = 5.358$	$2 \xi = 5.327$

En la gráfica de la Fig. 2.34 se presentan los datos de carga-desplazamiento registrados por el extensómetro. La entalla de la probeta número 3 presenta una curva ligeramente más elevada que las probetas B7-C-1 y B7-C-2, lo que vuelve a reincidir en el hecho de que esta probeta es

la que menos profundidad de penetración presenta, indicando que estas ligeras diferencias en el valor de la profundidad de penetración de las entallas tienen una repercusión, aún siendo escasa, en los valores de carga máxima tolerados, como ha quedado reflejado en las distintas curvas de comportamiento que han sido analizadas a lo largo de todo el proceso experimental referente al ensayo de sollicitación de flexión.

El registro de los desplazamientos (Figs. 2.34 y 2.35) revela que el desplazamiento máximo tolerado se encuentra para la probeta n° 2, presentando la probeta n° 3 un comportamiento medio en la terna considerada, ostentando la diferencia entre los valores máximos y mínimos aproximadamente 1 mm de longitud.

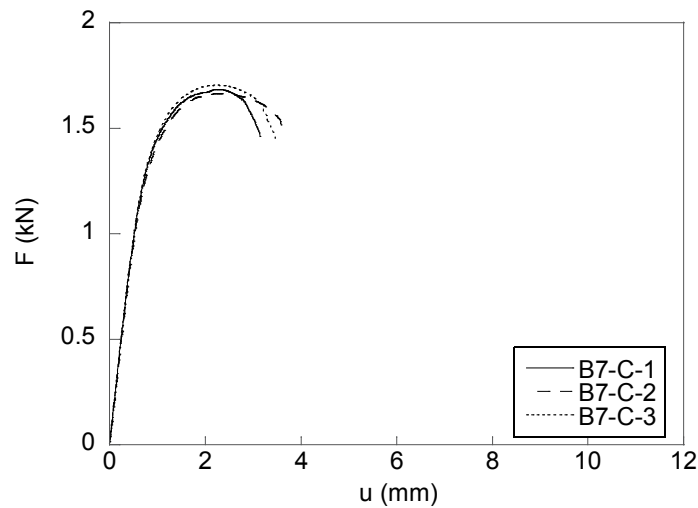


Fig. 2.34. Carga vs alargamiento (extensómetro) de la muestra B7-C.

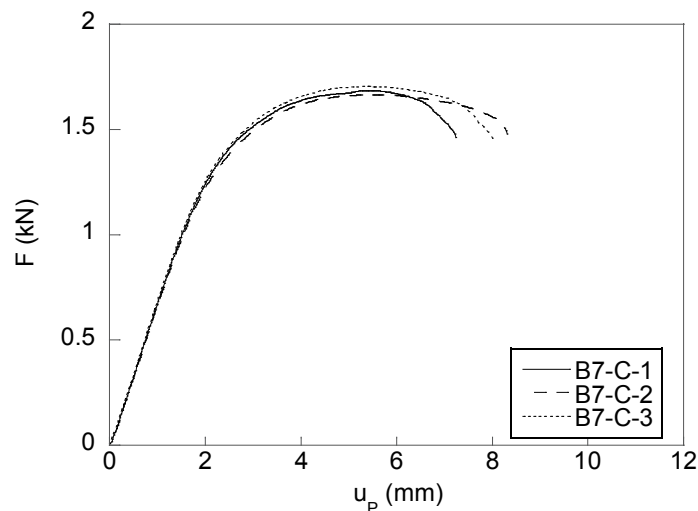


Fig. 2.35. Carga vs desplazamiento (puente) de la muestra B7-C.

### 3.7.4. Comparación de resultados: probetas tipo PC

Las curvas medias características del comportamiento de los tres aceros B0, B4 y B7 con entalla tipo C, se muestran en la gráfica de la Fig. 2.36. En la representación de las tres curvas se puede apreciar que el desplazamiento máximo del puente (en el cual se produce la rotura de la probeta característica de cada tipo de material) disminuye a medida que aumenta el grado de trefilado al que pertenece la probeta prismática en cuestión, *i.e.*, cuanto mayor es el nivel de endurecimiento por deformación del acero, menor es el valor de registro del desplazamiento aportado por el puente.

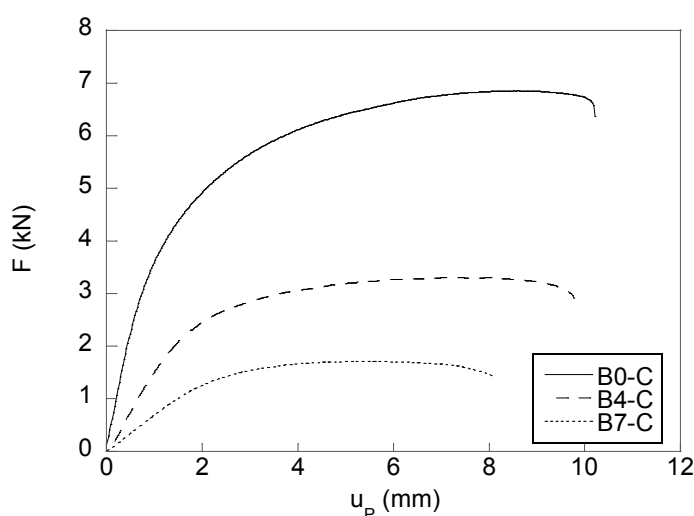


Fig. 2.36. Carga vs desplazamiento (puente) de las probetas prismáticas tipo PC.

Tras el análisis de los datos referentes a la carga máxima soportada se aprecia un dato bastante destacado, y es que el acero B4 experimente una disminución de la carga máxima soportada del 52% respecto el acero B0 y el acero B7 experimenta una disminución del 75% en cuanto a la carga máxima soportada sobre el acero B0. Este dato resulta llamativo, puesto que estos valores resultan ser muy próximos a los que se obtuvieron de los ensayos derivados de las probetas prismáticas entalladas tipo PA.

Del análisis del trabajo necesario para llevar a término la rotura, los datos revelan como a medida que se analizan las probetas de valores más altos de grado de trefilado, se aprecia una disminución del trabajo necesario para inducir la rotura en las probetas características; de modo que, el trabajo necesario para producir la fractura en las distintas probetas pasa de ser 59.02 kN.mm para la probeta B0-C a 26.98 kN.mm para la probeta B4-C y de 11.05 kN.mm para la probeta B7-C; lo que supone una caída consecutiva en los valores del trabajo necesario superiores al 50% en todos los casos.



### 3.8. Probetas prismáticas entalladas PA vs. PC

En este apartado se presentan las representaciones gráficas correspondientes a las curvas comparativas entre las probetas prismáticas entalladas tipo PA y las probetas prismáticas entalladas tipo PC para los aceros B0, B4 y B7 respectivamente (Figs. 2.37, 2.38 y 2.39.)

En la Fig. 2.37 se presenta la gráfica correspondiente a la representación de las curvas de los aceros B0-A y B0-C. En ella se observa como la entalla tipo A resulta ser más agresiva que la entalla tipo C. Este hecho no se manifiesta tanto en el valor de la carga máxima soportada por el acero (en el que se observa una diferencia de 900 N entre las probetas PA y PC) sino que se aprecia fundamentalmente en el valor del desplazamiento máximo permitido (en el que se mide una diferencia de 6.96 mm).

Las diferencias entre la carga máxima soportada y el desplazamiento del puente máximo tolerado acarrearán una diferencia substancial en cuanto al valor del trabajo necesario para generar la rotura en las probetas, pasando de necesitar 59.02 kN.mm para la probeta con entalla tipo C, a necesitar 13.81 kN.mm en la muestra con entalla tipo A; lo que supone que en la rotura de una probeta con entalla tipo A sólo se requiere un 23% del trabajo necesario para romper una probeta con entalla tipo C.

Comparando las entallas A y C de las probetas prismáticas mecanizadas a partir del acero B4, Fig. 2.38, se observa una ligera diferencia en cuanto a la carga máxima tolerada y el desplazamiento del puente máximo permitido entre las probetas entalladas tipo PA y PC. La diferencia más manifiesta se observa en cuanto al desplazamiento del puente, en el que se aprecia una diferencia de 6.37 mm, mientras que la diferencia entre los valores de carga máxima soportada es más sutil, situándose ésta en 500 N. Estas diferencias conllevan que el trabajo necesario para generar la rotura en la probeta pase de 6.61 kN.mm en la probeta A, a 26.98 kN.mm en la probeta con entalla C. Esto supone la necesidad de aportar un 75 % más de trabajo para romper la entalla C que para romper la entalla tipo A.

El comportamiento de las probetas mecanizadas a partir de acero B7 con entallas tipo A y C es semejante al obtenido en las probetas mecanizadas a partir de los aceros B0 y B4 (Fig. 2.39), en el cual se aprecia un ligero decremento en el valor de la carga máxima soportada, siendo esta diferencia menor de 120 N entre las probetas PA y las probetas PC. En cuanto al trabajo necesario para romper las probetas, se observa un aumento substancial entre las probetas con entalla tipo A (PA) a las probetas con entalla tipo C (PC), pasando de necesitar un trabajo de 3.34 kN.mm en la probeta con entalla tipo A a un valor de 11.05 kN.mm para la probeta con entalla tipo C.

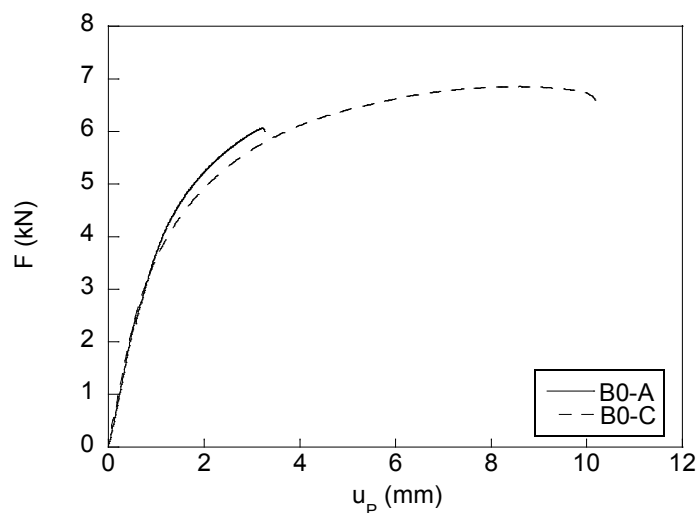


Fig. 2.37. Carga vs desplazamiento (puente) de las probetas B0 con entallas tipo A y C.

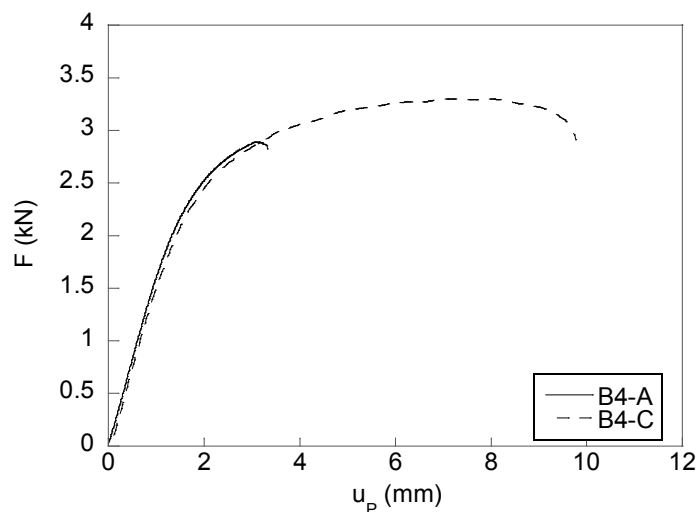


Fig. 2.38. Carga vs desplazamiento (puente) de las probetas B4 con entalla tipo A y C.

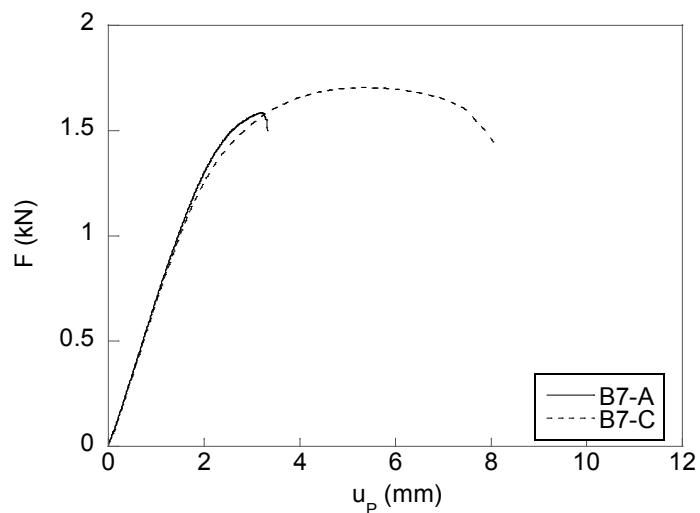


Fig. 2.39. Carga vs desplazamiento (puente) de las probetas B7 con entalla tipo A y C.



## CAPÍTULO III: ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de análisis de la superficie de fractura se va a realizar mediante la toma de fractografías de la misma. Para ello ha sido necesario el uso del microscopio electrónico de barrido (MEB). Para realizar mediciones sobre las fractografías, así como levantamientos tridimensionales de determinadas zonas, ha sido necesaria la utilización de dos programas de análisis de imagen que proporcionan información sobre las diferentes imágenes fractográficas.

El MEB se ha constituido como uno de los elementos de uso imprescindible en un laboratorio de análisis fractográfico, puesto que es capaz de proporcionar gran detalle de las imágenes correspondientes a los diversos micromecanismos que gobiernan el proceso de fractura. Basa su funcionamiento en la proyección de un haz de electrones sobre la muestra. A diferencia del microscopio electrónico de transmisión (MET) el MEB proporciona información sobre la superficie de la muestra. Una descripción de un MEB general, indicaría que está formado por unas bobinas de barrido que inducen un barrido de un haz de electrones, que previamente han pasado por unas lentes condensadoras y de objetivo, sobre toda la superficie objeto de estudio. Al mismo tiempo que se realiza el barrido sobre la muestra, el sistema de detección cuenta el número de electrones secundarios generados en cada punto de la misma. Estos electrones

secundarios, al ser de baja energía, han sido generados en la superficie de la muestra, de modo que la imagen generada se corresponde con la superficie de la misma. Finalmente un tubo de rayos catódicos (TRC) es el encargado de generar el contraste para proporcionar la imagen final. El haz de electrones procedente del sistema de detección y los del TRC son barridos, dando lugar a una imagen ampliada (ALBELLA, ET. AL,1993). El microscopio utilizado para la realización de la presente Tesis es de la marca JEOL, modelo JSM-5610LV.

Una vez obtenida la imagen deseada se procede a realizar un estudio de las fractografías obtenidas, para ello se hace uso de dos programas de análisis de imagen (*Analisis* e *Imagen*), ambos de similares características. Hacer uso de uno u otro, va a venir prescrito por los objetivos que se pretendan establecer en cada caso, por ejemplo, el montaje de las imágenes se va a realizar con el programa *Analisis*<sup>®</sup>, puesto que proporciona un interfaz más sencilla, mientras que el análisis de la topografía y textura de la superficie se va a generar con el software denominado *Imagen*. Las mediciones se hacen indistintamente con uno u otro software puesto que la forma de trabajo es semejante.

Las diferentes zonas de fractura que van a ser sujetas a medición son: la *zona de proceso de fractura* (ZPF), la *zona intermedia* (ZI) y la *corona exterior* (CE) o labio cortante, (ASM (1995b)). En la Fig. 3.1 se presenta, a modo de ejemplo, la imagen correspondiente a la probeta B0-CC-1, en ella se aprecien claramente los diferentes micromecanismos básicos de fractura. En general, no va a ser usual encontrar una fractografía en la que se aprecien los diferentes mecanismos de fractura de un modo tan evidente, puesto que en la mayoría de los casos se van a presentar simultáneamente varios micromecanismos de fractura, de modo que la frontera entre ellos se difumina y no se aprecia de un modo tan claro.

En la imagen (Fig. 3.1) se aprecia una primera zona adyacente a la entalla de la probeta que se denomina zona de proceso de fractura (ZPF) y que se va a caracterizar por la presencia de microhuecos de muy diversos tamaños, dichos microhuecos se unen en lo que habitualmente se conoce como coalescencia de microhuecos (CMH), aunque para la ZPF, debido a la peculiar apariencia de esta fractura por coalescencia de microhuecos, se le aplicará el acrónimo CMH\*. La ZPF es el lugar en el cuál se inicia la fractura de manera estable. Una vez iniciada va aumentando progresivamente de tamaño hasta que dicha ZPF alcanza un tamaño crítico, momento en el cuál se produce un desequilibrio en la misma, de modo que hace que comience a propagarse de un modo inestable hasta que se alcanza la fractura por separación total de superficies. Este modo inestable de propagación es el que visualmente nos deja la textura característica de la zona intermedia (ZI), que habitualmente se encuentra formada casi exclusivamente por clivaje (C), especialmente en el caso del alambrón. Inmersos en la ZI se pueden localizar arcos radiales que parten del perímetro de la ZPF y que se dirigen

hacia el perímetro de la probeta, resaltando la imagen surqueada característica de la zona ZI. A medida que los arcos radiales a la ZPF se aproximan al perímetro de la probeta, configuran otra zona de la superficie de fractura conocida como corona exterior (CE) o labio cortante. Esta superficie exterior presenta una fractografía con una textura marcadamente uniforme en la que se disponen microhuecos de pequeño tamaño distribuidos homogéneamente a lo largo de la misma (CMH).

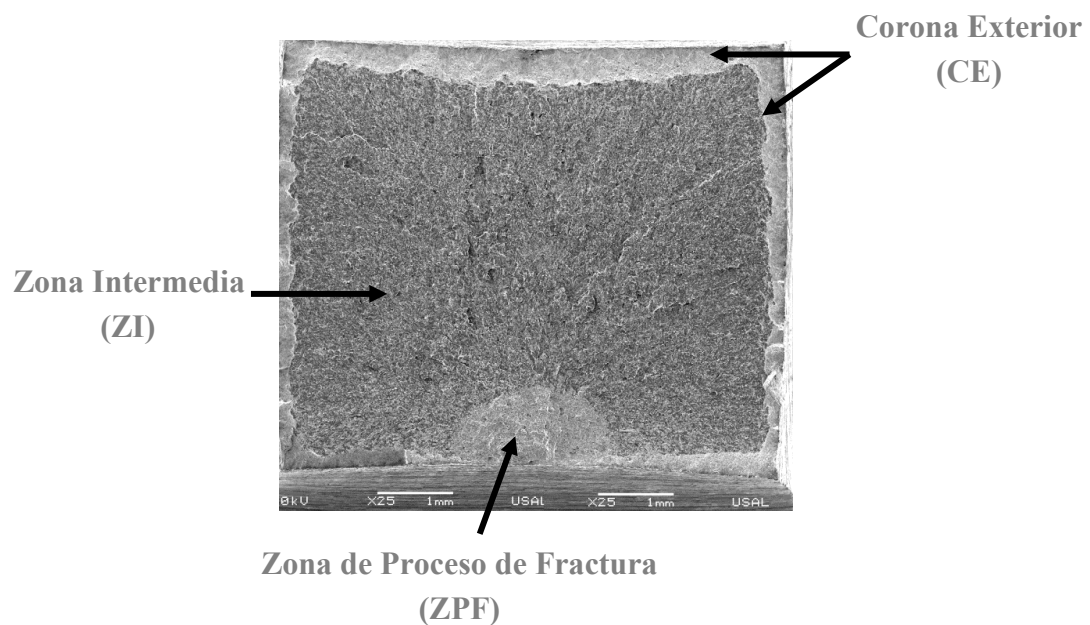


Fig. 3.1. Zonas características de la superficie de fractura.

La medición de las áreas de ZPF, ZI y CE se ha realizado de acuerdo a una técnica visual manual, no sin ser conscientes de la imprecisión que esto conlleva. En un principio se trató de hacer el estudio fractográfico mediante un programa de análisis de imagen, pero los resultados obtenidos no fueron del todo satisfactorios, ello debido a que las variaciones en el valor que toma cada pixel son excesivamente amplias y muy semejantes entre cada una de las diferentes zonas que se establecen en el proceso de fractura. Solucionar este problema implicaría la necesidad de un sistema de calibrado en la imagen para cada una de las zonas de fractura, de modo que se estableciese de un modo concreto un valor de pixel para cada una de las zonas presentes en la fractografía de la imagen. Este sistema de calibrado, del valor de pixel, debería ser establecido para cualquier fractografía, pero ello conlleva la necesidad de garantizar las mismas condiciones experimentales al realizar las fractografías y esto incluye la necesidad de realizarlas en un mismo plano. La imposibilidad de este último hecho limita las posibilidades en la generación de un sistema de calibrado de la imagen, ya que la fractografía en general

presenta un carácter anisótropo en el cuál la fractura va siguiendo diferentes planos, dejando a su paso un sistema irregular.

El análisis fractográfico se hará en dos secciones, en una primera sección se analizarán las fractografías de las muestras prismáticas entalladas sometidas a sollicitaciones de tracción (probetas PAA y PCC); la segunda sección centra su estudio en las probetas prismáticas entalladas sometidas a sollicitaciones de flexión por cuatro puntos (probetas PA y PC).

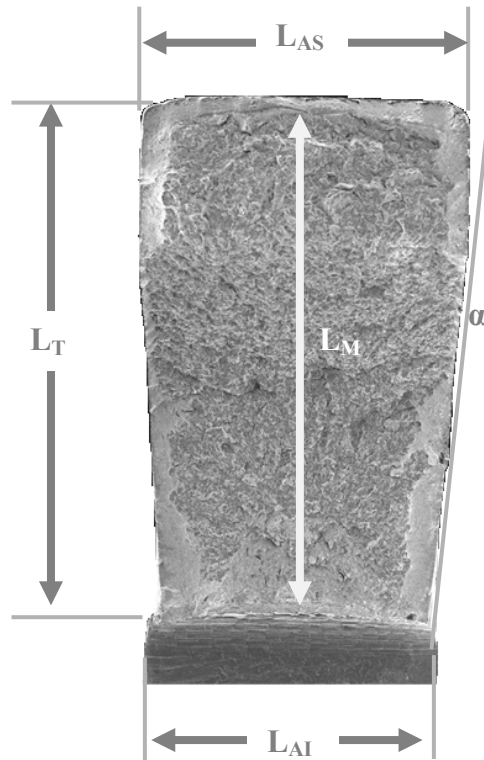
La elevada cantidad de fractografías tomadas para la presente Tesis comporta un estudio excesivamente amplio para presentarlo en un solo capítulo, de modo que se ha optado por tratar los elementos más representativos en el presente capítulo, dejando una cierta cantidad de imágenes que se reflejan en el Anexo I de fractografía. Para dicho Anexo de fractografía se ha dejado una secuencia de imágenes donde se presentan las diferentes zonas analizadas en cada probeta en particular.

En cada epígrafe del presente capítulo se desarrollará en primer lugar un análisis de todas las probetas que se han obtenido, mostrando las características básicas (tamaño de la CE, ZI y ZPF), así como la forma más representativa de las mismas.

Debido a la alta deformación que se presenta en el caso de las probetas sollicitadas a flexión, se ha estimado la necesidad de aportar un número mayor de mediciones que las que comportan el ensayo de tracción. En la imagen de la Fig. 3.2. se presenta en detalle un esquema en el que se disponen las medidas que se han estimado convenientes; no obstante, no se presentan todas las medidas realizadas en el dibujo, puesto que se produciría un exceso de líneas que desfiguraría el mismo y sería poco aclaratorio, por lo que se ha dejado para la descripción que aparecerá en apartados posteriores.

En la toma de medidas se ha tratado de obtener las dimensiones de la sección en el instante de rotura del material. En algunos casos, hay medidas que no aparecen, bien por no ser representativas o bien porque en algún caso no ha sido posible determinarlas, como es el caso de la probeta B4-C-1, la cual no sufrió la rotura final por separación total de superficies una vez finalizado el ensayo. En cualquier caso, y siempre que ha sido posible, para las probetas sollicitadas a flexión se ha medido: la longitud del ancho superior, medio e inferior; la longitud máxima de la probeta en dirección perpendicular a la entalla, así como la longitud en el punto medio de la entalla (véase la Fig. 3.2). En cuanto al área de las mismas, se ha medido el área de la sección de rotura así como el área de la zona de proceso de fractura (ZPF), de la zona intermedia (ZI) y de la corona exterior (CE); sin embargo, como se ha comentado

anteriormente en algunos casos la singularidad de las fractografías hacen que esta apreciación tenga cierto grado de subjetividad.



$L_{AS}$ : longitud del ancho superior  
 $L_{AI}$ : longitud del ancho inferior  
 $L_{AM}$ : longitud del ancho mitad  
 $L_T$ : máxima longitud de la probeta sin entalla  
 $L_M$ : longitud de la probeta en la sección media

A: Ángulo de la zona de contracción  
 $A_T$ : área total de la sección de rotura  
 $A_{ZPF}$ : área de la zona de proceso de fractura  
 $A_{ZI}$ : área de la zona intermedia  
 $A_{CE}$ : área de la corona exterior

Fig. 3.2. Detalle de las dimensiones tomadas en las probetas sometidas a solicitaciones de flexión por cuatro puntos (probetas PA y PC).

Una vez que se han detallado las medidas características de cada una de las probetas se procede a realizar un análisis individual de la probeta representativa de cada terna ensayada, describiendo la superficie de fractura desde el punto de vista de los micromecanismos de fractura que la gobiernan; para ello se presentará una imagen general de la superficie de fractura de la probeta en cuestión y en la que se destacan unas ampliaciones de las zonas que se van a analizar con mayor detalle.



Una vez definida la secuencia de imágenes elegidas se pasan a analizar detalladamente, para ello, y siempre que sea posible, se empezará analizando las imágenes de arriba hacia abajo, es decir de la zona superior de la imagen hacia la zona inferior, dejando para el final la zona de mayor interés, que como no puede ser de otro modo, se trata de la ZPF.

En cada una de las zonas se detallarán las características más singulares que la conforman, presencia de microfisuras, análisis de los tamaños y de las formas geométricas de los microhuecos presentes, presencia de partículas aisladas, etc.

Siempre que sea posible se levantará una imagen tridimensional de los diferentes detalles, como pudieran ser los microhuecos presentes. Aunque, en cada una de las imágenes se analizan varios microhuecos, sólo se han presentado aquellos más relevantes, bien haya sido por su elevado tamaño o porque presentaban la mejor disposición para la representación tridimensional, ya que no todos los microhuecos son factibles para el levantamiento de su imagen tridimensional. La representación tridimensional es clave cuando se trata de representar la textura de la superficie, puesto que ensalza visualmente las diferencias que se le escapan al *ojo humano*. Ciertamente es un trabajo que se podría realizar con el microscopio del mismo modo, pero esto encarecería excesivamente el estudio, ya que serían necesarias multitud de fractografías de cada una de las zonas en particular. El programa de análisis de imagen economiza de manera relevante el proceso, revelando zonas que no han sido analizadas mediante el MEB.

Se deja para el capítulo de Anexos (Anexo I) las secuencias de fractografías que hacen un recorrido a través de la sección de la superficie de fractura de cada una de las probetas que se han detallado previamente. Se deja también para el capítulo de Anexos las imágenes que componen los mapas característicos de la superficie de fractura de las tres probetas que componen cada muestra y que revelan tanto las similitudes como las discrepancias que se pueden observar en el proceso de fractura de las mismas.

## 2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO: PROBETAS PRISMÁTICAS DE TRACCIÓN

### 2.1. Análisis fractográfico de la muestra B0-AA

En la superficie de fractura de las probetas B0-AA (sirva como ejemplo la superficie de fractura de la probeta B0-AA-1 mostrada en la Fig. 3.3) se muestran de modo preciso las tres zonas típicas de la misma. La primera zona bordea toda la sección de rotura y se conoce como la corona exterior (CE). La segunda zona ocupa la práctica totalidad de la probeta y se denomina zona intermedia (ZI) y una tercera zona situada en la zona inferior de la imagen que configura la zona de proceso de fractura (ZPF).

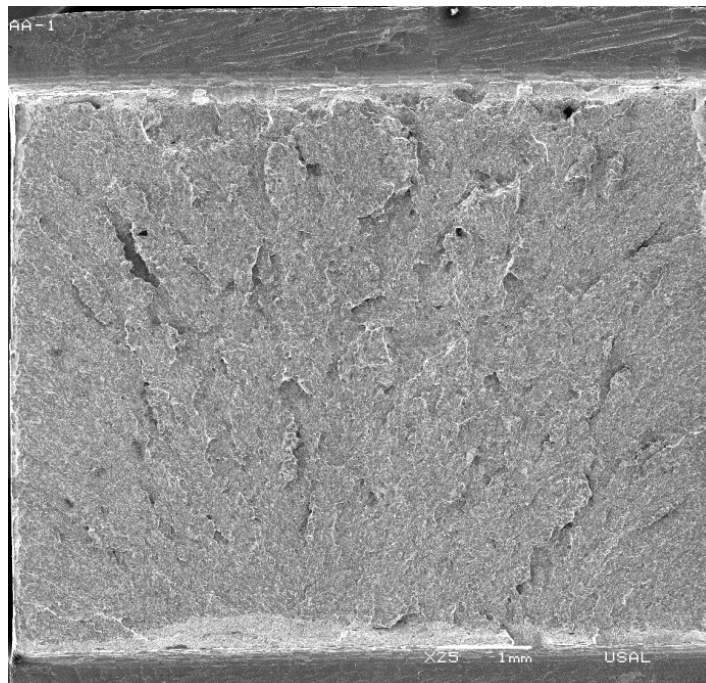


Fig. 3.3. Superficie de fractura correspondiente a la probeta B0-AA-1.

La CE se presenta a lo largo del perímetro de la sección de fractura, de escasa presencia en los laterales pero de mayor amplitud en la zona correspondiente a las dos entallas (partes superior e inferior de la Figura 3.3). Considerando la totalidad de la superficie de fractura, se tiene que la CE ocupa un porcentaje que oscila desde el 4% del área total de la superficie en la probeta B0-AA-1 al 7% en la probeta B0-AA-2.

La ZI está dominada casi única y exclusivamente por la presencia del clivaje (C), presenta una morfología formada por marcas radiales que parte de la ZPF y se extiende hasta el borde exterior de la probeta ocupando el 92% de la sección de rotura en las probetas B0-A-1 y B0-A-3 y del 89% en la probeta B0-A-2.

La zona de proceso de fractura se localiza en la entalla y se extiende aproximadamente entre el 3% de la sección total de fractura de la probeta B0-A-3 y el 5% de la probeta B0-A-2. Presenta una forma geométrica alargada con un máximo de profundidad en la probeta desplazado hacia el tercio izquierdo inferior de la imagen, hecho que va a ser característico de las tres probetas tipo B0-AA, tal y como se puede apreciar en las imágenes de las demás probetas de la muestra que aparecen en forma de imágenes dentro del apartado de la Tesis dedicada a los anexos, (Anexo I).

El análisis de una sección longitudinal de la fractografía de la probeta B0-AA-1, comenzando por la zona superior, indica que el material presenta en la entalla superior una fractografía formada por la coalescencia de microhuecos (CMH) dispersos con un tamaño más o menos regular. La textura que se aprecia es suave y no denotando cambios abruptos en el material, salvo en pequeñas zonas puntuales, tal y como se puede ver en la Fig. 3.4.

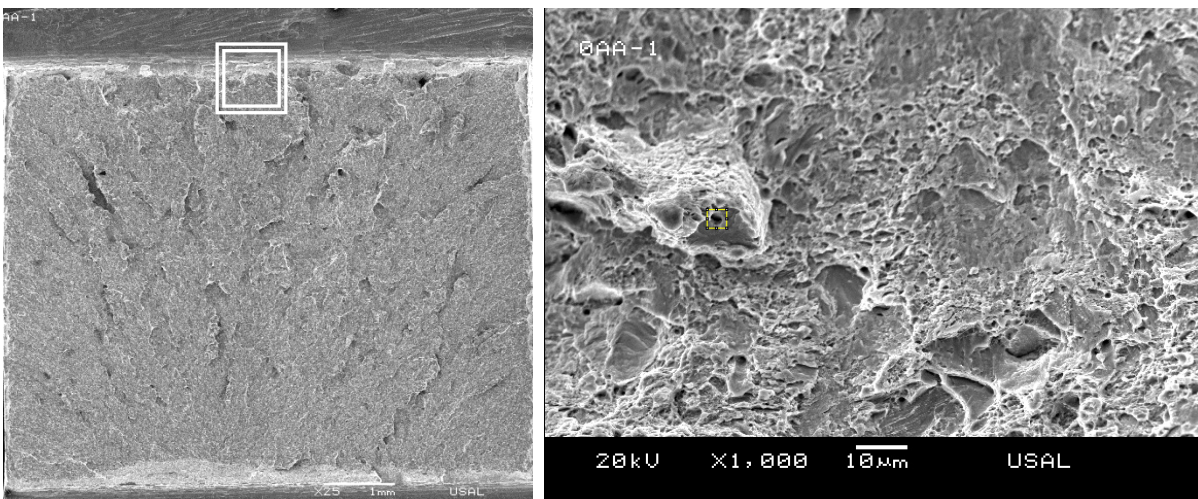


Fig. 3.4. Micro-Fractografía a 1000 aumentos de la corona exterior situada en la entalla superior de la probeta B0-AA-1.

De los diversos microhuecos observados, se presenta en la Fig. 3.5, en la parte derecha de la figura, la imagen más representativa de todos ellos. Ésta se corresponde con un microhueco que se encuentra situado en la parte izquierda de la imagen y que en ésta aparece enmarcado mediante un rectángulo blanco. El microhueco presenta una forma geométrica próxima a la esférica con un diámetro del orden de  $3\ \mu\text{m}$ . La textura interna que se observa en la recreación tridimensional del mismo es aparentemente regular, así como la textura en la que se encuentra inmerso, aunque ligeramente más marcada que en aquella. El tamaño y la dispersión de los microhuecos hallados a lo largo de toda la microfractografía son característicos de la superficie correspondiente a la CE o labio dúctil cortante y en principio no se ha notado la presencia de ZPF, como consecuencia de la presencia de la entalla superior, en ninguno de los puntos observados de la misma.

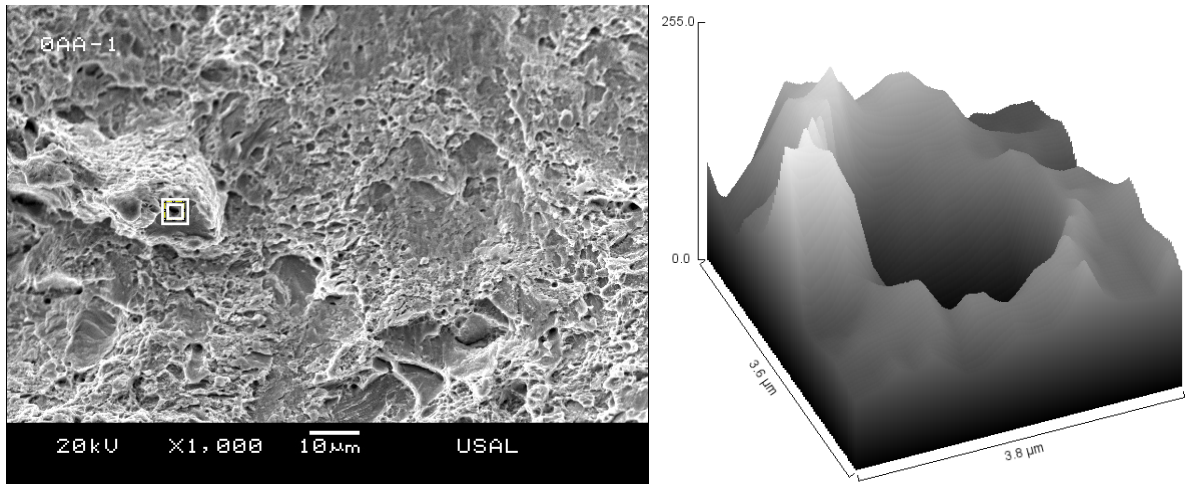


Fig. 3.5. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos en la corona exterior.

A medida que se desciende longitudinalmente a través de la sección, la imagen fractográfica cambia y se aprecia que el micromecanismo de fractura dominante es el clivaje, como se puede apreciar claramente en la Fig. 3.6. Se trata de un clivaje prácticamente puro, en el sentido de que es escasa la presencia de CMH inmersos en dicha zona. El clivaje se encuentra extendido a la práctica totalidad de la sección de rotura de la probeta, ocupando aproximadamente el 90% de la superficie de fractura total.

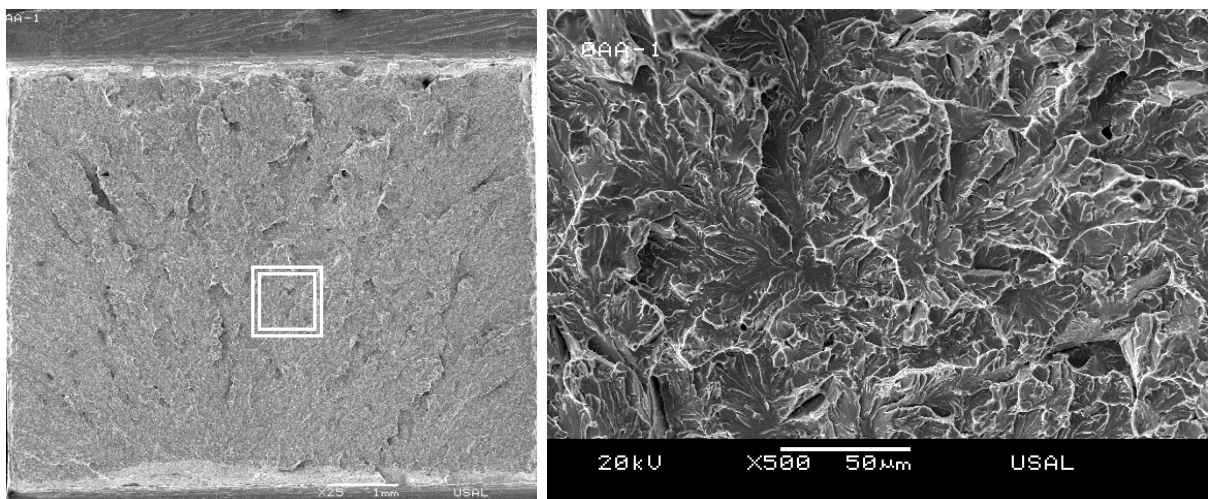


Fig. 3.6. Fractografía correspondiente a la zona intermedia (ZI), fractura por clivaje (C).

La fractografía en las inmediaciones de la entalla inferior de la probeta sufre un cambio substancial, pasando de estar formada por clivajes a estar formada casi y exclusivamente por microhuecos, dando lugar con ello, a la fractografía característica de la ZPF: el CMH\*. En la fractografía de la Fig. 3.7 se presenta una de las zonas limítrofes entre la ZPF y la ZI, en dicha figura se observa de forma notable la zona fronteriza entre los dos micromecanismos de fractura. En la figura se aprecia claramente como el clivaje se extiende en la mitad superior de

la imagen mientras que la presencia de la ZPF se establece en la zona inferior de la misma, presentando un gran contraste entre ambos micromecanismos de fractura. En la Fig. 3.8 se presenta una imagen tridimensional de uno de los microhuecos presentes en esta zona limítrofe pero dentro de la ZPF, se puede observar como el hueco está inmerso en una textura marcadamente irregular.

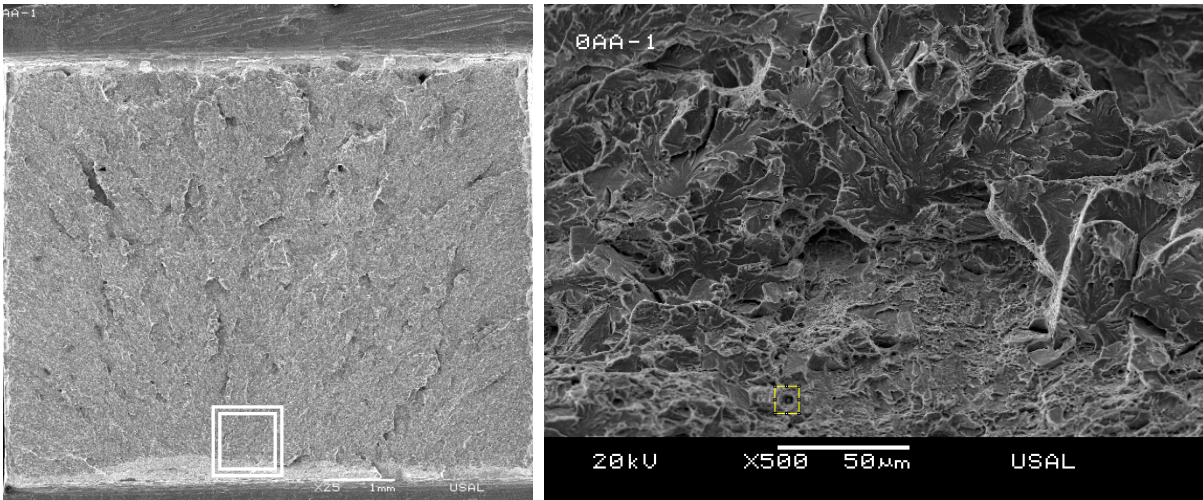


Fig. 3.7. Frontera entre la ZPF y la zona intermedia (ZI) de la probeta B0-AA-1.

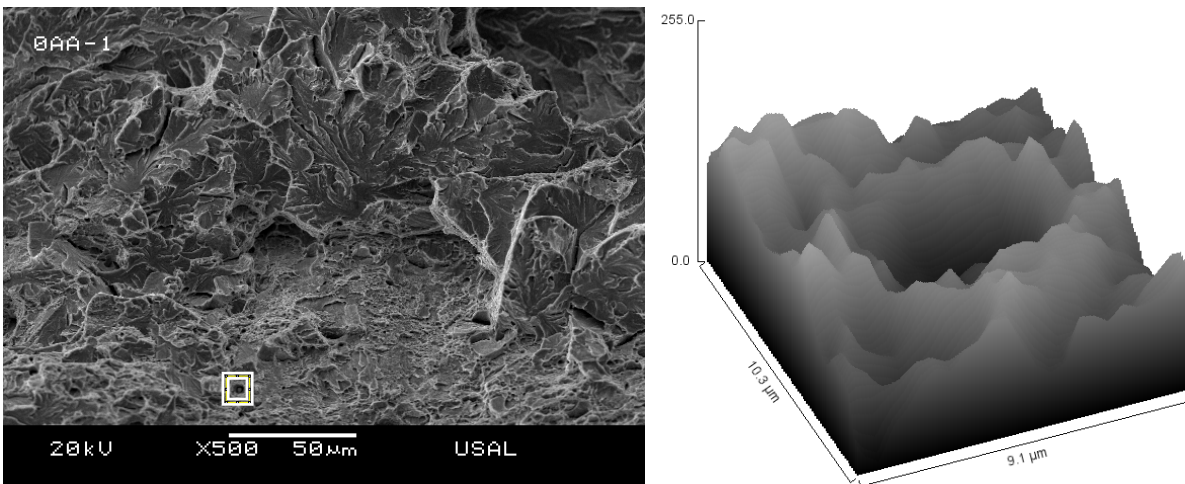


Fig. 3.8. Microhuevo presente en la zona fronteriza entre la ZI y la ZPF.

En cuanto a la ZPF se refiere (Fig. 3.9) ésta se caracteriza por la presencia de una fractografía tipo CMH peculiar. El tamaño de los microhuecos es mayor que aquellos encontrados dentro de la corona superior, llegando a alcanzar las 10  $\mu\text{m}$  (Fig. 3.10) de diámetro, lo que supone un aumento sustancial respecto el tamaño del microhuevo presente en la corona superior (Fig. 3.5). En cuanto a la textura de la ZPF, ésta es marcadamente más abrupta que la presentada en la CE ya que prácticamente está repleta de microhuecos de diverso tamaño, siendo difícil establecer un tamaño medio y con un aspecto más abrupto que la fractografía del tipo CMH

típico de la CE. Por mostrar una gran diversidad de tamaños de microhuecos y por tener una apariencia peculiar, se va a distinguir dicha fractografía como CMH\*, esto es, coalescencia de microhuecos típicos de la ZPF.

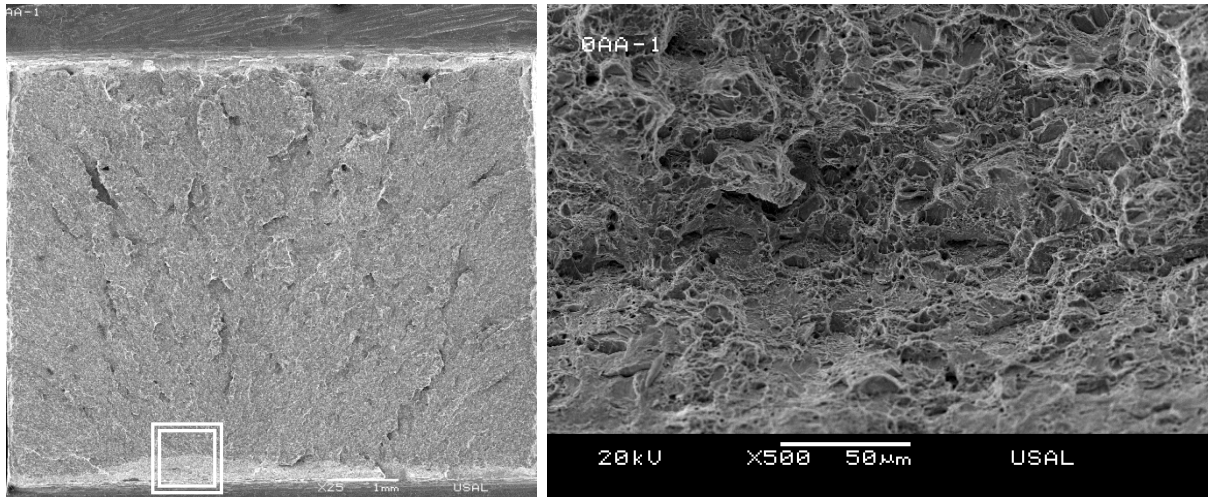


Fig. 3.9. Fractografía correspondiente a la zona de proceso de fractura de la probeta B0-AA-1.

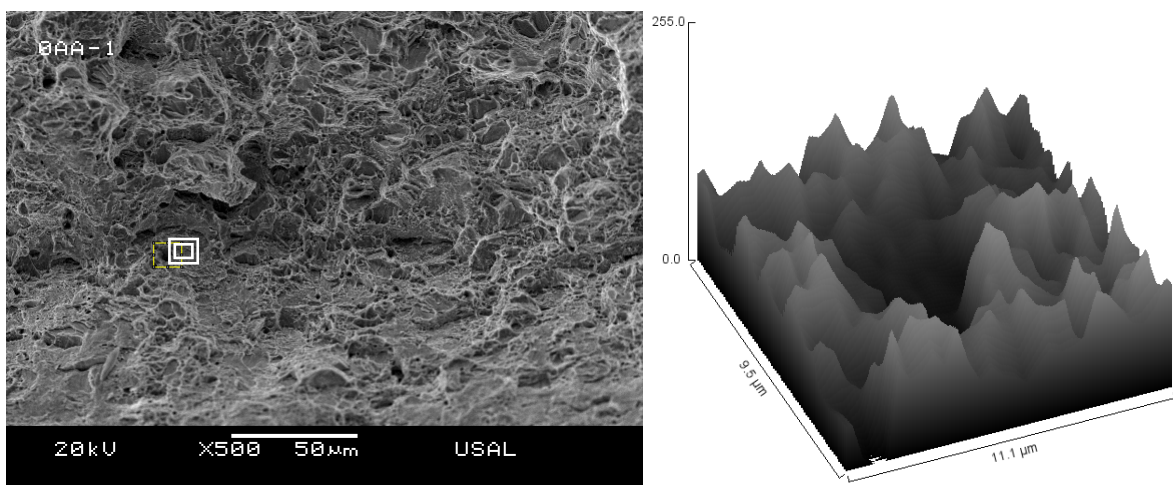


Fig. 3.10. Recreación tridimensional de un microhueco inmerso en la ZPF.

Dentro de un microhueco de la ZPF se ha encontrado una partícula con una forma cuasi esférica y con un diámetro aproximado de  $5 \mu\text{m}$ , ocupando aproximadamente el 50% de su superficie, tal y como puede verse en la Fig. 3.11. En las zonas colindantes a la partícula se aprecian dos zonas con una textura diferente de la esperada, y que se presentan en forma de imágenes en las Figs. 3.12 y 3.13. Se tratan de dos zonas en las que se aprecia claramente una estructura de tipo laminar típica de la ZPF, siendo el resultado de la descohesión de dos colonias perlíticas. En la primera de las imágenes la estructura laminar se encuentra situada bordeando perpendicularmente a una pequeña fisura de tipo longitudinal.

En la Fig. 3.14 se presenta una secuencia de microfotografías que recorren las diferentes texturas características de la sección de rotura de la probeta.

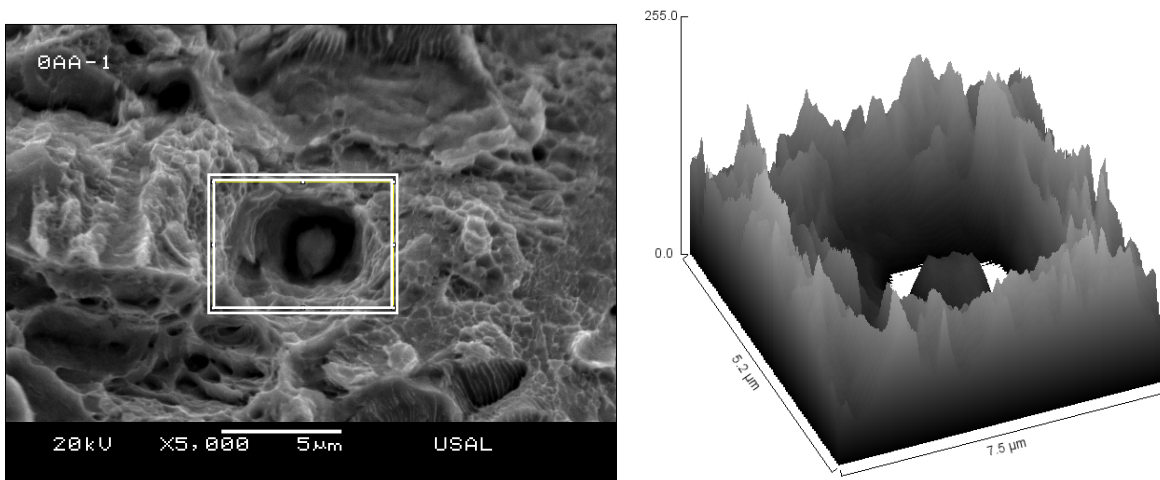


Fig. 3.11. Textura de un microhueco con su partícula generadora, probeta B0-AA-1.

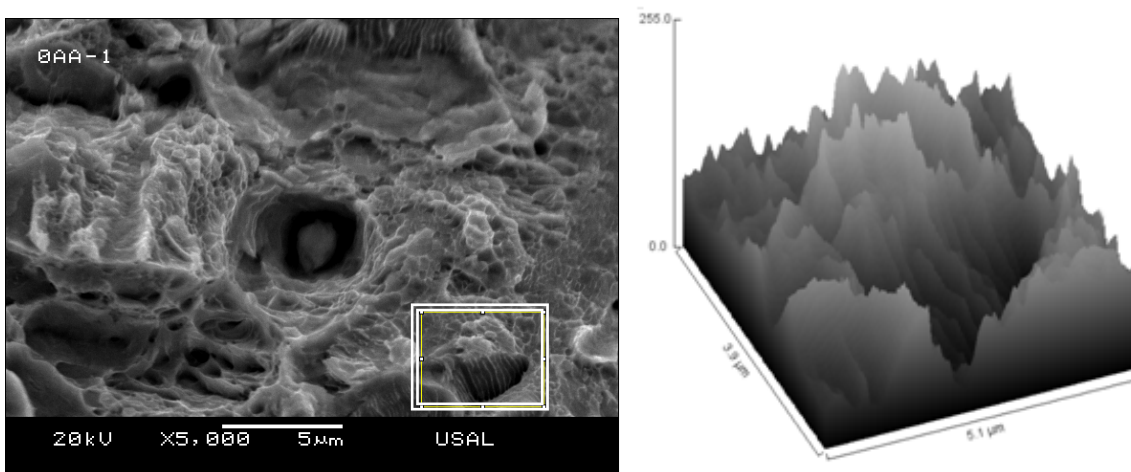


Fig. 3.12. Estructura laminar situada en la zona colindante a una partícula inmersa en la ZPF.

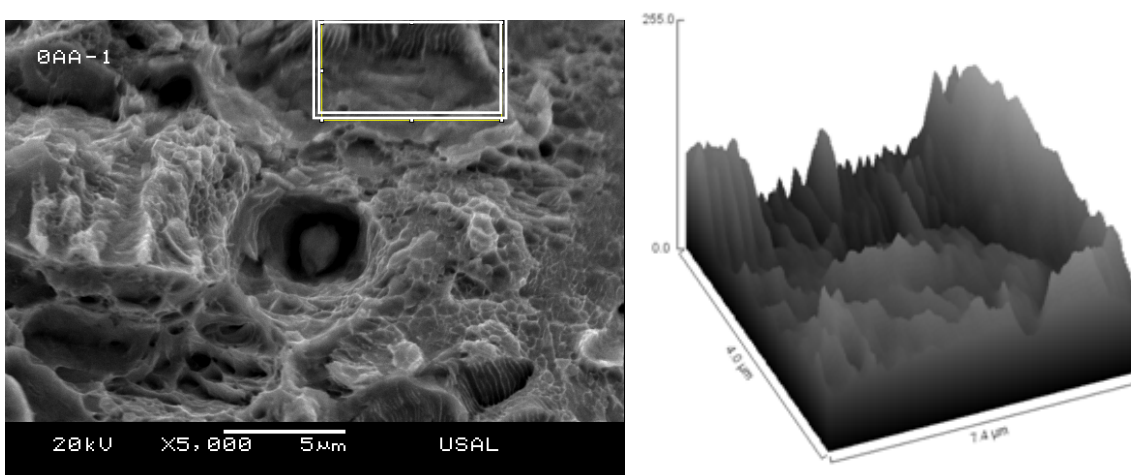


Fig. 3.13. Estructuras laminar colindante a una partícula inmersa en la ZPF.

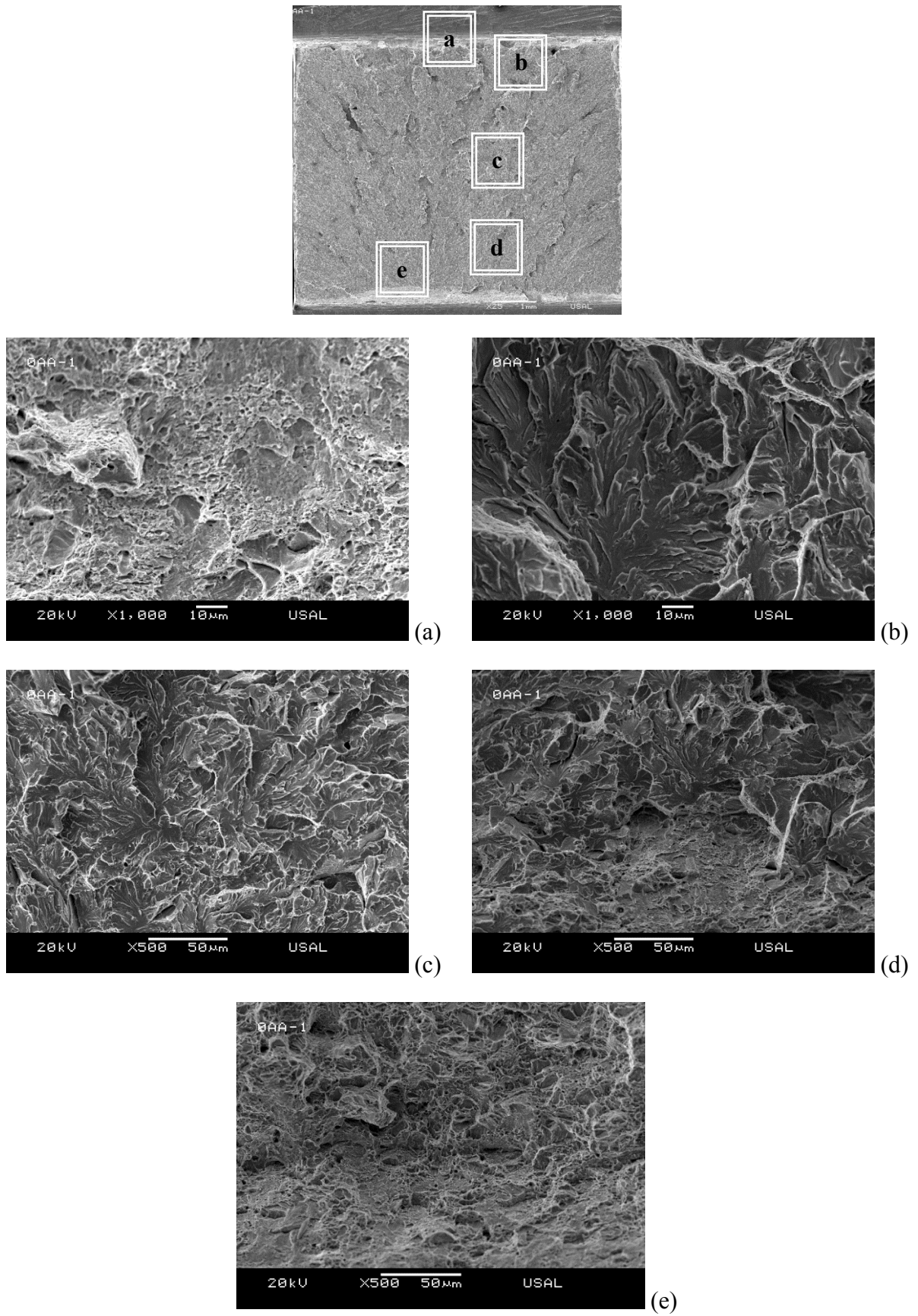


Fig. 3.14. Estudio de la superficie de fractura de la probeta B0-AA-1.



## 2.2. Análisis fractográfico de la muestra B4-AA

En general las tres probetas de la muestra B4-AA muestran una zona intermedia que se dispone a lo largo de más del 50% de la sección de rotura de la probeta. La corona exterior concentra aproximadamente entre el 34% (probetas B4-AA-1 y B4-AA-2) y el 38% (probeta B4-AA-3) de la superficie de fractura, dejando para la ZPF entre el 3% (probeta B4-AA-2) y el 8% (probeta B4-AA-1) de la superficie de fractura, esto hace que se aprecie un ligerísimo avance de la zona de proceso de fractura respecto a la muestra B0-AA, así como una sustancial disminución de la zona intermedia (a favor de la CE).

La nota más característica de la superficie de fractura de la probeta B4-AA-2 (Fig. 3.15) es la generación de una superficie con una textura semejante a la corona situada en una zona inmersa dentro de la zona intermedia. Ésta se localiza en el tercio superior de la probeta y se distribuye longitudinalmente a lo largo de la misma, enmarcada entre dos zonas que a primera vista parecen formadas por clivaje.

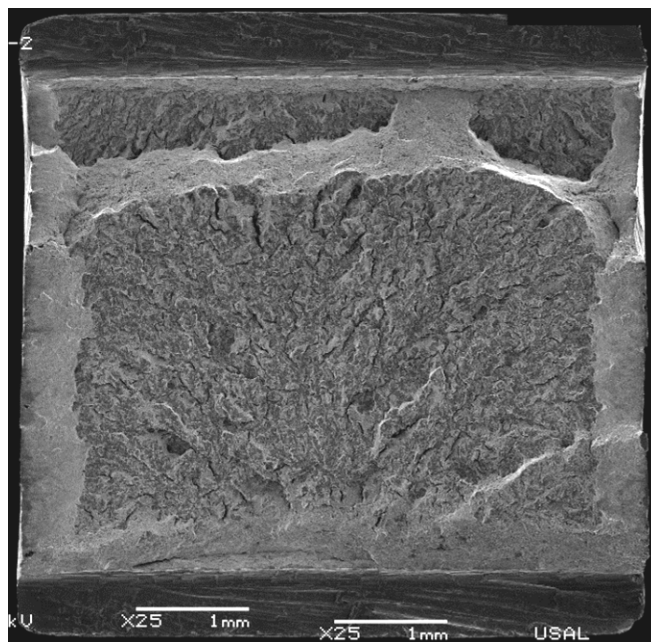


Fig. 3.15. Superficie de fractura de la probeta B4-AA-2.

El análisis microscópico de la zona denominada *corona intermedia* determina que presenta una textura suave pero poblada de microhuecos que se encuentran dispersos uniformemente a lo largo de la misma (Fig. 3.16). La geometría de los microhuecos observados se aproxima bastante a la forma circular. En la imagen de la Fig. 3.17 se presenta uno de los microhuecos inmersos en la corona en cuestión, se trata de un microhueco caracterizado por su geometría regular, con paredes prácticamente verticales y altamente uniformes en cuanto a su textura se refiere, con unas dimensiones que se acercan a las 9  $\mu\text{m}$  en dos de sus direcciones.

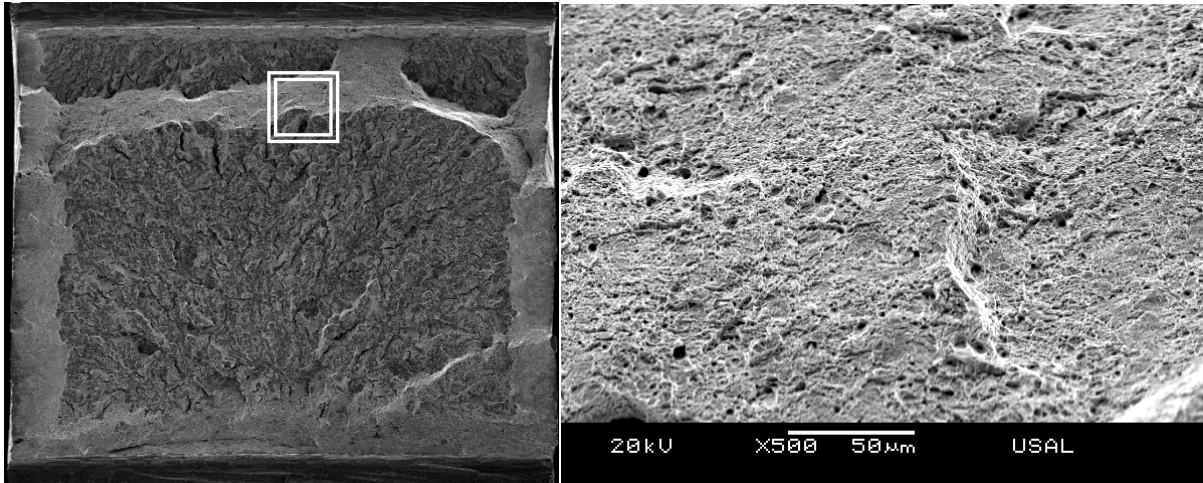


Fig. 3.16. Fractografía correspondiente a la *corona intermedia* de la sección de rotura de la probeta B4-AA-2.

En la fractografía de la Fig. 3.18 se presenta la sección de rotura de la probeta comprendida entre la corona superior y la corona intermedia. Aunque en un principio se pudiese pensar que existe una única frontera o límite correspondiente a un micromecanismo básico de fractura dentro de la misma, la situación real difiere bastante presentándose en la imagen de detalle tres tipos de texturas claramente diferenciadas. La primera textura observable se presenta junto a la entalla y barre longitudinalmente la probeta con un espesor medio aproximado de 19.64 μm; la siguiente textura que se observa es la propia corona exterior, se distribuye paralelamente a la fase anterior y presenta un ancho medio aproximado de 91 μm. Dentro de la corona se encuentran distribuidos uniformemente microhuecos, algunos de los cuales presentan un tamaño elevado, llegando a observarse microhuecos con dimensiones próximas a las 8 μm. La tercera textura que se observa se manifiesta en forma de facetas de clivajes como se puede advertir en la Fig. 3.18.

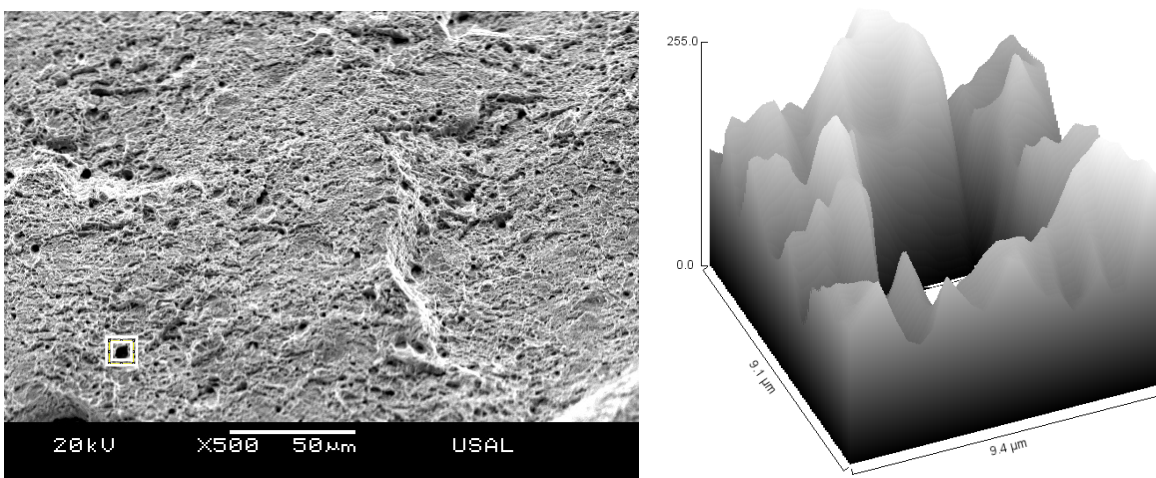


Fig. 3.17. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos presentes en la *corona intermedia* de la probeta B4-AA-2.

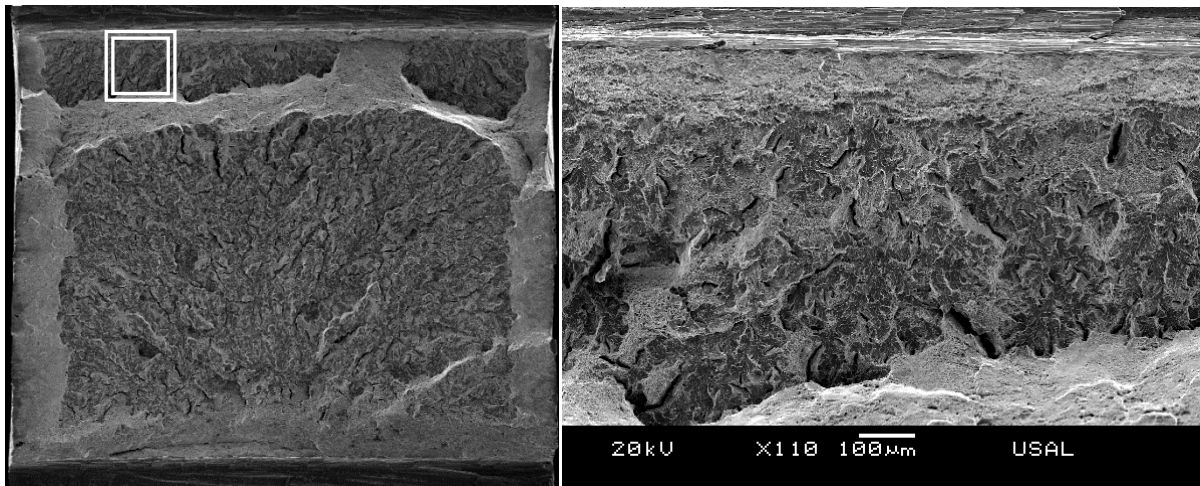


Fig. 3.18. Microfractografía correspondiente al borde superior de la probeta B4-AA-2.

Analizando en detalle la fractografía de la Fig. 3.18 se aprecia que no se trata de clivaje puro sino que se encuentra parcialmente asociado con microhuecos. Se observa también la presencia de microfisuras distribuidas homogéneamente a lo largo de toda la zona, con una concurrencia masiva de ellas localizadas perpendicularmente a la CE. El tamaño de las mismas no es muy homogéneo, aunque, preferentemente abundan las microfisuras de gran tamaño; se han medido microfisuras de  $116.19 \mu\text{m}$  pero se han llegado a detectar microfisuras que superan las  $120 \mu\text{m}$ . La presencia de microfisuras genera en la superficie cambios abruptos en la textura de las zonas de material circundantes. En las siguientes Figs. 3.19, 3.20 y 3.21 se presentan las variaciones texturales observadas de una de las zonas adyacentes a la fisura. En la Fig. 3.19 se puede apreciar además el perfil altamente irregular de una de las fisuras situadas en la zona central izquierda de la imagen.

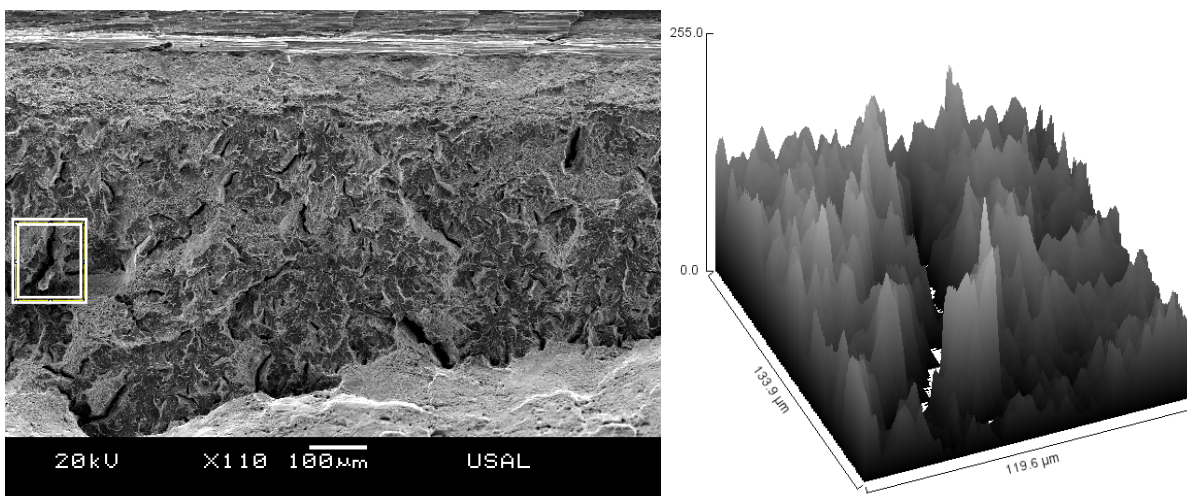


Fig. 3.19. Recreación tridimensional de una de las microfisuras situada entre la zona corona exterior y la corona interior de la probeta B4-AA-2.

En un análisis de la imagen tridimensional de la zona en cuestión se podría indicar el establecimiento de planos de encuentro trazados a 90° a partir de la microfisura, perfilándose estos por las crestas que se observan a ambos lados de la microfisura. La Fig. 3.20 muestra una imagen muy significativa de la variación textural que está teniendo lugar en aquellas zonas con presencia de microfisuras; en la misma se observa un cortado, de paredes altamente regulares, que se encuentra bordeando la microfisura cuya longitud supera las 14  $\mu\text{m}$ .

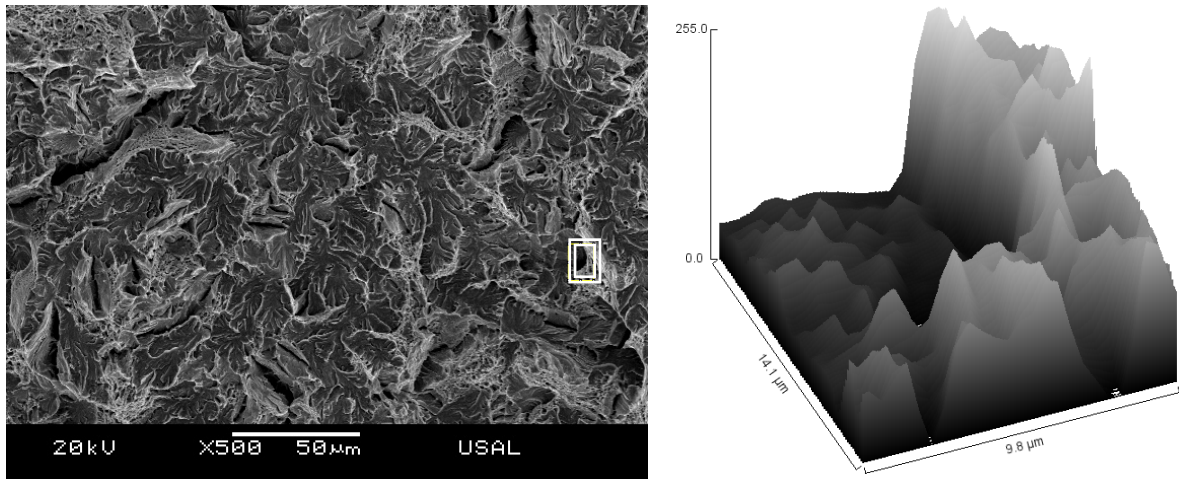


Fig. 3.20. Recreación tridimensional de una zona de encuentro de clivajes.

En la imagen de la Fig. 3.21 se presenta la zona circundante a una de las microfisuras de mayor tamaño que se han encontrado dentro de la zona intermedia formada por clivajes. En la recreación tridimensional de la zona se observa la presencia de una estructura repetida de planos perpendiculares a la fisura que conforman en su conjunto la imagen en forma de cordillera que transcurre paralela a la microfisura en cuestión.

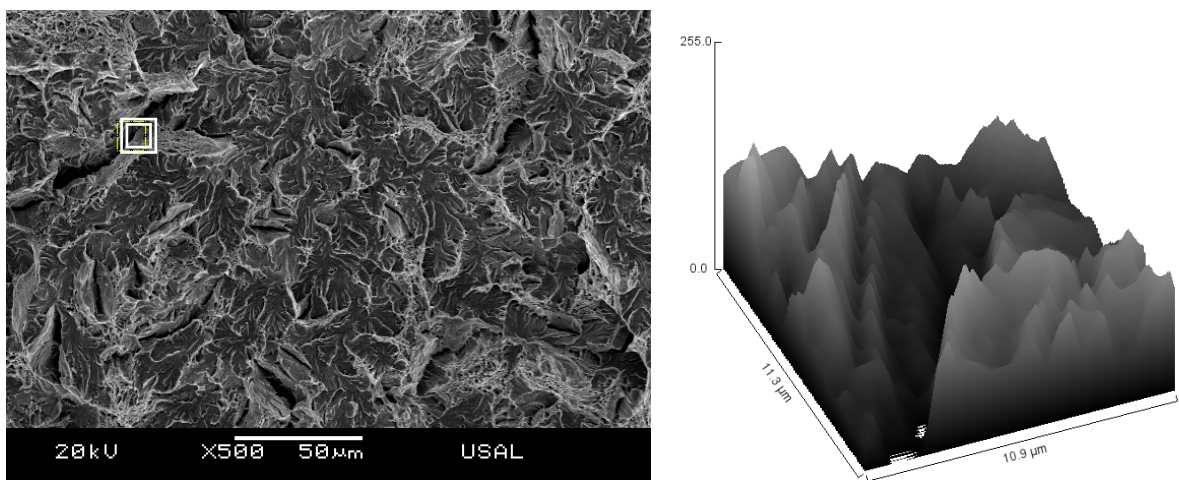


Fig. 3.21. Recreación tridimensional parcial de una de las microfisuras inmersas en la fractura por clivaje de la probeta B4-AA-2.

La zona intermedia (ZI) está dominada por el clivaje, aunque en este caso, como ha venido sucediendo anteriormente, tampoco se trata de clivaje puro sino que se encuentra parcialmente asociado con la presencia de microhuecos, estos se distribuyen a lo largo de toda la superficie de clivaje, como queda patente en la imagen derecha de la Fig. 3.22. La presencia de microhuecos en la zona intermedia se observa mayor cuanto mayor es el grado de trefilado del acero a partir del cual se ha obtenido la probeta analizada.

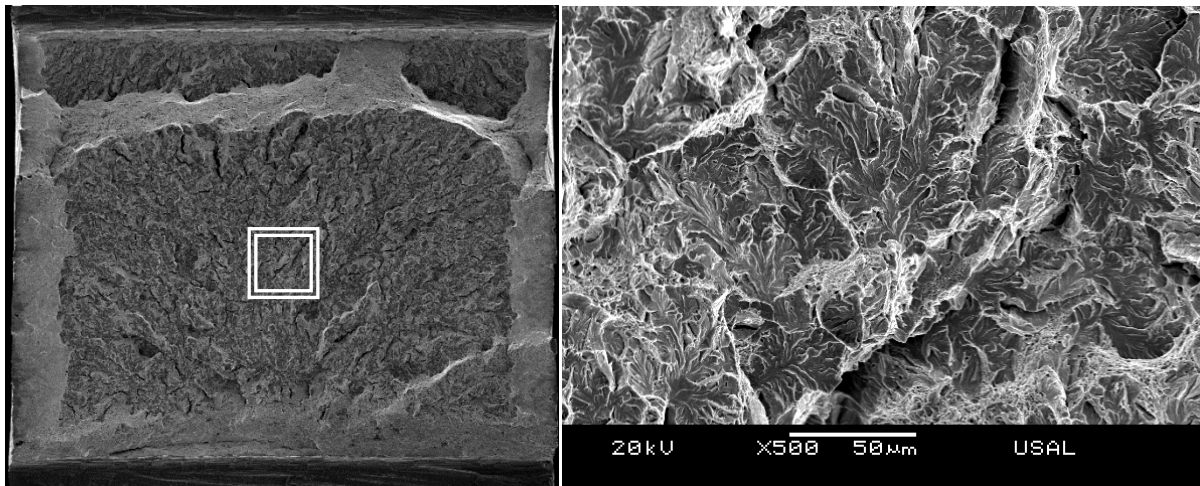


Fig. 3.22. Fractografía a 500 aumentos de la zona intermedia de la probeta B4-AA-2.

Dentro de la zona intermedia es marcada la presencia de microfisuras, las cuáles presentan una geometría alargada con una longitud próxima a las 30  $\mu\text{m}$ . En la imagen de la Fig. 3.23, se presenta una porción de una de las microfisuras presentes en la ZI, ésta se encuentra situada en la mitad superior derecha de la fractografía y presenta una longitud total de 31  $\mu\text{m}$ . Como se comprueba en la imagen tridimensional la textura de la zona en la que se enmarca es altamente irregular.

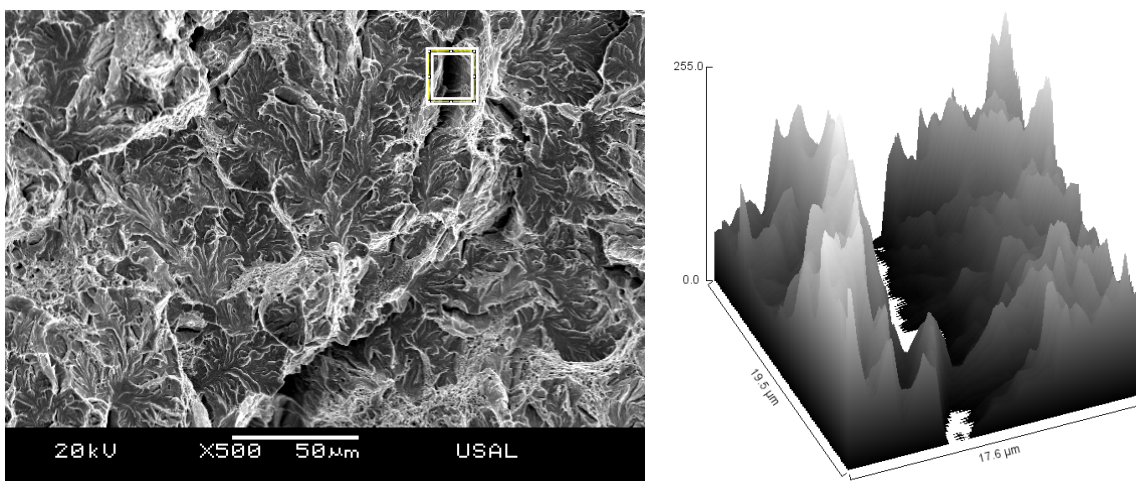


Fig. 3.23. Recreación tridimensional de una de las fisuras inmersas dentro de la ZI.

En las imágenes de la Fig. 3.24 se presentan otra característica de una de las zonas de encuentro con una de las microfisuras. Es una zona de textura marcadamente abrupta donde se pueden observar los planos de encuentro con la fisura.

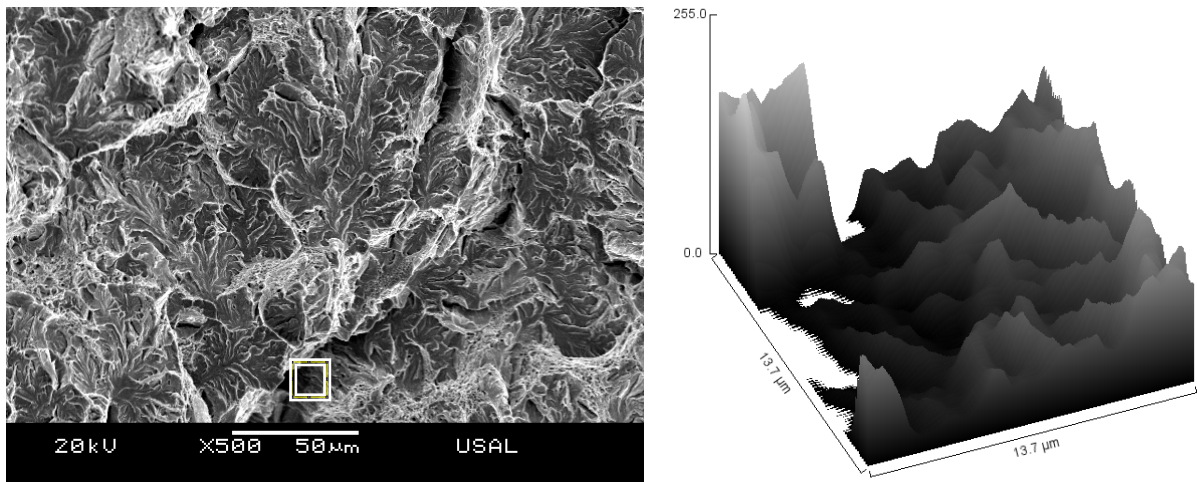


Fig. 3.24. Detalle de la textura de uno de los clivajes adyacentes a una microfisura.

En la imagen de la Fig. 3.25 se presenta una recreación tridimensional de uno de los clivajes que se presentan inmersos en la ZI. Aunque en un principio pudiese pensarse que se trata de una textura marcadamente suave, la recreación permite observar que esto no es así, ya que se observa una textura marcadamente abrupta que recuerda a un sistema montañoso caracterizado por una serie de valles y crestas que confluyen en un valle principal.

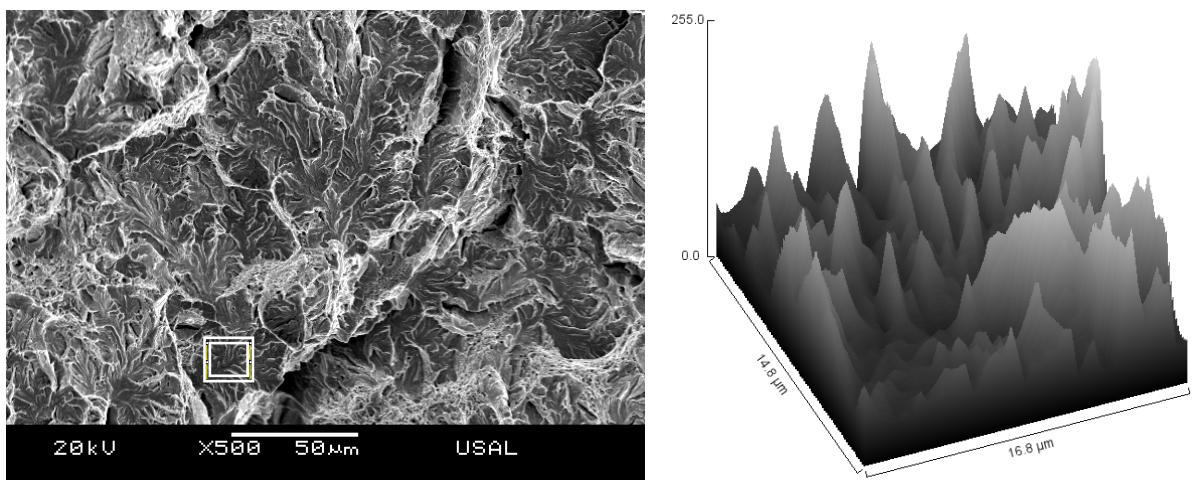


Fig. 3.25. Levantamiento tridimensional de la textura interna de uno de los clivajes de la ZI.

La frontera entre la ZPF y la ZI se presenta marcada por la presencia de microfisuras que se encuentran fundamentalmente distribuidas radialmente a lo largo del perímetro exterior de la

ZPF (Fig. 3.26). Las microfisuras presentan, en general, forma geométrica alargada, con una longitud que en muchos casos se establece en valores próximos a las 92  $\mu\text{m}$ .

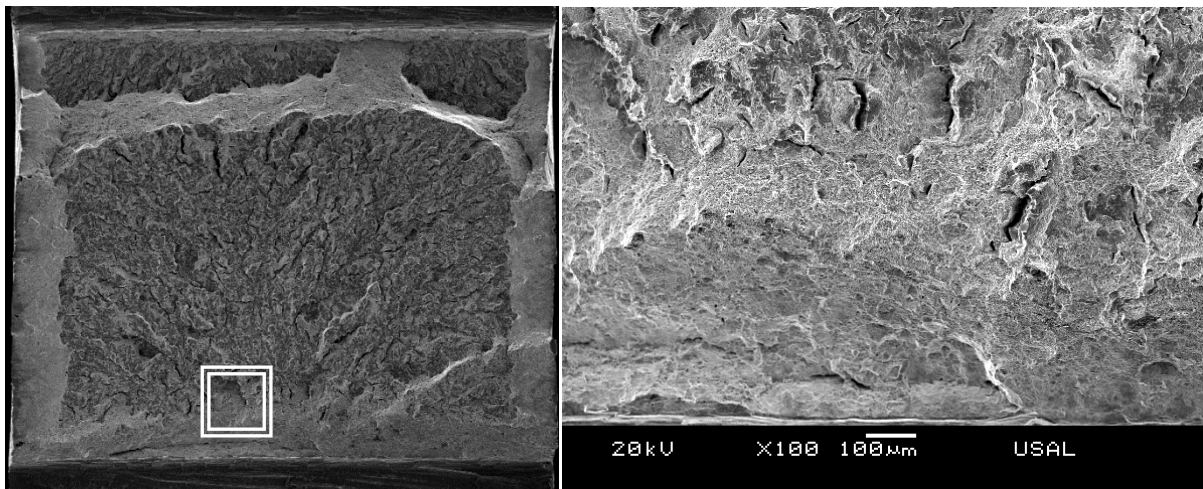


Fig. 3.26. Detalle de la frontera entre la de la ZI con la ZPF.

La textura que se observa, en las zonas próximas a las microfisuras, puede ser de distinto tipo, como se comprobará a continuación; aunque, en todos los casos que se muestran está caracterizada por ser de rápida variación, con cambios abruptos en la misma, como aparece reflejado en las imágenes tridimensionales generadas en las Figs. 3.27 y 3.28.

En la Fig. 3.27 se observa la presencia de un cortado que se enmarca en el borde de una de las microfisuras, éste se caracteriza por la presencia de dos planos de altura; sin embargo, en la Fig. 3.28 la fisura se enmarca entre dos zonas, aunque marcadamente irregulares, de similares características. El micromecanismo básico de fractura que se observa está formado por la presencia de CMH.

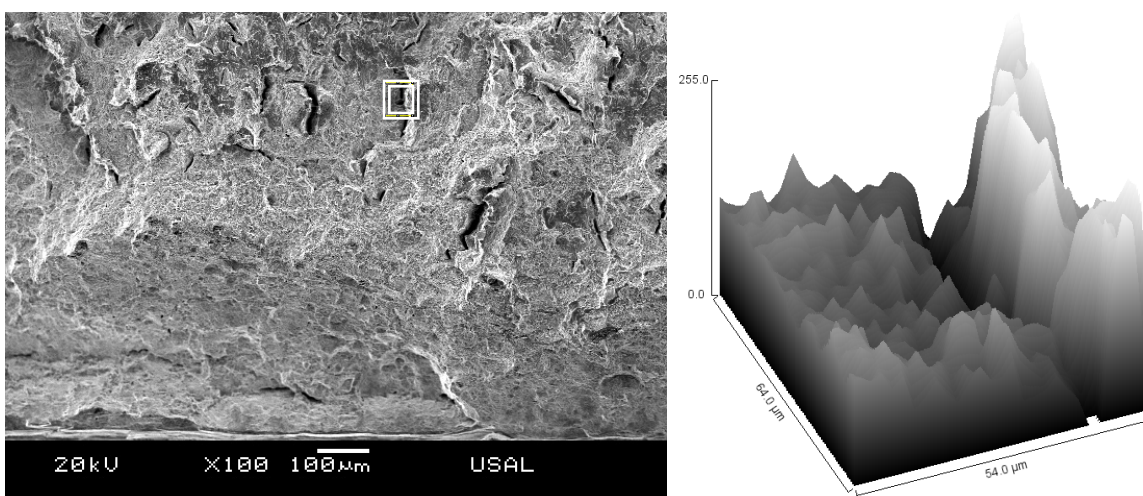


Fig. 3.27. Levantamiento tridimensional de una de las fisuras inmersa en la ZPF (B4-AA-2).

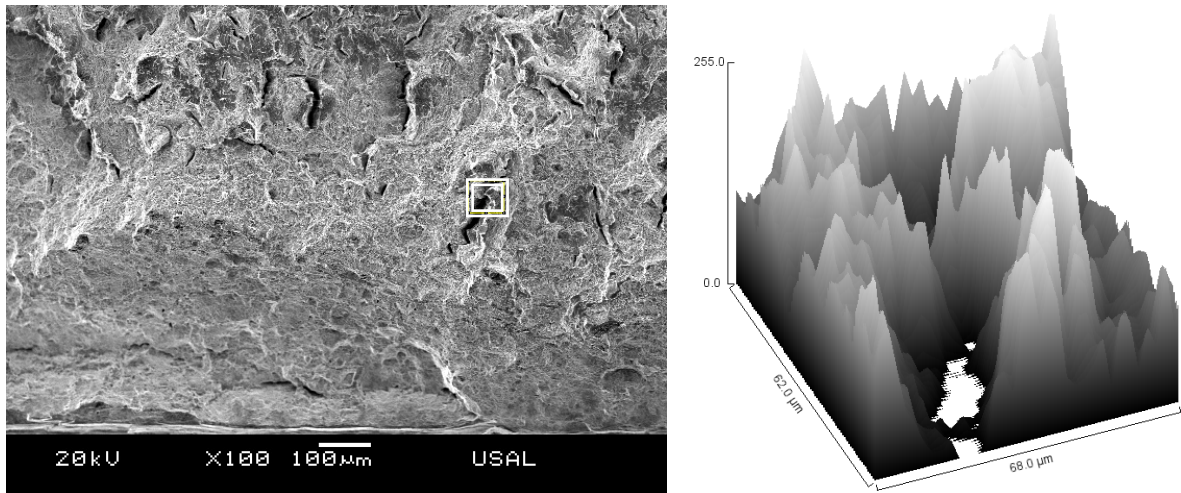


Fig. 3.28. Recreación tridimensional de la textura superficial de una fisura situada en la ZPF.

Hasta el momento no se había hecho necesario el análisis del plano de perfil de las probetas, ya que al tratarse de acero B0 no mostraban ninguna característica reseñable por tratarse de un acero isótropo; sin embargo, el acero B4 ya tiene una marcada anisotropía (mecánica y en fractura) fruto de su paso por las diversas hileras de trefilado, no siendo tan relevante como el acero B7, pero que hace necesario un análisis del plano de perfil. La imagen del perfil de rotura de la probeta B4-AA se presenta en forma de copa, prácticamente perfecta, con un ángulo de salida de 45 grados, como puede observarse en la imagen de la Fig. 3.29. La sección de perfil indica que la fractura se ha salido del plano de la entalla, lo que constituye señal inequívoca del carácter anisótropo en fractura del acero B4. La fractografía de la sección de perfil muestra que el micromecanismo de fractura predominante es el CMH (Fig. 3.29).

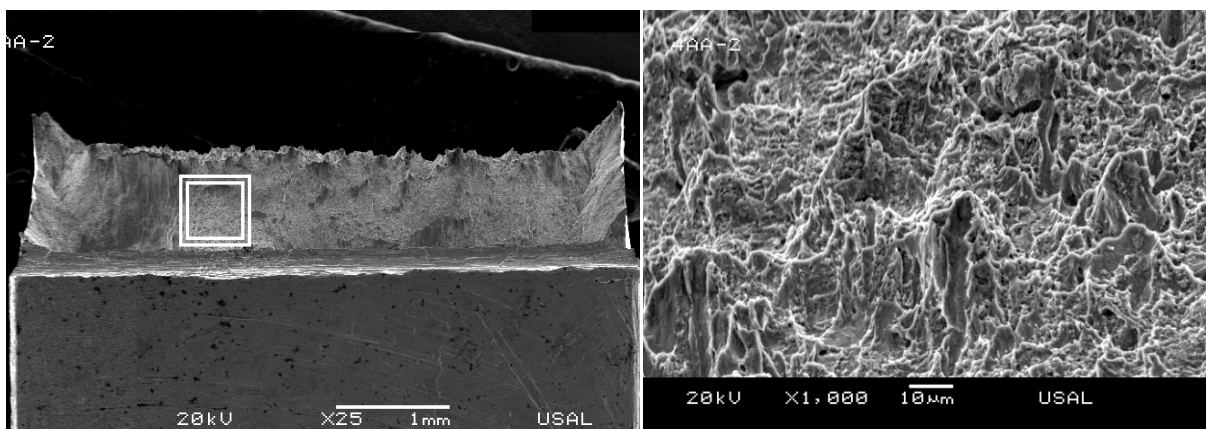


Fig. 3.29. Fractografía de la CE en del plano de perfil de la probeta B4-AA-2.

Para concluir el análisis de la probeta B4-AA-2 (probeta representativa de la muestra B4-AA) se presenta la Fig. 3.30 en la que se recoge una secuencia de micro-fractografías que realizan un recorrido a través de la superficie de fractura de la probeta B4-AA-2.



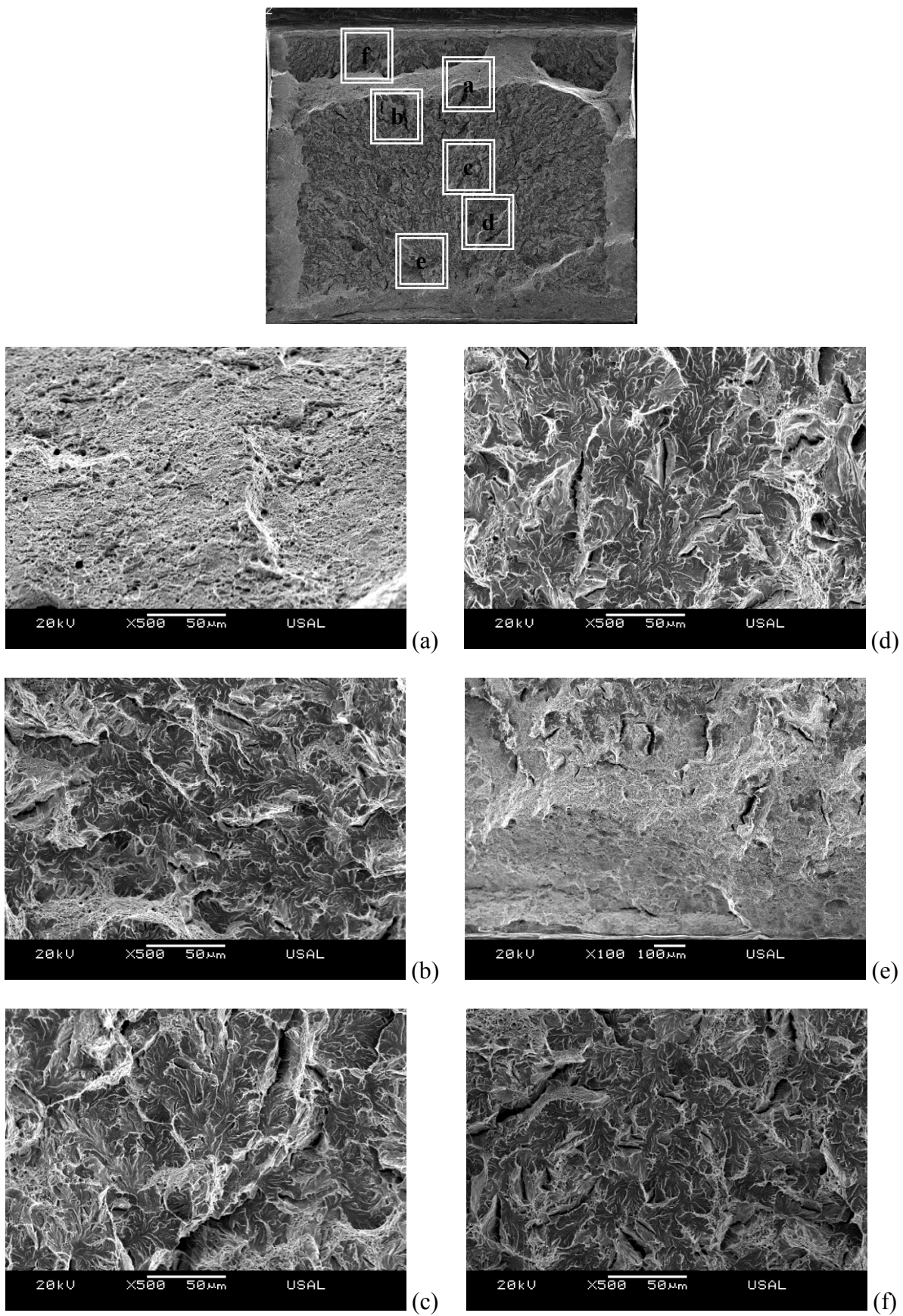


Fig. 3.30. Distintas zonas de la superficie de fractura de la probeta B4-AA-2.

### 2.3. Análisis fractográfico de la muestra B7-AA

En la imagen de la Fig. 3.31 se presenta la fractografía correspondiente a la sección fracturada de la probeta B7-AA-1. Como se puede consultar en el Anexo fractográfico, se trata de una fractografía representativa de la muestra B7-AA (alambre de pretensado con entallas de pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad). La fractografía está caracterizada por la presencia de una CE que enmarca una zona central (ZI) que presenta una textura altamente irregular marcada por la presencia de fisuras radiales.

La CE en este tipo de probetas ocupa aproximadamente el 50% de la superficie de fractura. En particular, la probeta B7-AA-1 presenta una corona que ocupa el 54% de la superficie total de fractura. La ZI para este tipo de probetas se extiende entre el 32 y el 47% de la superficie total de fractura, mientras que la ZPF se encuentra entre el 9 y el 14% de la superficie de fractura. La ZI presenta una forma geométrica característica que recuerda a un periodo de la cicloide o medio ovalo, se encuentra centrada en la ZPF.

Aunque en principio establecer límites concretos para la ZPF es complejo, durante el transcurso del análisis fractográfico de las probetas con entalla tipo AA se ha observado que a medida que aumenta el grado de trefilado que da origen a las probetas existe una disminución del área que ocupa la ZI, favoreciendo el aumento de la superficie de CE y de la ZPF.

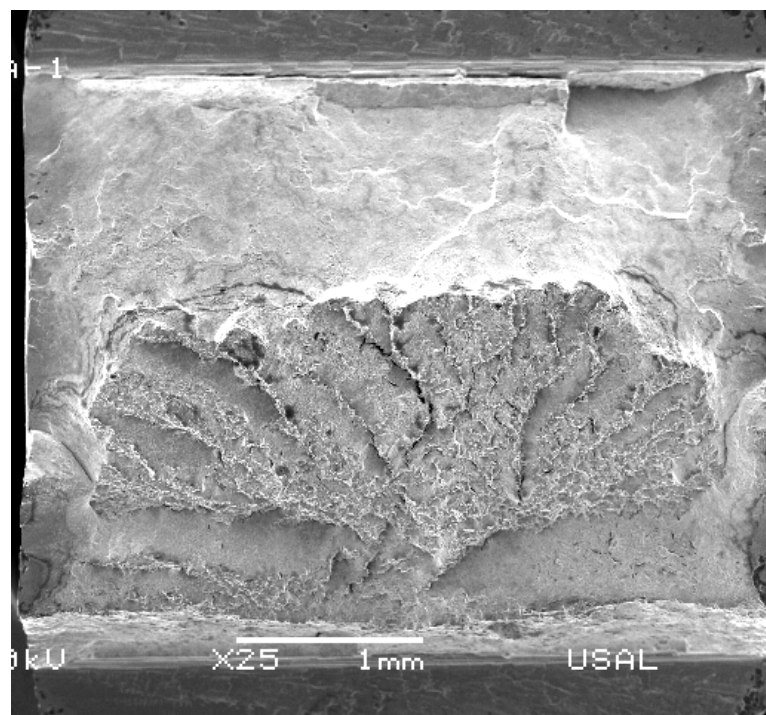


Fig. 3.31. Superficie de fractura de la probeta B7-AA-1.

La fractografía que presenta la CE de la probeta B7-AA-1 es una fractura marcada fundamentalmente por la presencia de CMH. A nivel óptico la fractura está formada por una CE que enmarca toda la probeta. La corona presenta más espesor en la zona más alejada de la ZPF, situándose esta última en la entalla inferior de la probeta como aparece representada en la imagen de la sección de la probeta (Fig. 3.32). Del análisis de la fractografía correspondiente a la CE se puede reseñar que presenta una textura homogénea de fractura por CMH, cuyos microhuecos se muestran repartidos de un modo uniforme a lo largo de la misma. En la Fig. 3.33 se presenta una imagen tridimensional de uno de los microhuecos de la CE; como se puede observar se trata de un microhuevo pequeño, de perfil irregular, con un diámetro aproximado de 2  $\mu\text{m}$ .

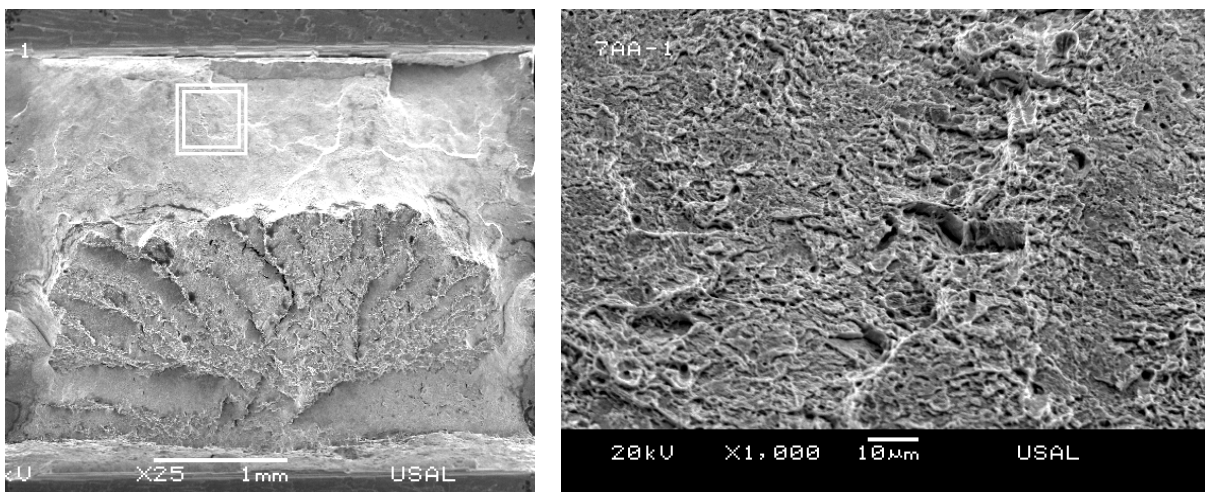


Fig. 3.32. Fractografía a 1000 aumentos de la sección correspondiente a la CE o labio dúctil.

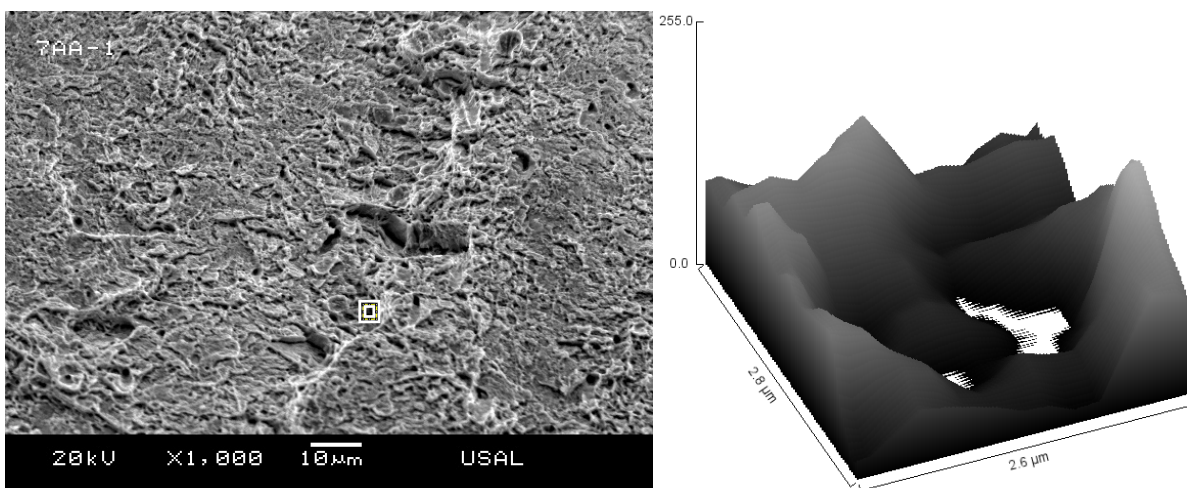


Fig. 3.33. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmeros en la CE (B7-AA-1).

La ZI presenta un aspecto singular con una forma geométrica que recuerda a una semi-óvalo, éste se extiende hasta ocupar la casi totalidad de la mitad inferior de la probeta. En esta zona

se aprecia la presencia de fisuras radiales que parten desde la ZPF y se extienden hasta alcanzar la periferia de la ZI (Fig. 3.34). La ZI es un cúmulo de clivajes y microhuecos en la cual no queda definido cuál es el micromecanismo de fractura predominante en esta zona.

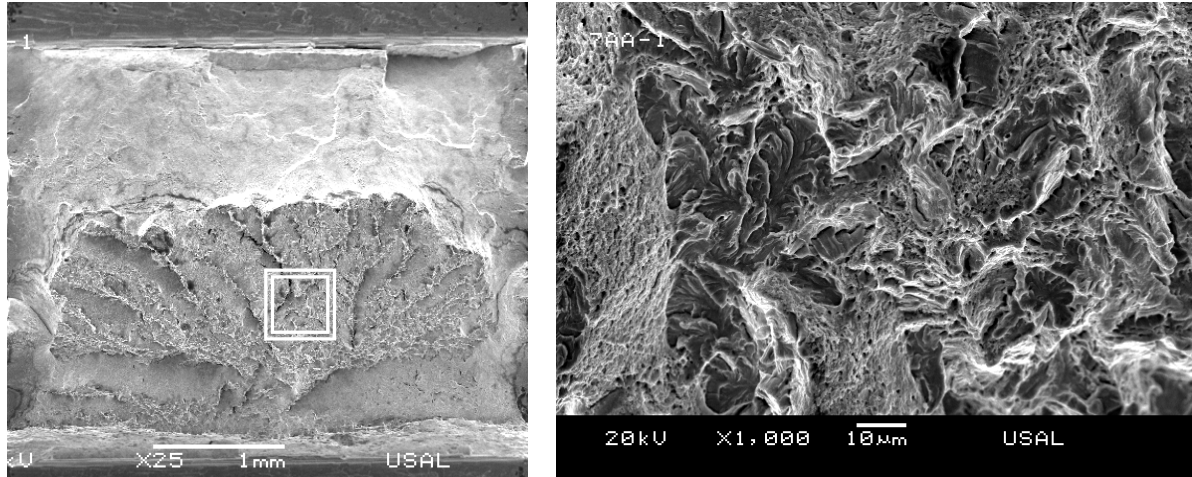


Fig. 3.34. Fractografía de la ZI en la probeta B7-AA-1.

Las intercaras entre los clivajes y los microhuecos es marcadamente abrupta (Fig. 3.35), siendo la textura del clivaje marcadamente más suave que la estructura de la zona circundante en la que se imbuyen los microhuecos. Inmersos dentro de las facetas de clivajes se puede apreciar la presencia de microhuecos de pequeño tamaño. En la Fig. 3.36 se presenta uno de los microhuecos inmersos dentro de la superficie de clivaje, se trata de un microhueco con una forma geométrica que se podría definir en plano como aproximadamente circular con un tamaño próximo a las 3 µm de diámetro.

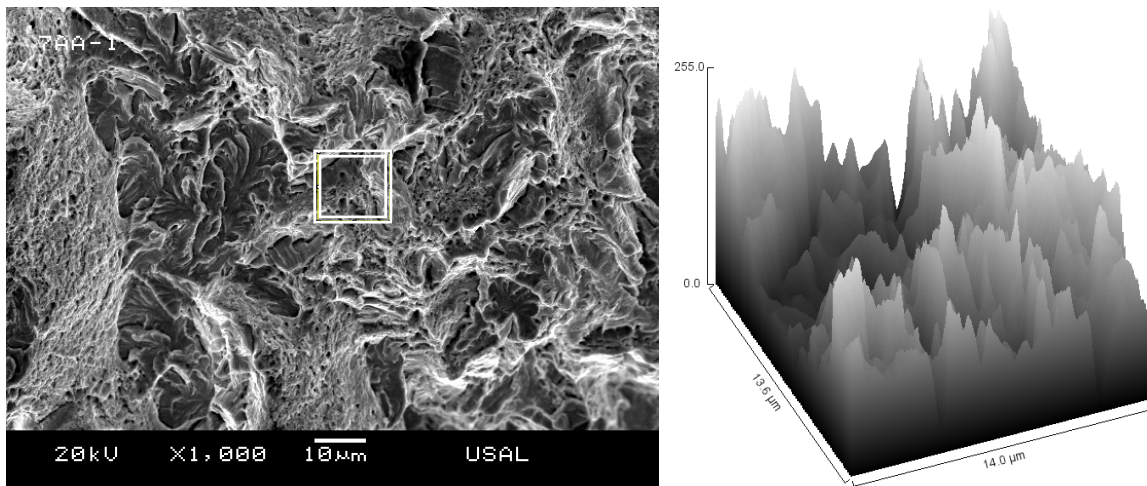


Fig. 3.35. Detalle de una zona de encuentro o intercara entre clivaje y CMH presente en la zona intermedia (B7-AA-1).

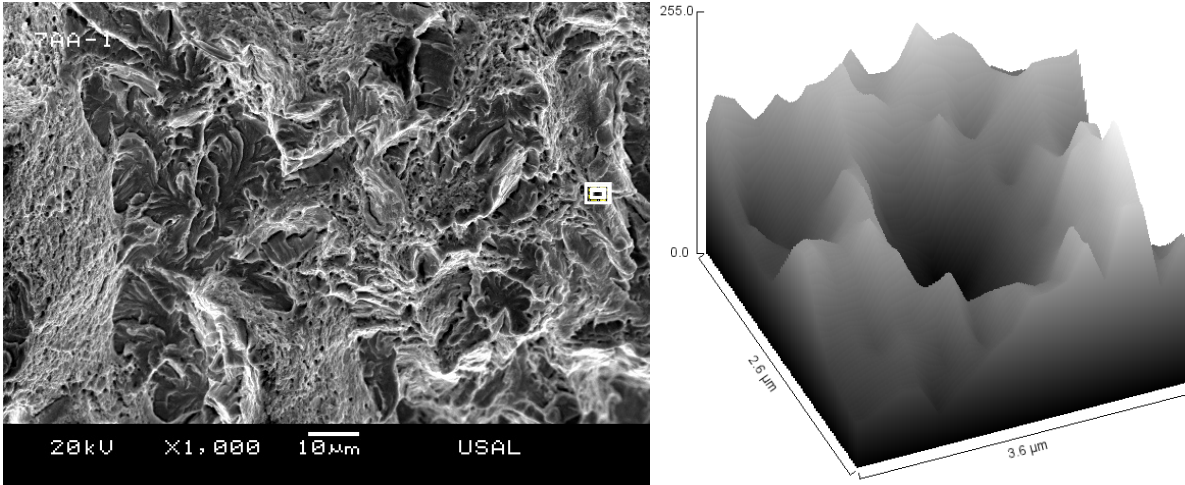


Fig. 3.36. Recreación de uno de los microhuecos inmersos dentro de la superficie de clivaje.

La ZPF se encuentra situada en la zona central inferior de la Fig. 3.37 junto a la sección de la entalla. La fractografía de la misma indica que se encuentra densamente poblada por la presencia de microhuecos y de microfisuras. En algunas áreas de la ZPF se puede observar la presencia de algún clivaje aislado, como puede verse claramente en la esquina superior izquierda de la imagen derecha de la Fig. 3.37. La presencia de clivajes en la zona remarcan la dificultad que existe para establecer una frontera claramente definida entre la ZI y la ZPF.

El tamaño y la geometría de los microhuecos presentes en la zona son variables. En la imagen de la Fig. 3.38 se presenta uno de los microhuecos inmersos en la ZPF; se trata de un microhueco que presenta una geometría irregular con su dimensión mayor próxima a las 4  $\mu\text{m}$ , el perfil interno observable está marcado también por la presencia de crestas y valles de menor calado por lo que no se puede calificar tampoco de regular.

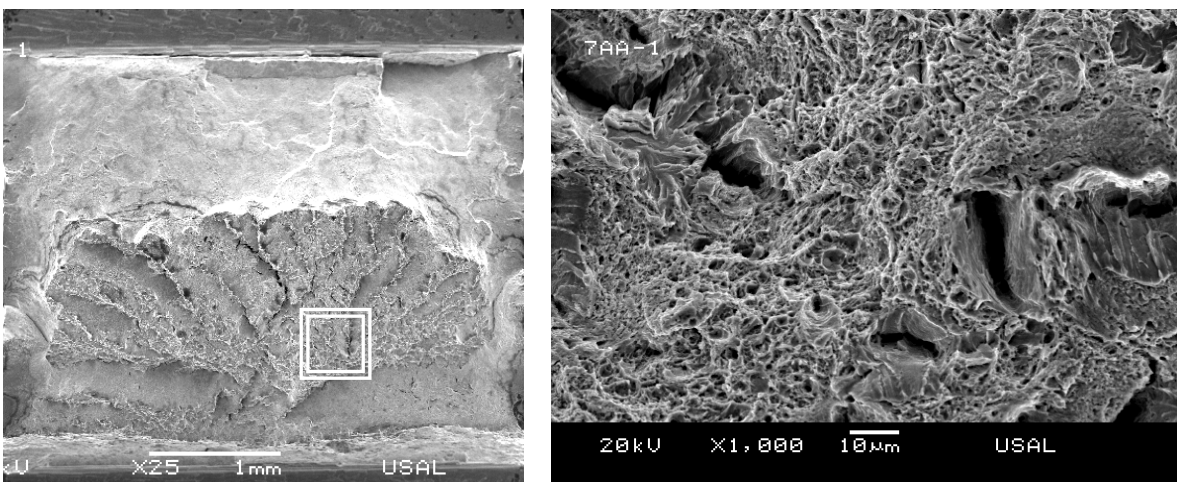


Fig. 3.37. Fractografía de la zona de proceso de fractura de la probeta B7-AA-1.

Como se ha comentado con anterioridad la ZPF está marcada por la abundancia de microfisuras, las cuales presentan diversas formas geométricas y tamaños y que, en muchos de los casos, se sitúan próximas a las zonas de clivaje. En la Fig. 3.39 se presenta la recreación tridimensional de una de ellas. Se trata de una fisura alargada cuya dimensión longitudinal se establece en valores próximos a las 25  $\mu\text{m}$ . El entorno en el que se enmarca, así como su perfil interno, es altamente irregular.

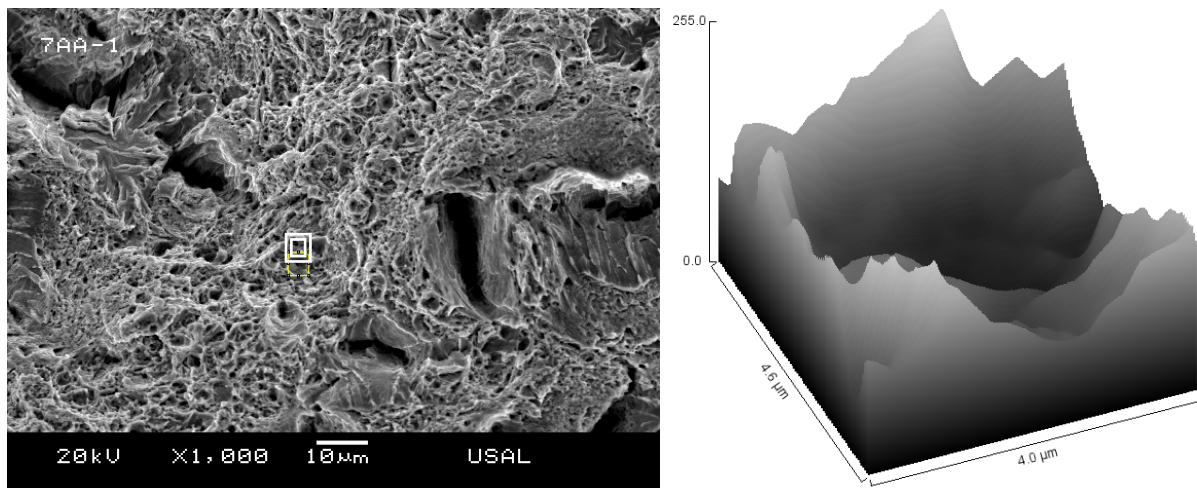


Fig. 3.38. Detalle de uno de los microhuecos presente en la ZPF de la probeta B7-AA-1.

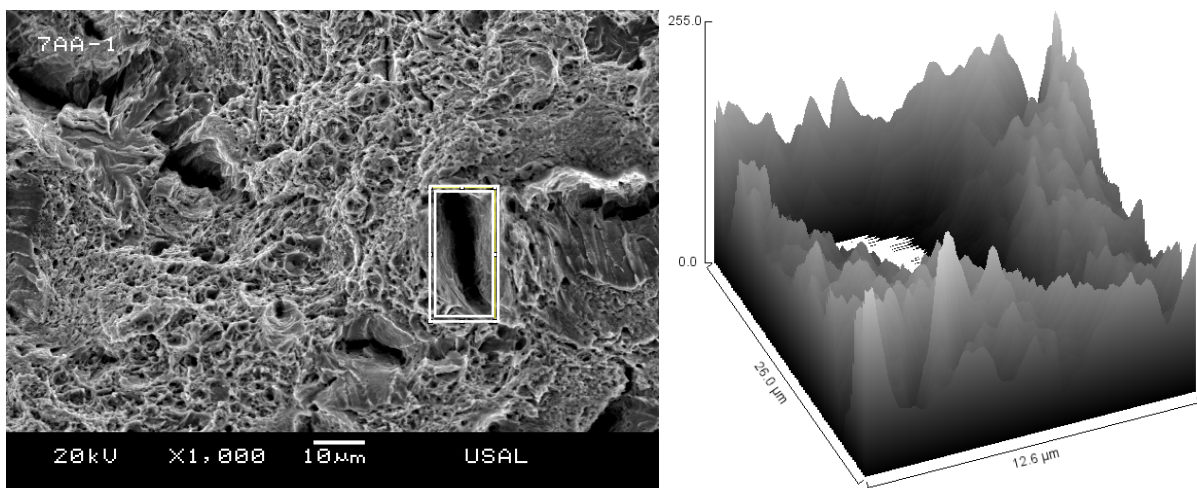


Fig. 3.39. Recreación tridimensional de una de las fisuras inmersas en la zona de proceso de fractura de la probeta B7-AA-1.

La imagen de perfil de la sección de rotura revela una fractura marcadamente irregular, síntoma de que el acero objeto de análisis presenta un marcado comportamiento anisótropo en fractura. La micro-fractografía de la sección de perfil (Fig. 3.40) muestra la presencia de clivaje como único mecanismo de fractura, aunque se puede apreciar la presencia de pequeños microhuecos, dispersos, inmersos dentro de las facetas del mismo.

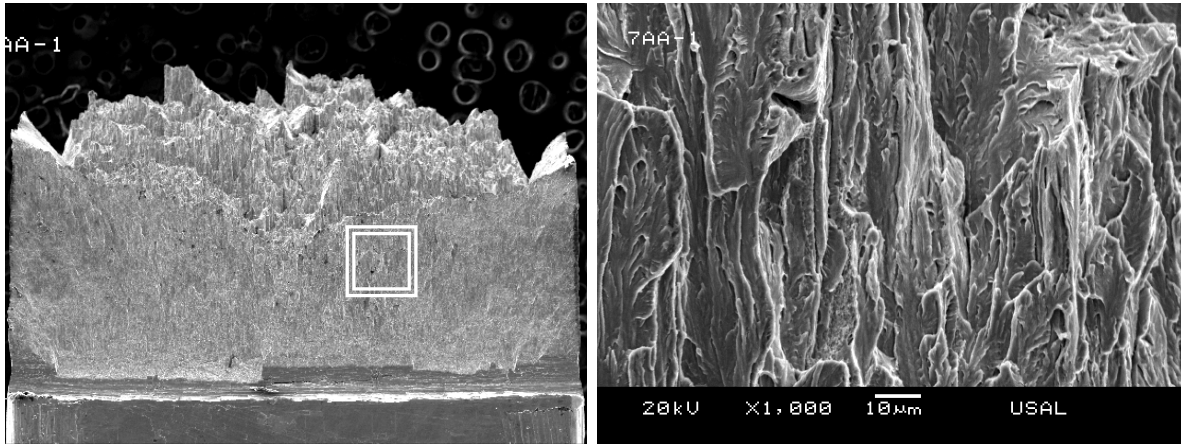
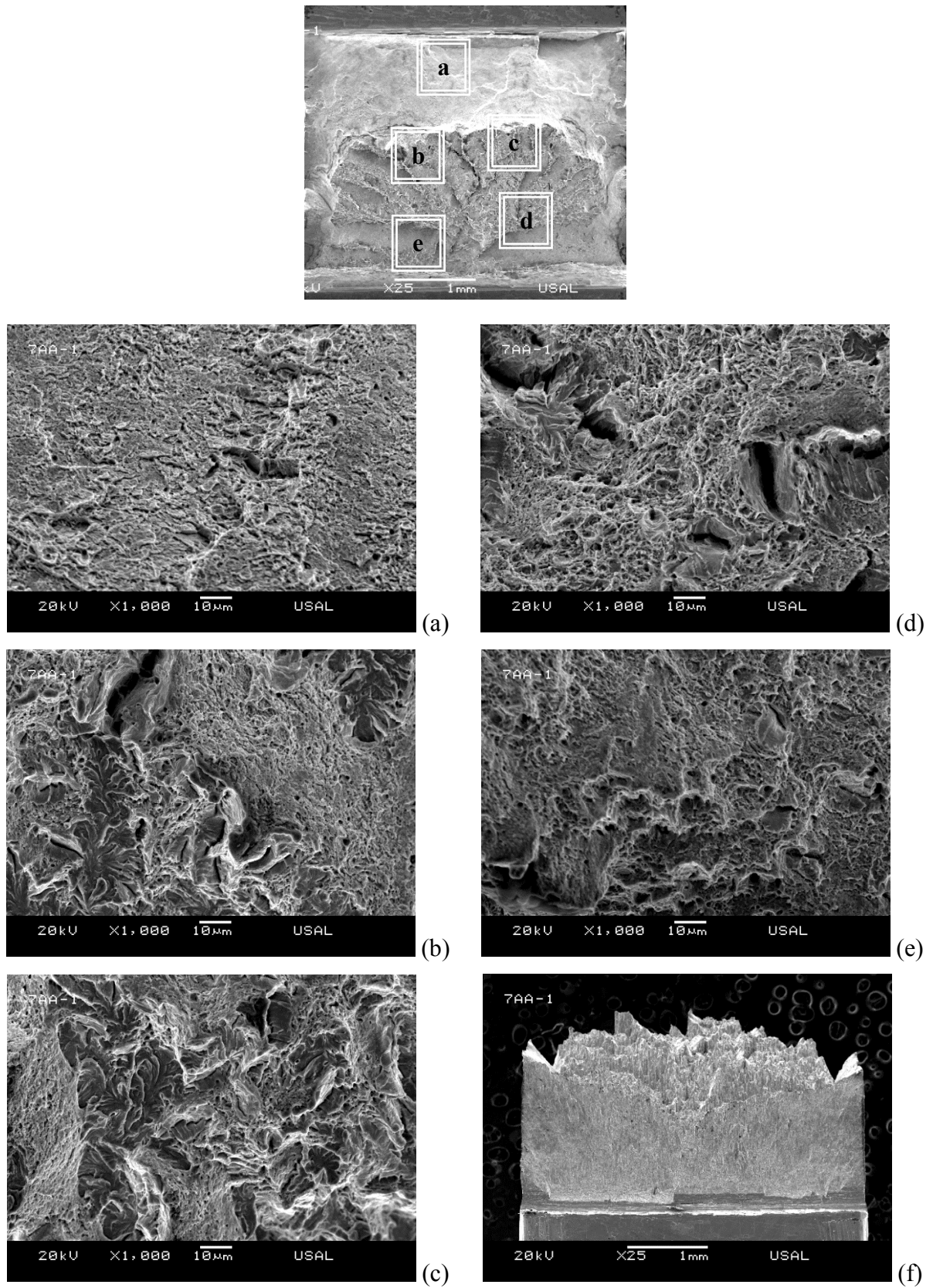


Fig. 3.40. Micro-fractografía de la sección del perfil de rotura de la probeta B7-AA-1.

Para concluir el análisis de la fractografía de la probeta B7-AA-1 (probeta representativa de la terna B7-AA) se recoge una secuencia de micro-fractografías, en la Fig. 3.41, que realizan un recorrido a través de diferentes localizaciones que se presentan en la sección de rotura de la probeta B7-AA-1.



*Sección de Perfil*

Fig. 3.41. Superficie de fractura de la probeta B7-AA-1.



## 2.4. Análisis fractográfico de la muestra B0-CC

En la superficie de fractura de la muestra B0-CC se presentan claramente las tres zonas típicas de la superficie de fractura: la CE, la ZI y la ZPF. En la Fig. 3.42 se muestra, como ejemplo representativo de la muestra B0-CC, la superficie de fractura de la probeta B0-CC-1.

La primera zona que se va a analizar es la CE que delimita el borde exterior de la sección de fractura de la probeta. El área porcentual de CE en las tres probetas analizadas supera el 16% de la superficie total de fractura, oscilando desde el 16% de la probeta B0-CC-1 al 21% de la probeta B0-CC-2, porcentajes muy inferiores si se comparan con la superficie que ocupa la zona intermedia de las probetas.

La ZI se extiende a lo largo del 75% (por término medio) del área total de fractura en las tres probetas analizadas. La ZI se presenta en forma radial, partiendo de la zona de proceso de fractura y distribuyéndose hacia la periferia de la probeta.

La ZPF se extiende sobre el 5% de la sección de rotura en las tres probetas analizadas. Ésta se encuentra localizada en la entalla inferior de la imagen y se sitúa aproximadamente en el centro de la entalla, presentando una forma geométrica semicircular similar a una media luna, como se puede observar en la imagen de la sección de rotura de la probeta B0-CC-1 (Fig. 3.42) que se procede a analizar en detalle a continuación.

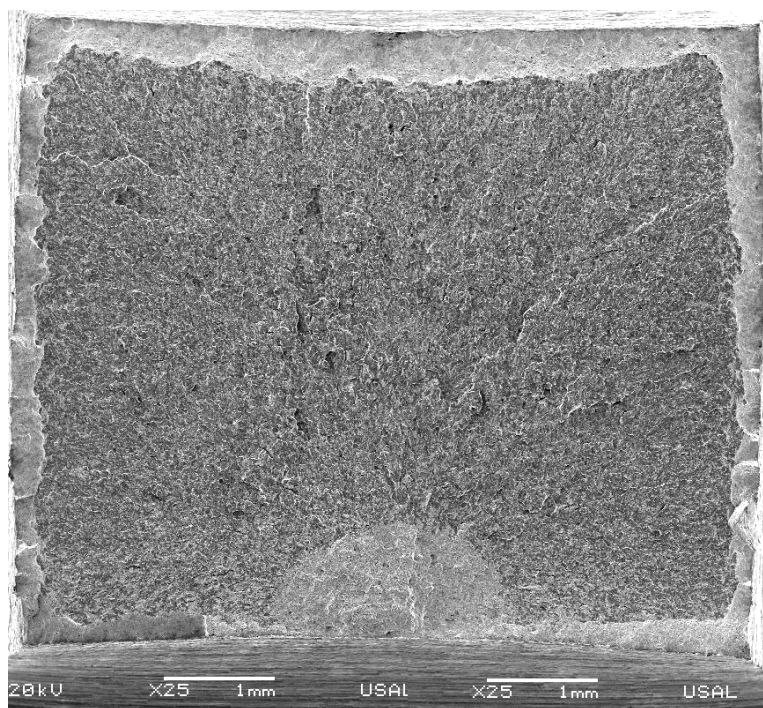


Fig. 3.42. Superficie de fractura de la probeta B0-CC-1.

La CE de la probeta B0-C-1 está formada por microhuecos dispersos cuyas características se pueden observar en la parte superior de la imagen de la Fig. 3.43. En esta misma imagen se presenta de un modo evidente la frontera física entre la corona superior de la probeta y la ZI, esta última dominada en su mayoría por el clivaje, y que en la imagen se observa con un tono marcadamente más oscuro en la mitad inferior de la misma.

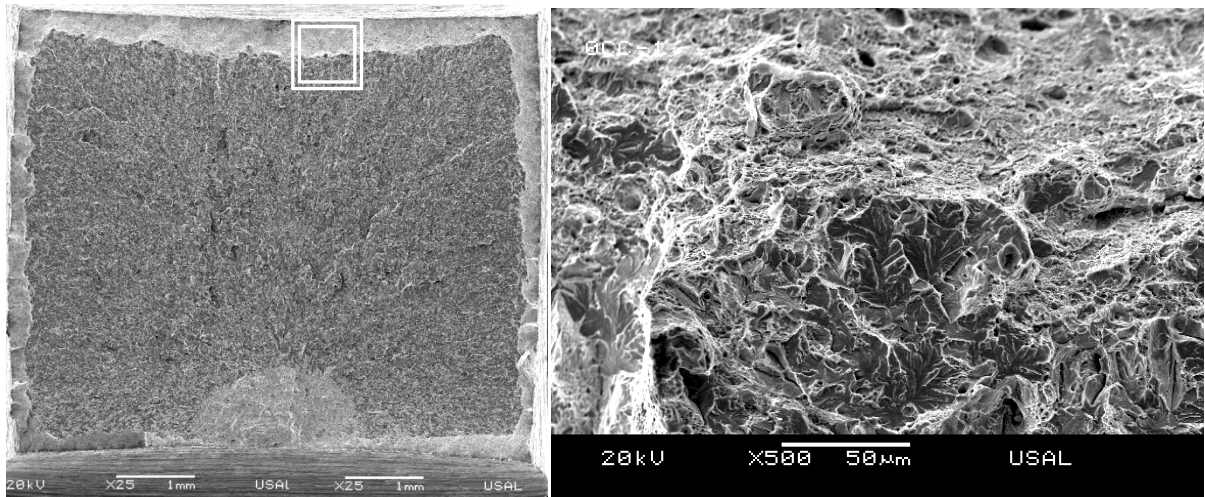


Fig. 3.43. Micro-fractografía de la intercara entre la CE de la entalla superior y la ZI.

El análisis de la textura de la CE indica, en esencia, que se trata de una textura uniforme salvo en aquellas zonas en las que se observa la presencia de microhuecos. Los microhuecos que se han observado presentan una geometría dispersa, en el sentido de que no tienen una forma geométrica definida que prevalezca sobre las demás. En la imagen que se presenta en la Fig. 3.44 se presenta uno de los microhuecos observados, se trata de un microhuevo de perfil irregular con un tamaño que se aproxima a las 5  $\mu\text{m}$ .

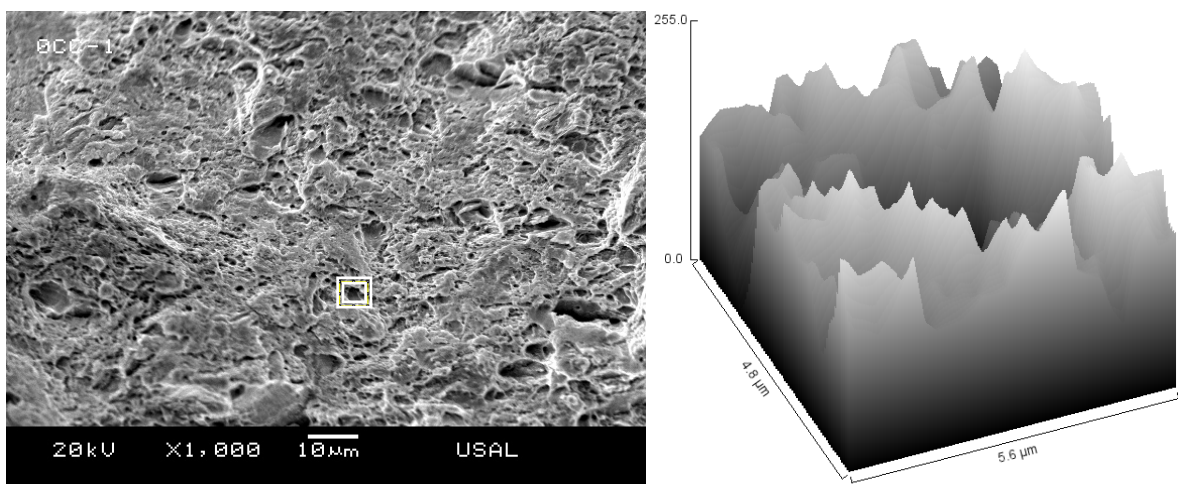


Fig. 3.44. Imagen tridimensional de un microhuevo inserto en la CE, probeta B0-CC-1.

La ZI de la probeta B0-CC-1 domina la mayor parte de la sección de fractura llegando a ocupar un 79% del área total. Presenta un micromecanismo de fractura predominante por clivaje (Fig. 3.45). En una imagen a 1000 aumentos de la ZI se observa que el clivaje no se encuentra aislado sino que existen pequeñas zonas formadas por microhuecos. Se aprecia cómo los microhuecos se concentran fundamentalmente a lo largo de las microfisuras presentes, como queda patente en las microfisuras que se encuentran en la zona superior de la imagen de la Fig. 3.45, así como en la fisura de gran tamaño que se sitúa en la mitad inferior de la imagen y que se extiende a lo largo de toda la fractografía.

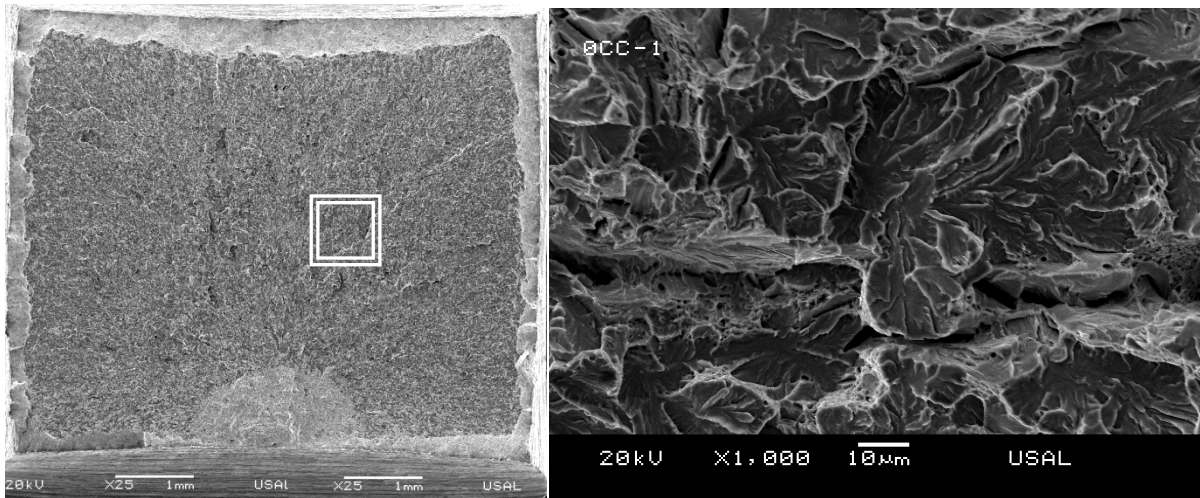


Fig. 3.45. Micro-fractografía de la zona intermedia de la probeta B0-CC-1.

Los microhuecos inmersos dentro de la zona de clivaje (zona intermedia, ZI) son en general de pequeño tamaño y presentan una forma geométrica próxima a la circular. En la imagen de la Fig. 3.46 se presenta uno de los microhuecos inmersos en la zona de clivaje, éste presenta forma ovalada siendo la longitud de su eje mayor de 2.28 μm.

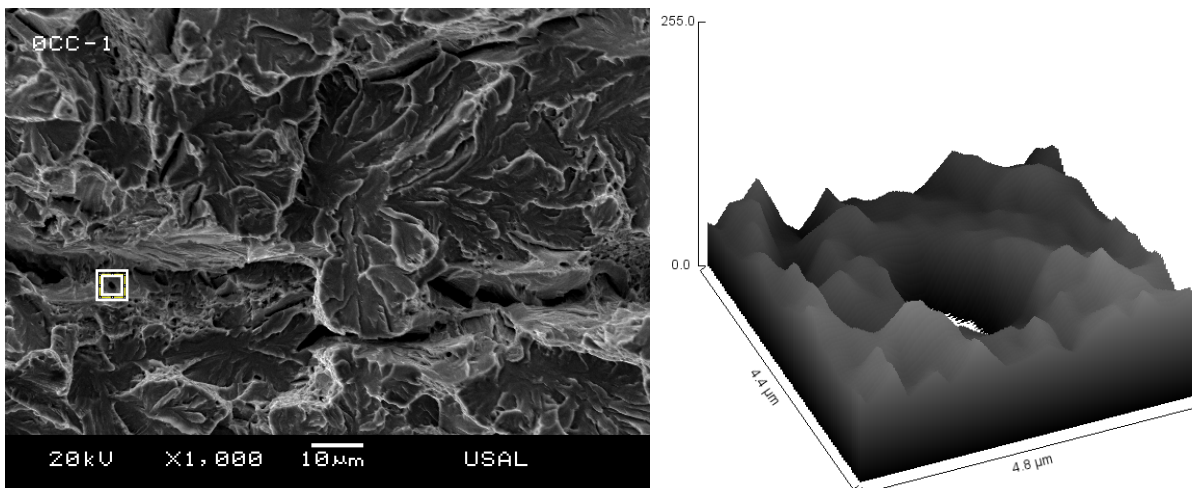


Fig. 3.46. Microhueco inserto en la fractura por clivaje de la probeta B0-CC-1.

Según se avanza hacia la entalla inferior la siguiente zona de fractura que se observa es la zona colindante entre la ZI y la zona de proceso de fractura ó ZPF (Fig. 3.47). La frontera de la ZPF con la ZI se caracteriza por ser una zona de contraste entre la textura que se observa en la superficie de clivaje y la textura que se observa en la ZPF, marcada ésta por la presencia de una elevada cantidad de microhuecos de diversos tamaños que la dotan de un aspecto de alta porosidad y rugosidad (fractografía tipo CMH\*).

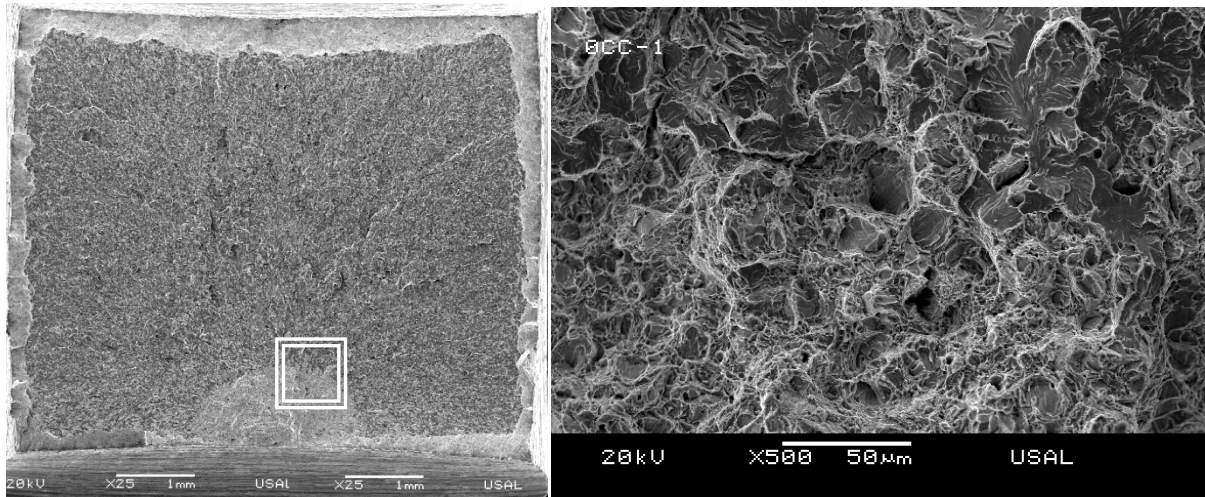


Fig. 3.47. Micro-fractografía de la frontera de la ZI con la ZPF.

El análisis de uno de los microhuecos inmerso dentro de esta zona limítrofe de fractura se presenta en la Fig. 3.48. Este microhuevo se encuentra inmerso en la zona de clivaje y revela un tamaño muy próximo a las 5 µm. Otro de los microhuecos analizados en esta zona se ha tomado en la ZPF, revela una tamaño de aproximadamente 9 µm y se representa tridimensionalmente en la Fig. 3.49.

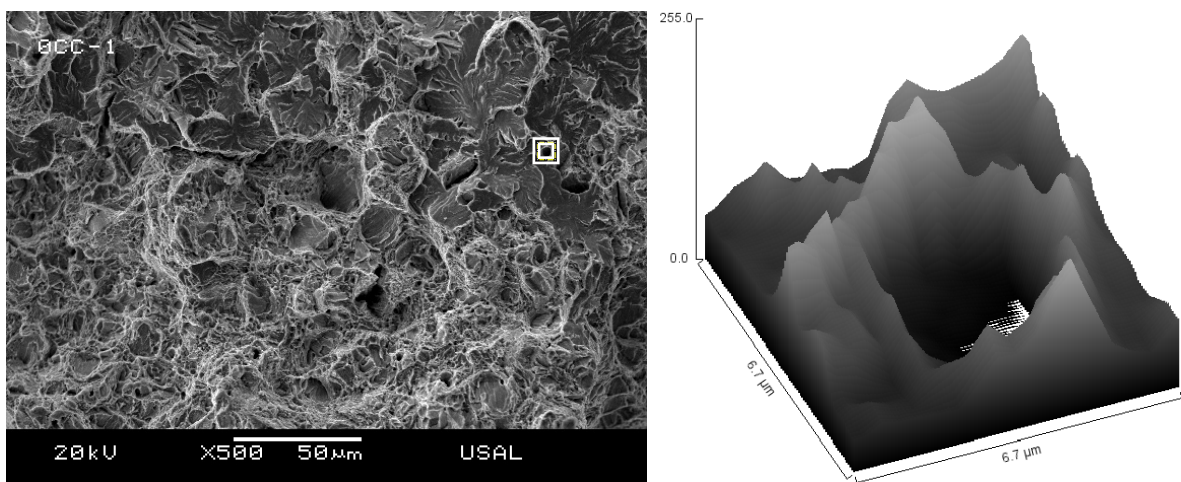


Fig. 3.48. Detalle de un microhuevo inmerso dentro de una de las facetas de clivaje situado en el perímetro de la ZPF de la probeta B0-CC-1.

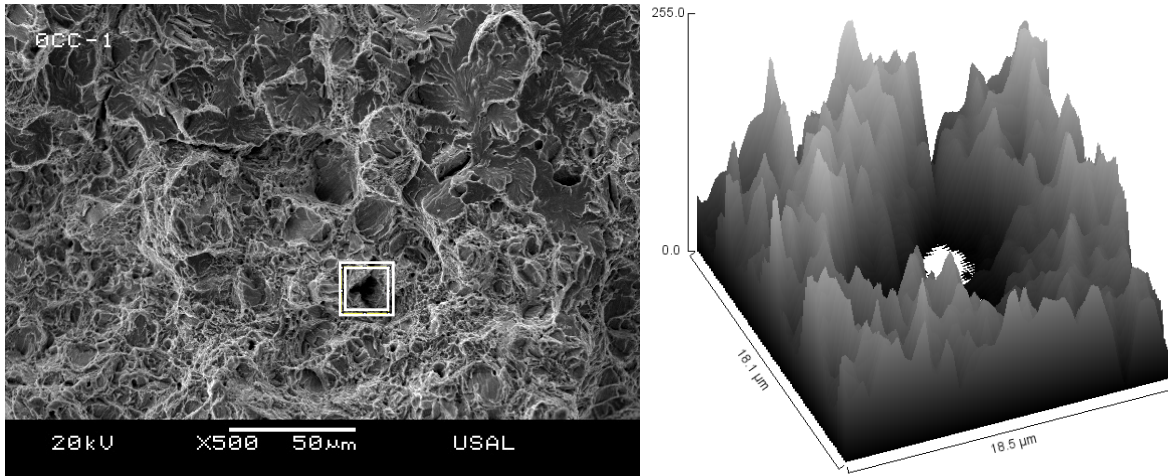


Fig. 3.49. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos en la frontera entre la ZPF y la zona intermedia.

La ZPF para la probeta B0-CC-1, como se ha comentado previamente, se localiza aproximadamente en la zona central de la entalla inferior, con una forma geométrica semicircular. El micromecanismo básico de fractura, como se puede apreciar en la imagen de la Fig. 3.50, es del tipo CMH\* (coalescencia de microhuecos, de muy diverso tamaño, que dan lugar a una superficie de fractura de aspecto rugoso o abrupto). En algunos puntos es posible localizar alguna microfisura aislada, como la que se encuentra en la mitad superior de la imagen situada a la derecha (Fig. 3.50) y de la cual se ha obtenido una representación tridimensional (véase la Fig. 3.51). Como se puede observar en la misma imagen, se trata de una microfisura de geometría alargada con un tamaño próximo a las 30  $\mu\text{m}$ . La zona circundante de la microfisura presenta una textura abrupta marcada por la presencia de irregularidades que se manifiestan en forma de crestas y valles, siendo dicha textura una característica típica de la fractura por CMH\* (ZPF).

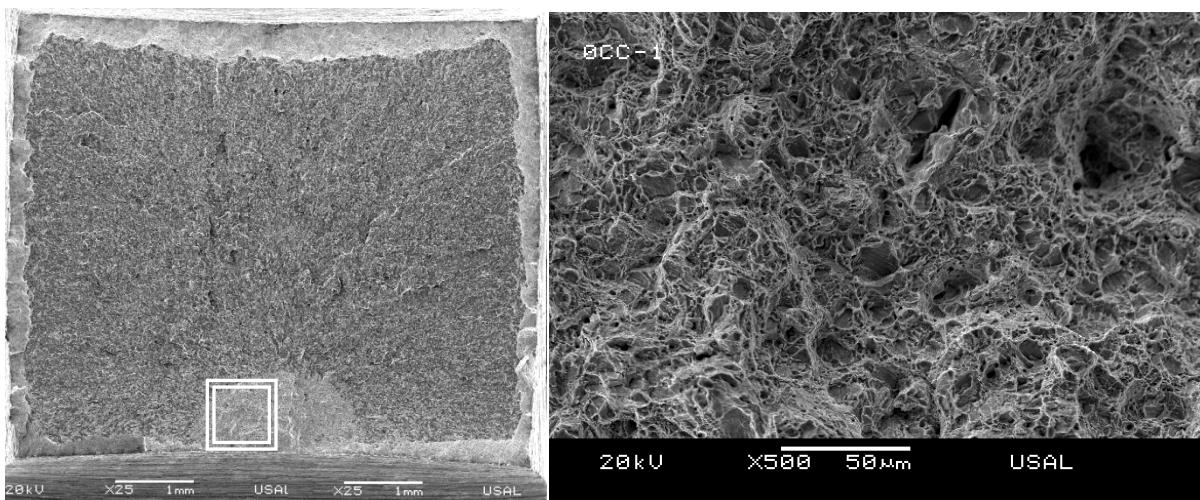


Fig. 3.50. Micro-fractografía de la zona de proceso de fractura de la probeta B0-CC-1.

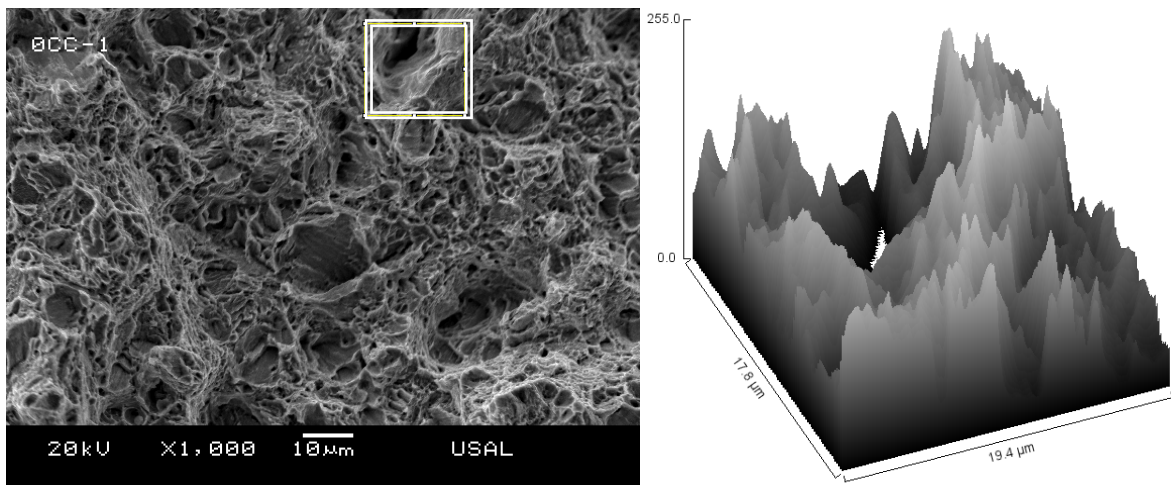


Fig. 3.51. Microfractografía correspondiente a la ZPF: probeta B0-CC-1.

Para concluir el análisis fractográfico de la probeta B0-CC-1 (probeta representativa de la muestra B0-CC) en la Fig. 3.52 se recogen una secuencia de micro-fractografías que realizan un recorrido a través de las diferentes secciones que se presentan en la superficie de fractura de la probeta en cuestión.

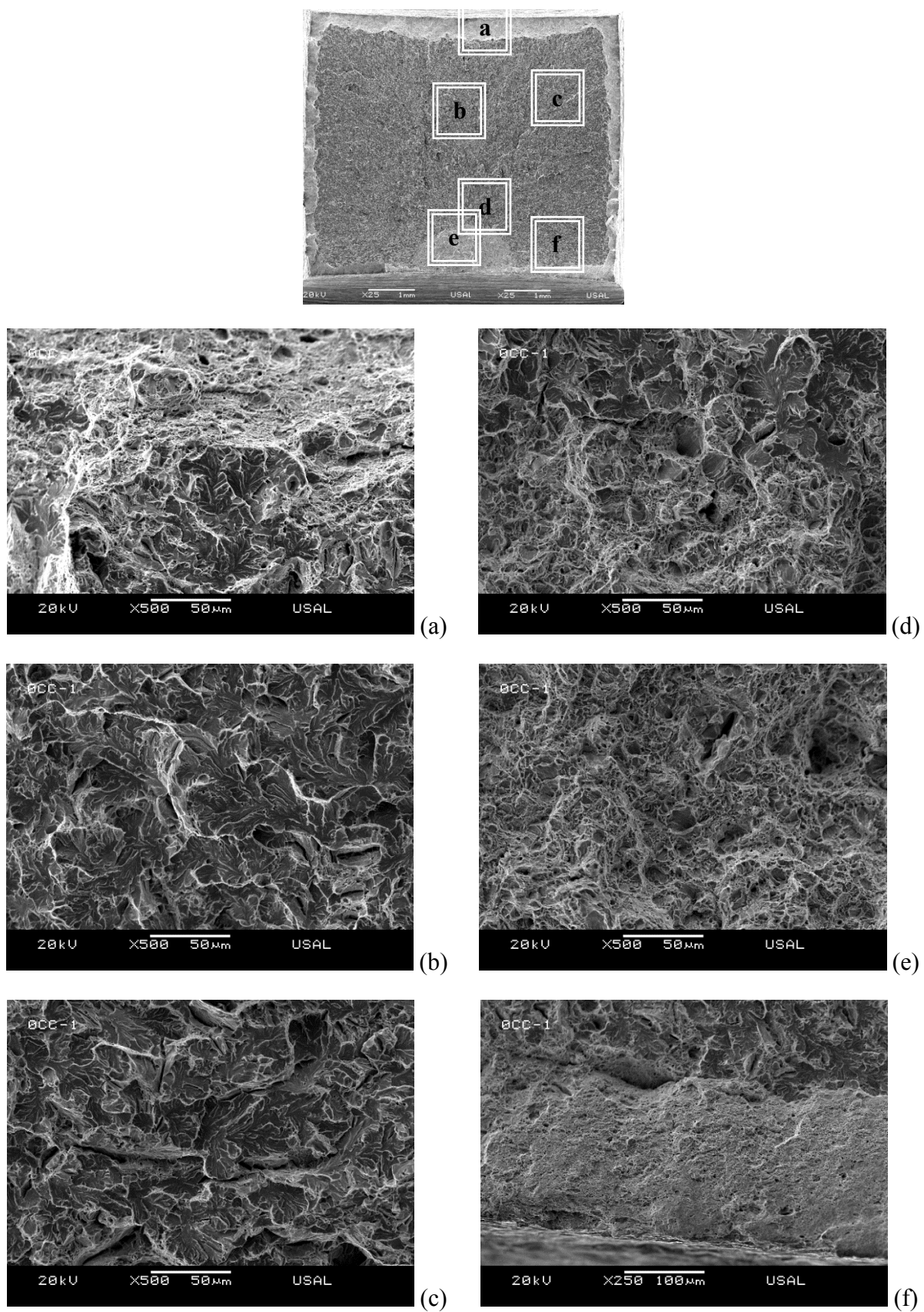


Fig. 3.52. Superficie de fractura de la probeta B0-CC-1.

## 2.5. Análisis fractográfico de la muestra B4-CC

La sección de rotura de la probeta B4-CC-1 que se presenta en la Fig. 3.53 (probeta representativa de la terna B4-CC) muestra una imagen característica de la sección de rotura que se presenta en las probetas B4 con entalla tipo CC. La imagen muestra la presencia de una zona central rodeada completamente por una zona límite que es la corona exterior o labio dúctil cortante. En principio, es más complicado que en ocasiones anteriores establecer el límite exacto entre la ZPF y la ZI.

El área porcentual de la corona exterior CE ha crecido notablemente respecto la muestra B0-CC, situándose en valores del 50% del área total de la sección de rotura. Para el caso particular de la probeta B4-CC-1 (Fig. 3.53) el porcentaje de área de la CE se sitúa en torno al 55%. La zona intermedia ZI ocupa aproximadamente entre el 33 y el 42% del área de la sección de rotura, según la probeta considerada de la terna, dejando entre el 8 y 10% restante para la ZPF.

A simple vista se pueden apreciar la presencia de fisuras que se extienden a lo largo de toda la ZI. Se aprecia su distribución radial hacia la periferia de la probeta partiendo de un núcleo que constituye la propia ZPF, la cual se encuentra situada en la mitad izquierda de la entalla inferior (Fig. 3.53).

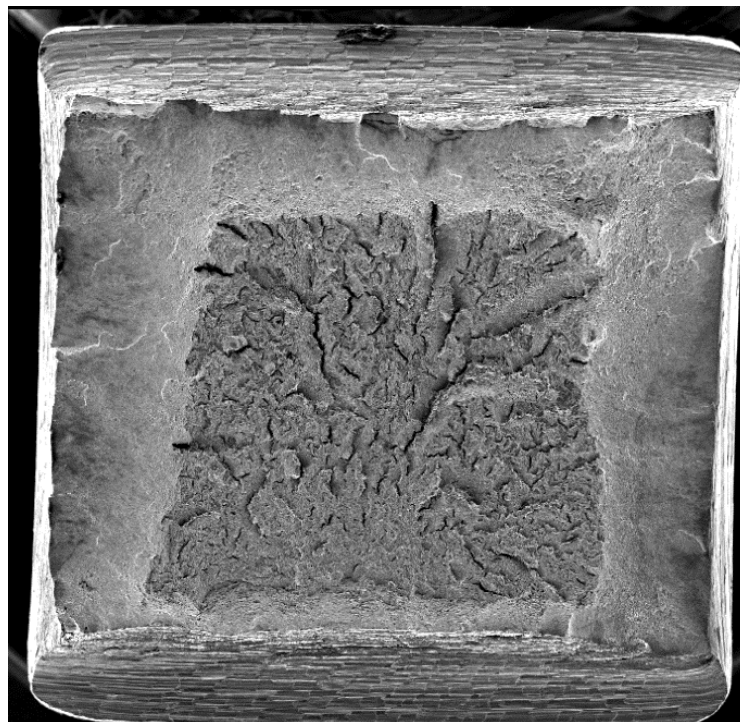


Fig. 3.53. Superficie de fractura de la probeta B4-CC-1.



La fractografía de la CE (Fig. 3.54) muestra una elevada concentración de microhuecos, CMH, distribuidos homogéneamente a lo largo de la superficie de la misma. En la Fig. 3.55 se presenta uno de los microhuecos existentes dentro de la corona exterior. Éste presenta un perfil de pared regular enmarcando una forma geométrica próxima a la esférica con un diámetro cercano a las 5  $\mu\text{m}$ .

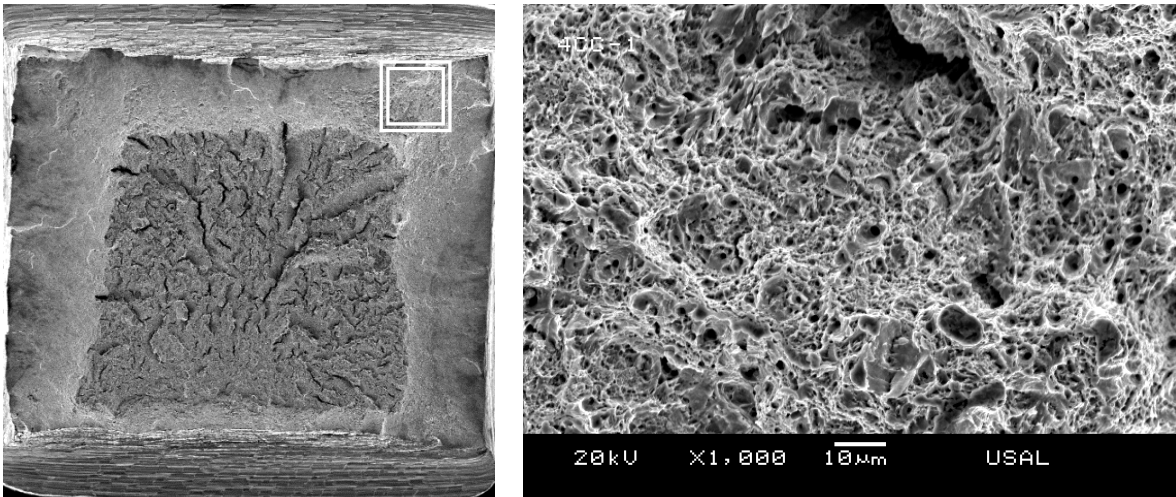


Fig. 3.54. Fractografía de la corona exterior (CE) o labio dúctil; probeta B4-CC-1.

En la Fig. 3.56 se presenta un microhuevo de diferentes características ya que, en principio, se podría tratar de una posible inclusión en el acero. Éste presenta una forma geométrica ovalada con unas dimensiones próximas a las 10  $\mu\text{m}$ , lo que indica que es un microhuevo marcadamente diferente al encontrado en el caso anterior, siendo además un indicativo de los diferentes tipos de microhuecos que se presentan en la corona. La pared interior, como en el caso anterior, tiene una apariencia marcadamente regular.

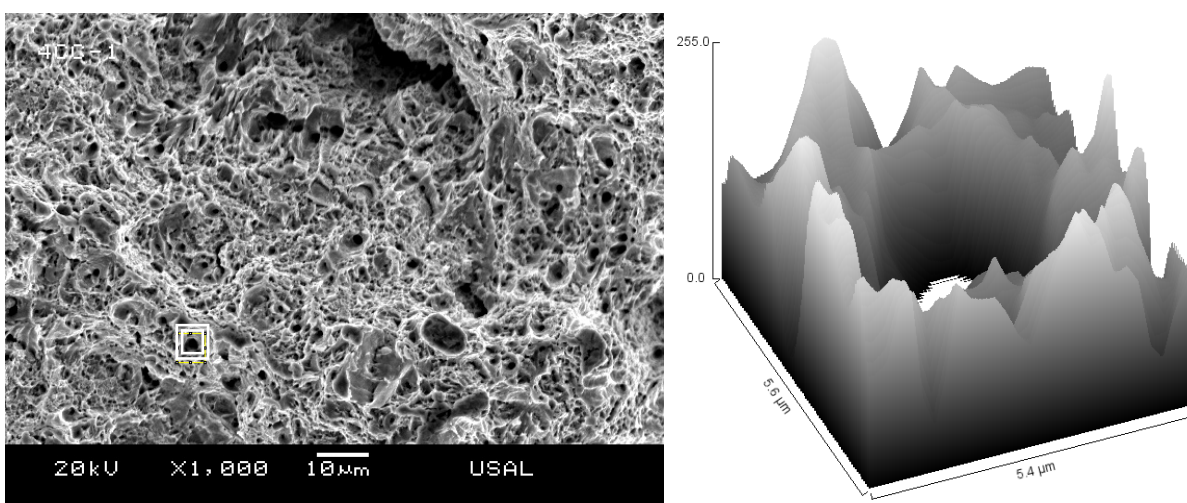


Fig. 3.55. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmerso dentro de la CE de la probeta B4-CC-1.

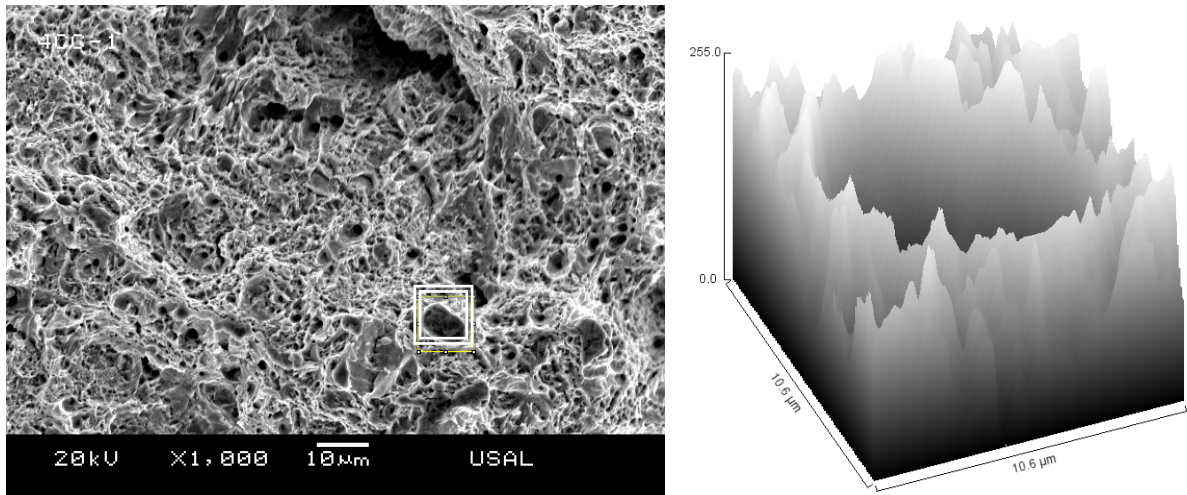


Fig. 3.56. Detalle de un microhueco de gran tamaño inmerso dentro de la CE de la superficie de fractura de la probeta B4-CC-1.

En la ZI el micromecanismo básico de fractura dominante es el clivaje, no obstante, no se trata de clivaje al 100%, sino que se presenta acompañado de zonas pobladas de CMH, como se puede comprobar en la imagen derecha de la Fig. 3.57, donde se presenta una zona de clivaje rodeada por zonas de elevada concentración de microhuecos.

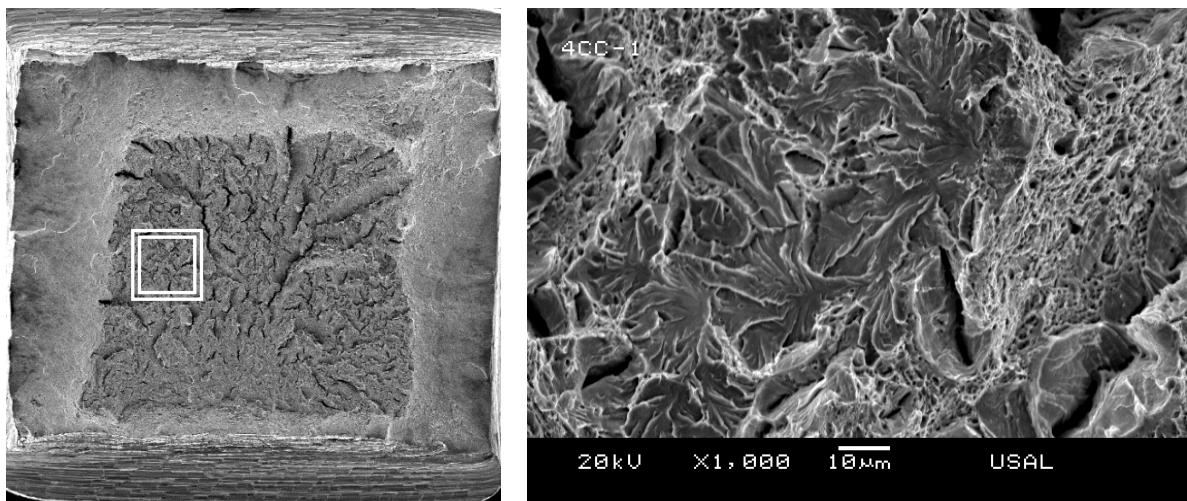


Fig. 3.57. Fractografía de la zona de intercara entre el clivaje y zona de microhuecos

La fractografía de la ZI muestra la presencia de fisuras que se distribuyen de manera radial desde la ZPF hacia los márgenes de la probeta. A mayor nivel de aumentos se aprecia cómo las microfisuras presentan una geometría alargada, con una longitud que oscila entre las 5 y las 30  $\mu\text{m}$ . En algunos casos se observa la convergencia perpendicular de dos microfisuras de modo que se observan ángulos próximos a los  $90^\circ$ , como el que se puede ver en la imagen izda. de la Fig. 3.58. En la imagen dcha. de dicha figura se presenta la textura de la zona limítrofe del clivaje con zonas con presencia de CMH.

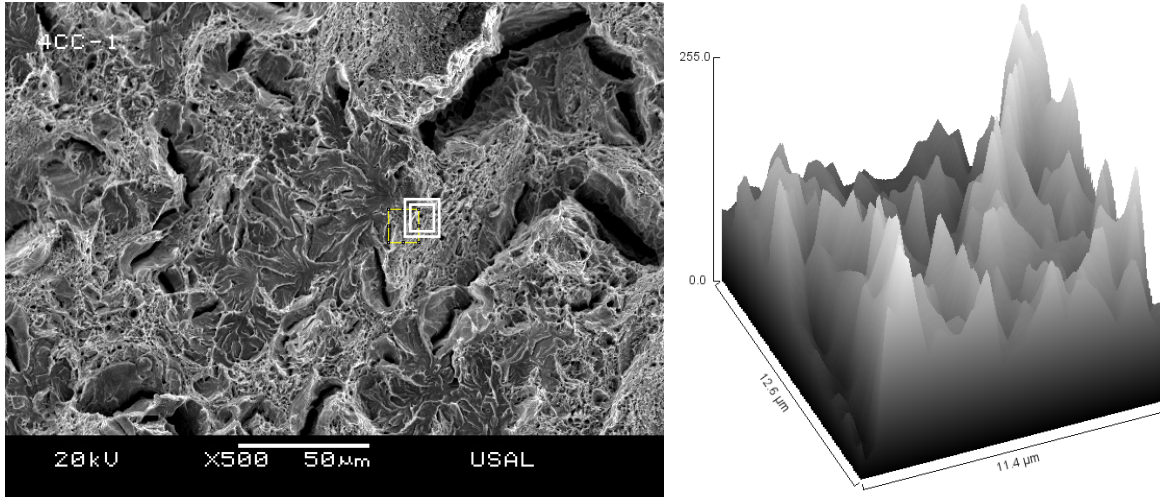


Fig. 3.58. Recreación tridimensional de la intercara entre el clivaje y una zona de microhuecos presente en la ZI de la probeta B4-CC-1.

La ZPF se localiza en la zona central adyacente a la entalla inferior y presenta una microfractografía que evidencia la presencia de microhuecos. Los microhuecos presentan una amplia variedad de tamaños y geometrías como se puede observar en la Fig. 3.59. En la Fig. 3.60 se representa la imagen tridimensional correspondiente a un microhueco inmerso dentro de la ZPF. Éste presenta forma ovalada con una textura interna marcadamente irregular, y cuya dimensión longitudinal es ligeramente superior a las 5  $\mu\text{m}$ .

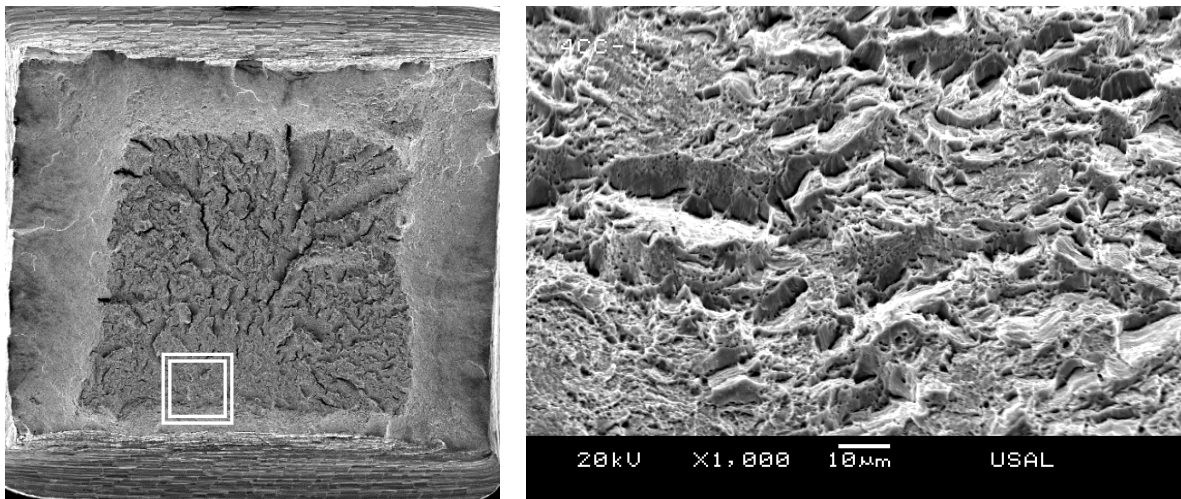


Fig. 3.59. Micro-fractografía a 1000 aumentos de la zona de proceso de fractura para el caso de la probeta B4-CC-1.

En uno de los puntos de la fractografía de la ZPF a 2500 aumentos se puede apreciar una microfisura de geometría alargada, con una longitud superior a las 7  $\mu\text{m}$  (Fig. 3.61). Presenta un perfil interno marcadamente irregular en el que abunda la presencia de microhuecos de pequeño tamaño.

Como se ha podido comprobar existe poca divergencia en cuanto a la textura que se presenta en la CE y la textura que aparece en la ZPF, siendo bastantes complejas de distinguir a nivel microscópico, ya que en ambos casos son bastante semejantes en cuanto a la textura se refiere. Las diferencias en la textura de la ZPF y de la CE van disminuyendo a medida que aumenta el grado de trefilado del acero empleado en la elaboración de las probetas prismáticas entalladas.

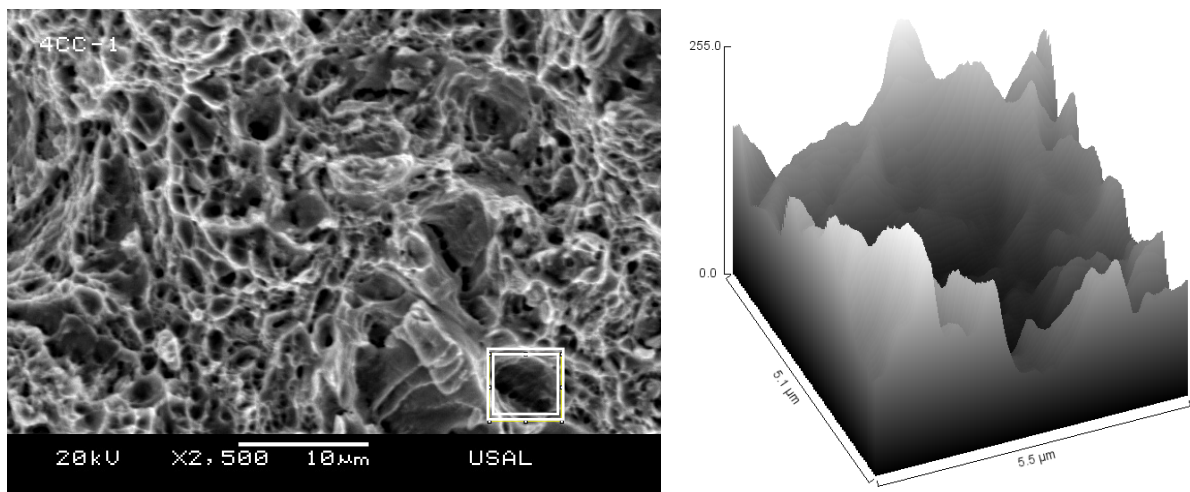


Fig. 3.60. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos en la ZPF de la probeta B4-CC-1.

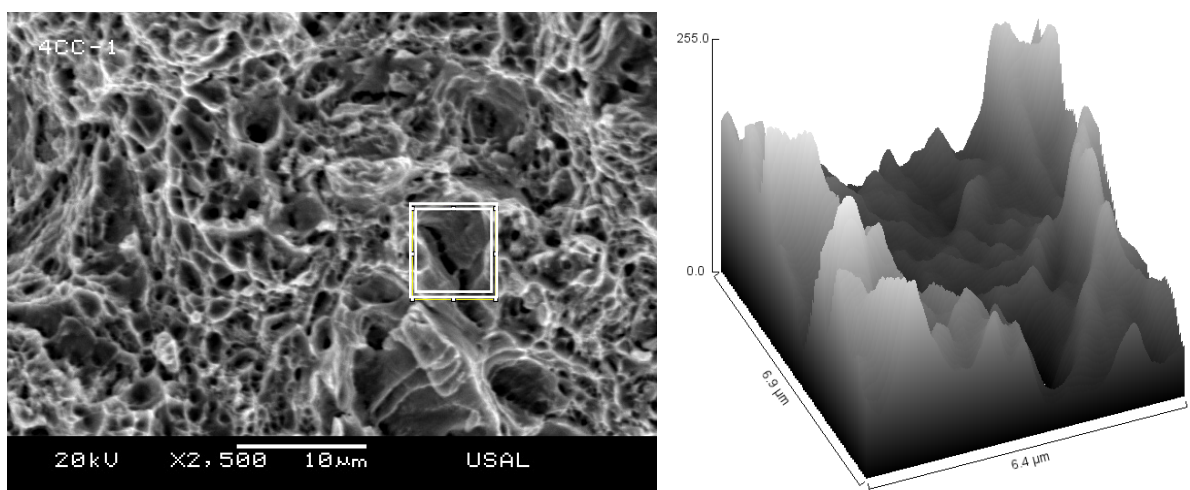


Fig. 3.61. Recreación tridimensional de una microfisura inserta dentro de la ZPF de la probeta B4-CC-1.

La imagen del perfil de la sección de rotura de la probeta B4-CC-1 muestra cómo la fractura se ha dado dando lugar con la formación de un cierto cuello de estrangulación a diferencia de la imagen que nos proporcionaba la probeta B4-AA-1 (la entalla tipo CC genera mayor deformación plástica en el material que la entalla tipo AA). El análisis microscópico indica que el avance de la fractura, en la dirección perpendicular a la sección transversal (eje longitudinal del alambre de partida) se produce mediante el micromecanismo de fractura de clivaje, como se puede ver en la imagen derecha de la Fig. 3.62.

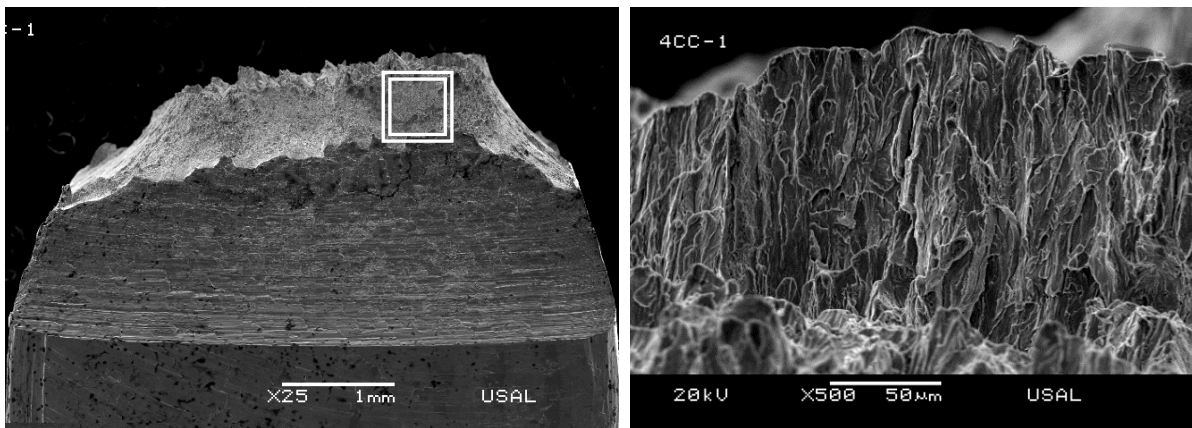


Fig. 3.62. Micro-fractografía correspondiente a los clivajes presentes en la sección del perfil de rotura de la probeta B4-CC-1.

Para concluir el análisis de la fractografía de la probeta B4-CC-1 (probeta representativa de la muestra B4-CC) se presenta en la Fig. 3.63 una secuencia de micro-fractografías que realizan un recorrido a través de las diferentes secciones que se presentan en la superficie de fractura de la probeta.

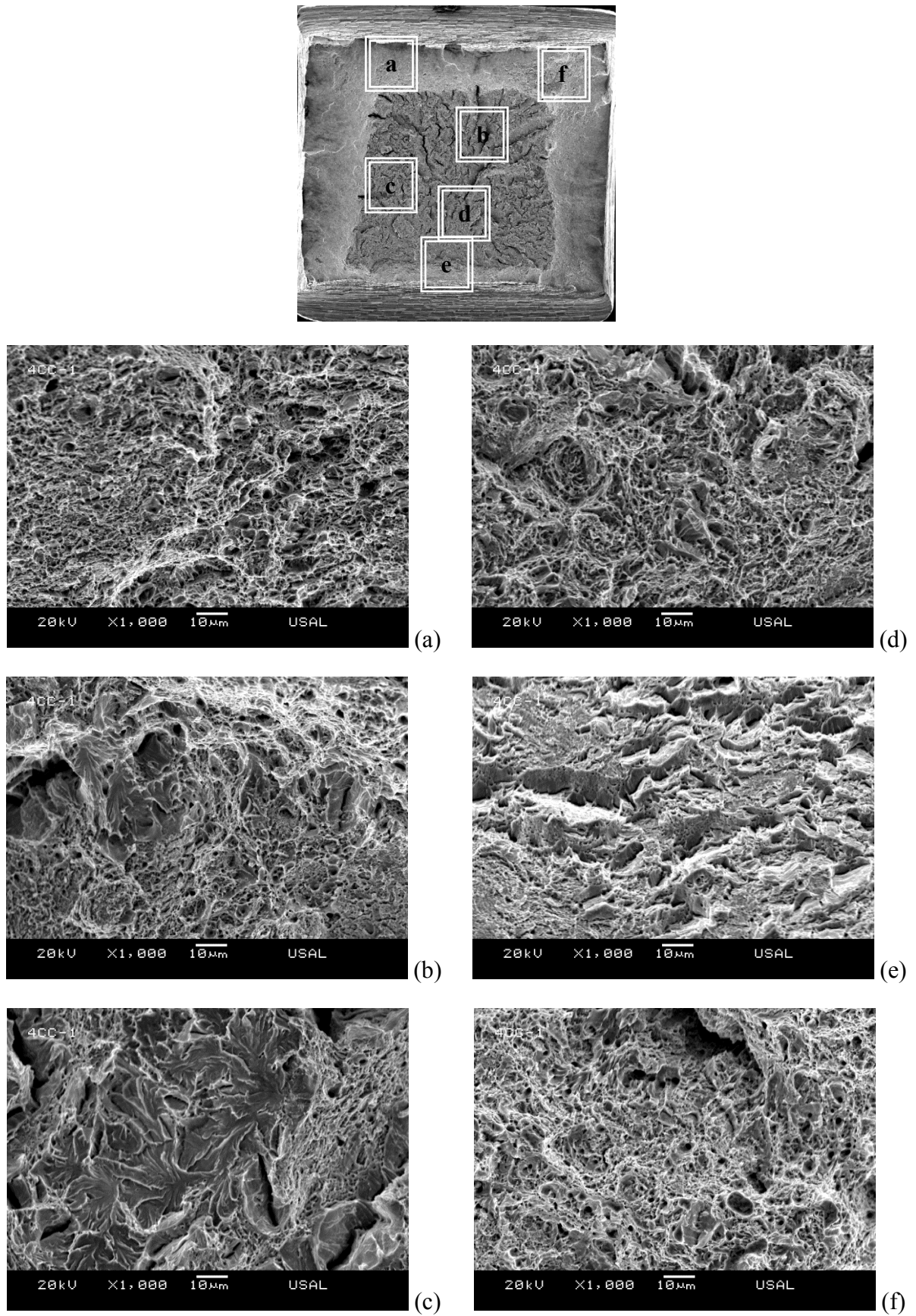


Fig. 3.63. Diversas zonas de la superficie de fractura de la probeta B4-CC-1.

## 2.6. Análisis fractográfico de la muestra B7-CC

La sección de rotura de la probeta B7-CC-2, probeta representativa de la terna B7-CC, está gobernada en su práctica totalidad por la presencia de CMH como único mecanismo básico que gobierna la fractura. A nivel visual se observan tres tipos de texturas, según se puede apreciar en la Fig. 3.64. Una primera textura que enmarca la probeta y que se puede definir como corona o labio dúctil (cortante). Una zona intermedia (2ª textura) que ocupa la parte central de la probeta y que muestra fisuras que parten de la ZPF (3ª textura) y que se distribuyen radialmente hacia la zona periférica de la ZI.

El área de la corona externa CE (o labio dúctil cortante) para este tipo de probetas oscila entre el 39% para la probeta B7-CC-2 y el 49% para la probeta B7-CC-1. La ZI se distribuye entre el 42% de la superficie de rotura de la probeta B7-CC-1 y el 46% de la probeta B7-CC-2. La ZPF se establece en el resto de la superficie, lo que en porcentaje supone que su oscilación se sitúa desde el mínimo, que lo presenta la probeta B7-CC-3, con un 8% de superficie ocupada a un 13% para la probeta B7-CC-2. A nivel visual ha sido complicado establecer un límite definido entre la ZI y la ZPF, situándose esta última en el centro de la entalla inferior, de ello se deriva que las cifras que se han apuntado son de carácter meramente estimativo.

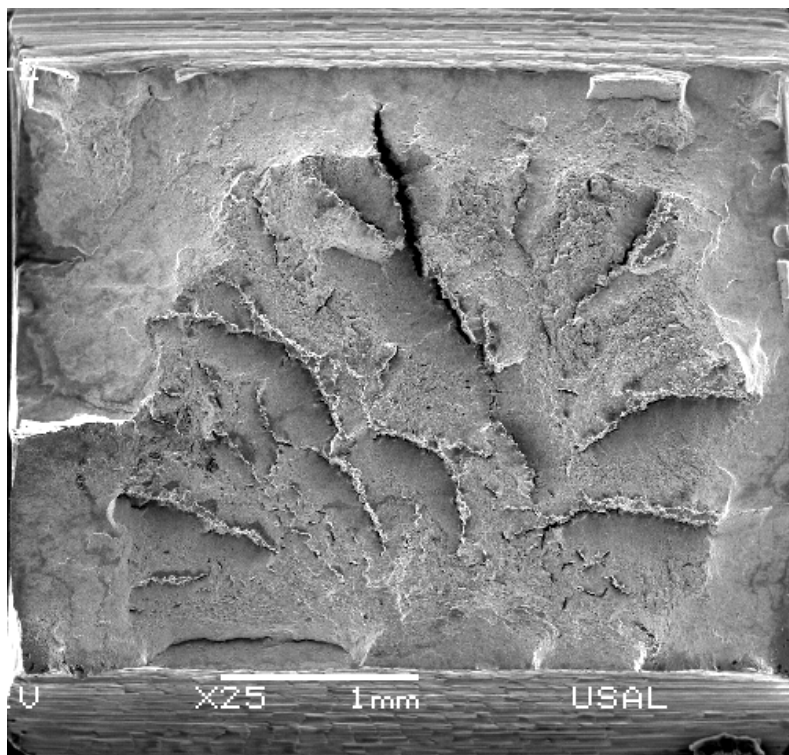


Fig. 3.64. Superficie de fractura de la probeta B7-CC-2.

La primera zona que se va a analizar es la CE; ésta presenta una textura que a nivel visual parece de carácter uniforme; sin embargo, una fractografía a 1000 aumentos (Fig. 3.65) muestra que la superficie está densamente poblada por microhuecos y microfisuras. El tamaño y la forma de los microhuecos son de diversa morfología. En la imagen de la Fig. 3.66 se presenta una imagen tridimensional de uno de los microhuecos presentes, de geometría ovalada, y que se enmarca en un entorno irregular; las dimensiones se sitúan en el entorno de las 5  $\mu\text{m}$  para su eje mayor y de 4  $\mu\text{m}$  para su eje menor. La fractografía que se presenta la corona situada en la entalla superior (según la imagen) presenta tal cantidad de microhuecos y microfisuras que la hacen una imagen más propia de una ZPF que de la CE en sí, lo cual constituye un indicativo de las elevadas tensiones y deformaciones que ha sufrido la zona en cuestión, y muestra el nivel de actividad que se ha generado en la entalla superior, aunque ésta no fuese la detonante de la fractura final.

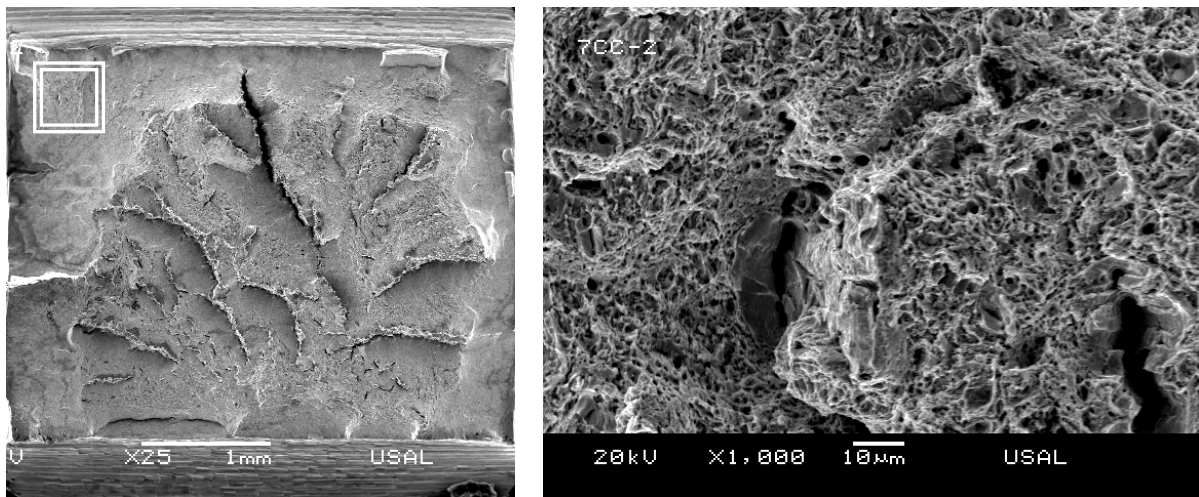


Fig. 3.65. Fractografía de la corona exterior CE, probeta B7-CC-2.

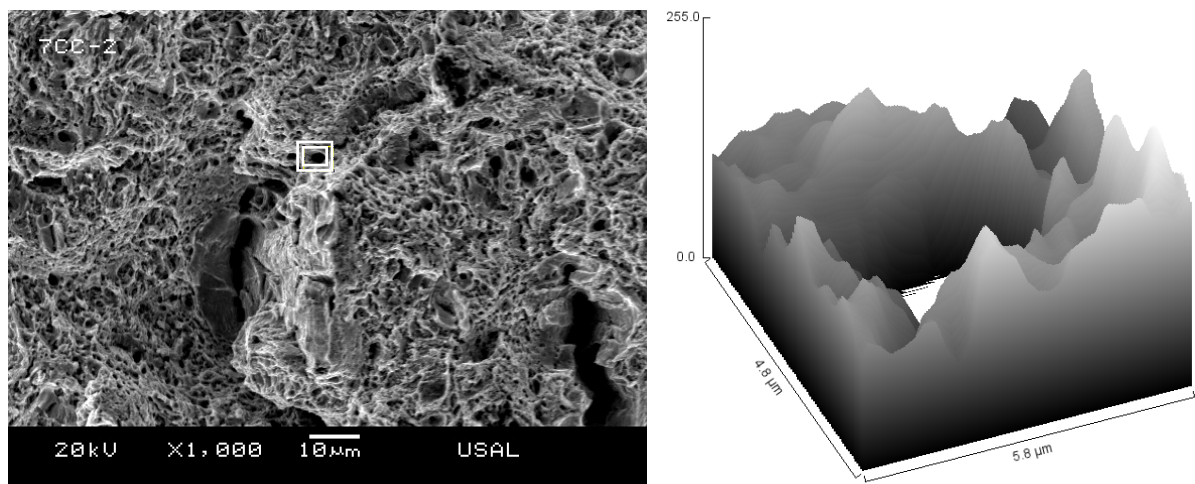


Fig. 3.66. Recreación tridimensional de un microhueco inserto en la CE: probeta B7-CC-2.



En la imagen de la Fig. 3.67 se recrea de forma tridimensional una de las microfisuras presentes en la CE. Se trata de una fisura de forma alargada con una longitud que supera las 30  $\mu\text{m}$ , enmarcada en un entorno altamente irregular, en el cuál se pueden observar pequeñas zonas de micro-clivaje, como el que se muestra en el margen izquierdo de la microfisura.

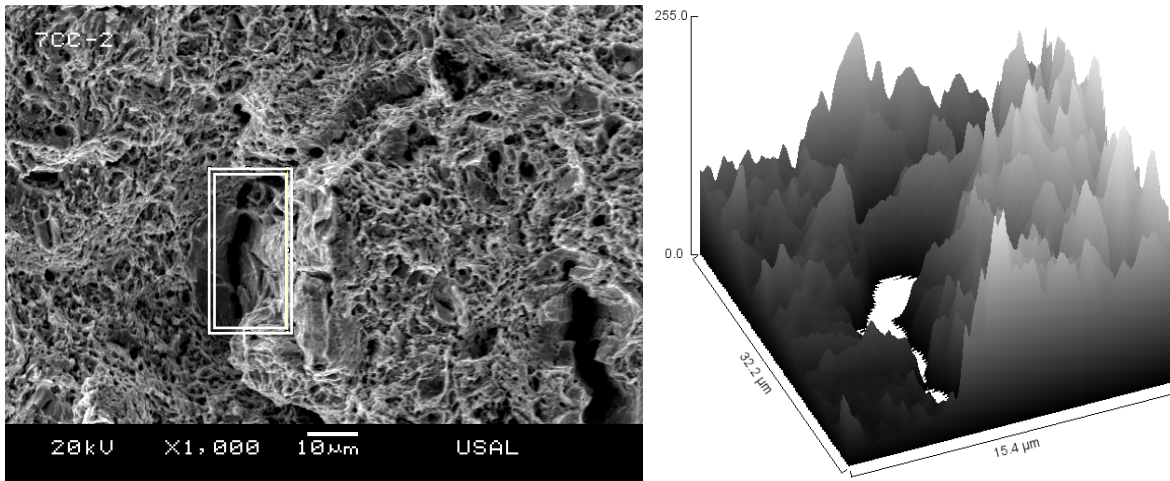


Fig. 3.67. Recreación tridimensional de una de las fisuras presentes en la corona superior de la probeta B7-CC-2.

En la ZI se aprecia que el micromecanismo básico de fractura es el CMH aunque, si bien es cierto, se pueden hallar en la zona algunos clivajes aislados, los cuales se encuentran generalmente próximos a las microfisuras, como el que se presenta en la microfisura situada en la esquina inferior de la imagen dcha. de la Fig. 3.68. Se trata de una microfisura de geometría alargada con forma curva cuya longitud se aproxima a las 30  $\mu\text{m}$ . Los microhuecos que se encuentran en la zona presentan una gran amplitud de tamaño y formas geométricas; en la Fig. 3.69 se presenta uno de los microhuecos, éste presenta una geometría y un perfil interno irregular donde su mayor dimensión se aproxima a las 5  $\mu\text{m}$ .

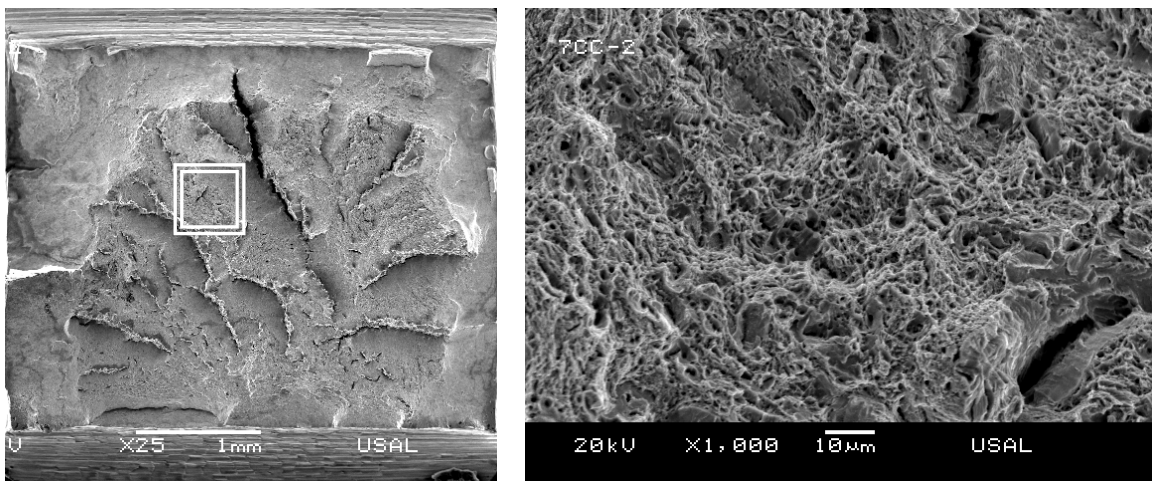


Fig. 3.68. Micro-fractografía a 1000 aumentos de la ZI de la probeta B7-CC-2.

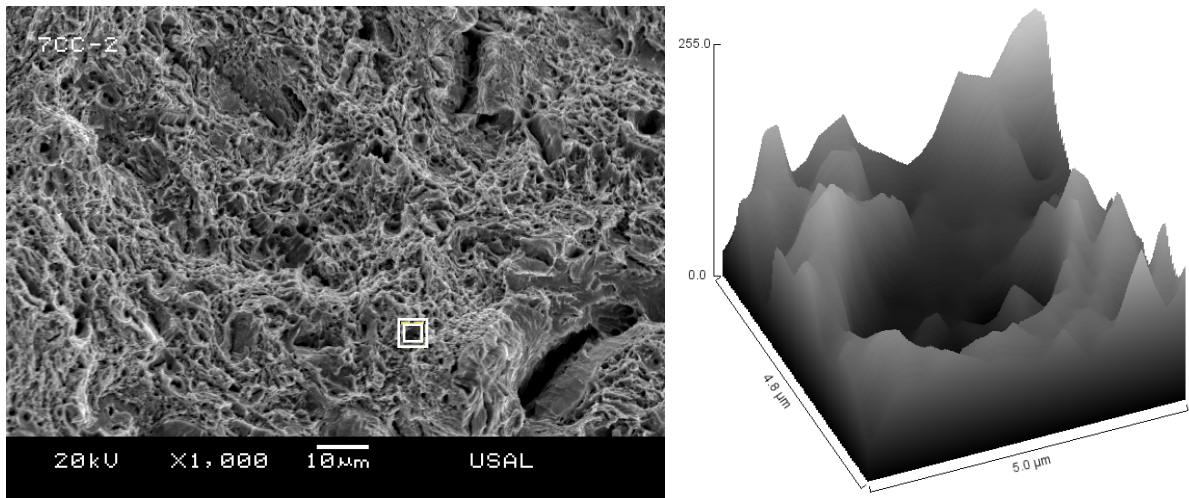


Fig. 3.69. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos presentes en la ZI de la probeta B7-CC-2.

La ZPF, como se ha comentado anteriormente, se encuentra situada en la zona central de la entalla inferior (Figs. 3.64 y 3.70). A nivel micro-fractográfico no difiere significativamente de las fractografías que se han analizado previamente, como se puede ver en la imagen de la Fig. 3.70, siendo en esencia de similar naturaleza; la razón fundamental puede encontrarse en que la ZPF se generó en ambas entallas a la vez, aunque finalmente la fractura se produjo a partir de la ZPF generada en la entalla inferior (según la posición de la figura). Esta hipótesis se sustenta además en las marcas de las fisuras de la ZI en forma de abanico, sugiriendo una fractura desde la parte inferior de la imagen y hacia la parte superior de la misma.

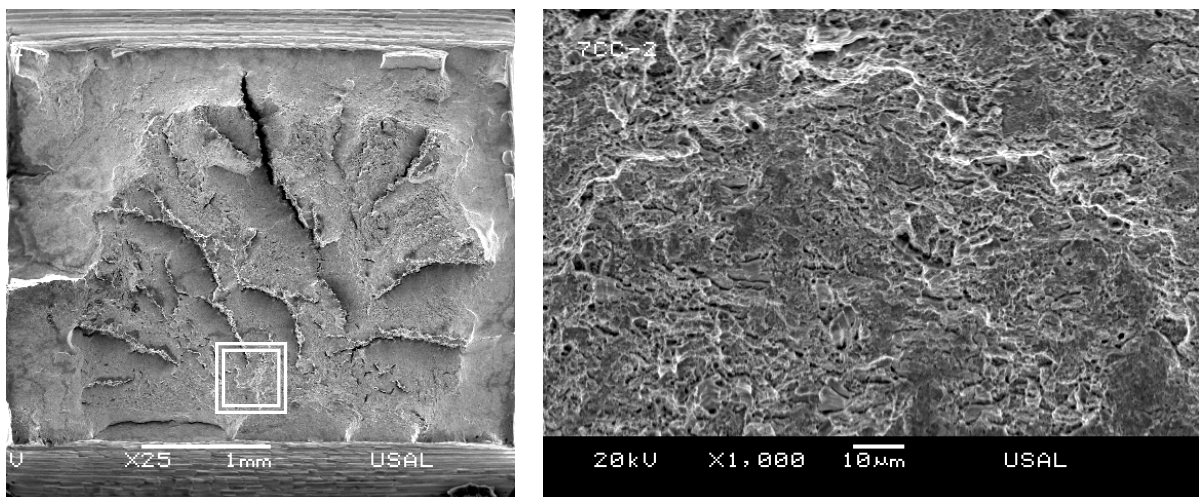


Fig. 3.70. Imagen correspondiente a la ZPF de la probeta B7-CC-2.

El perfil de la probeta B7-CC-2 muestra una imagen indicativa de una fractura altamente irregular, característica de un marcado comportamiento anisótropo en fractura (Fig. 3.71). El

micromecanismo básico de fractura que se observa extendido a lo largo de todo el perfil es el clivaje, como queda evidenciado en la imagen derecha de la Fig. 3.71.

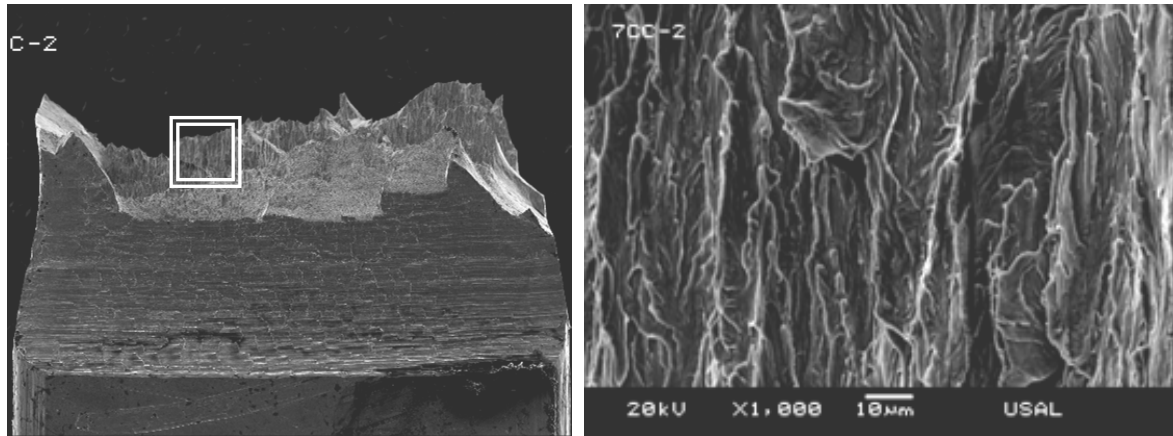


Fig. 3.71. Micro-fractografía a 1000 aumentos correspondiente a clivajes insertos en la sección de perfil de la probeta B7-CC-2.

Para concluir el análisis de la fractografía de la probeta B7-CC-2 (probeta representativa de la muestra B7-CC) se presenta la Fig. 3.72 en la que se recoge una secuencia de micro-fractografías realizan un recorrido a través de las diferentes zonas que se presentan en la sección de rotura de la probeta.

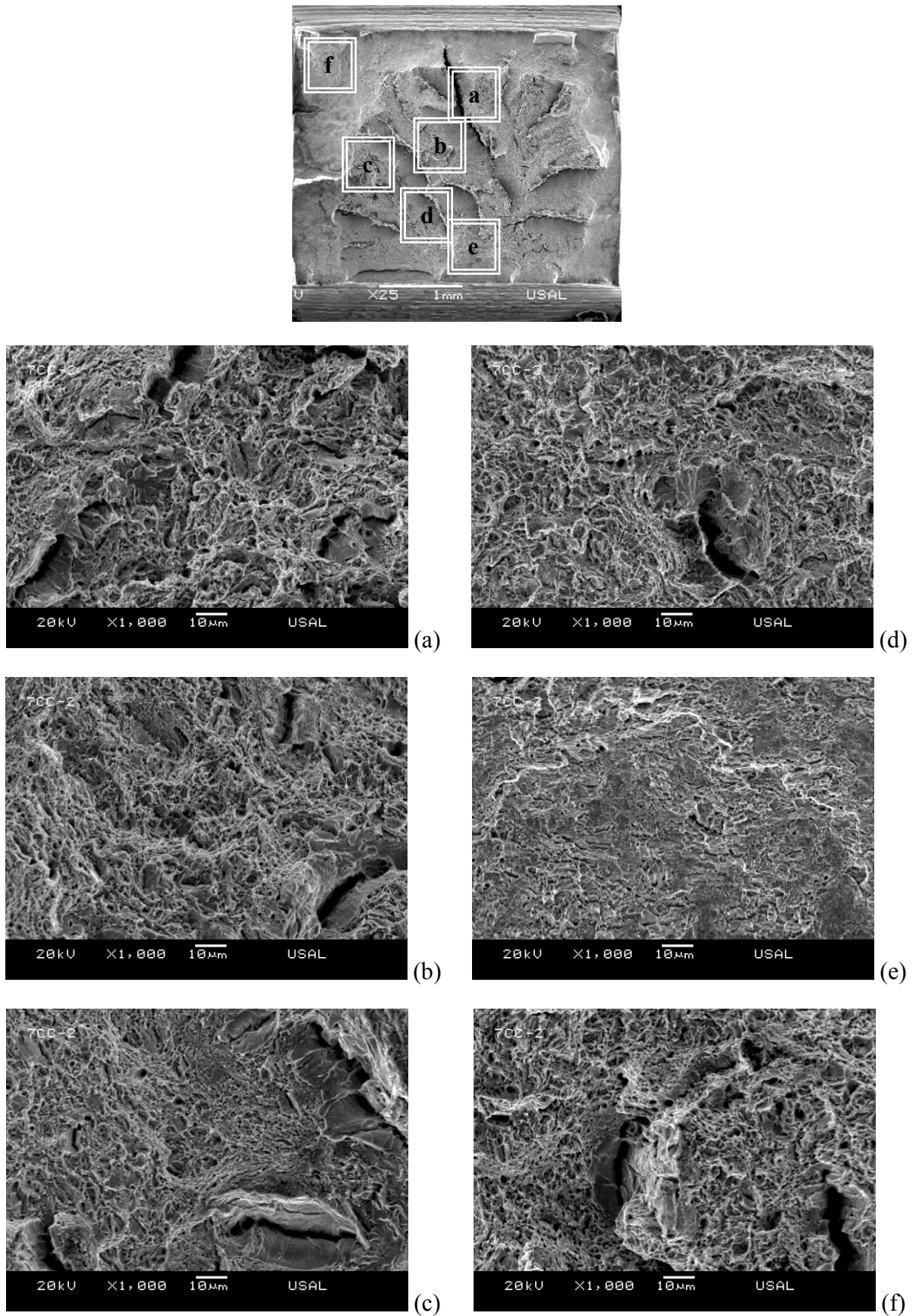


Fig. 3.72. Superficie de fractura de la probeta B7-CC-2.

## 2.7. Análisis cuantitativo de las superficies de fractura

En el siguiente conjunto de Tablas 3.1 a 3.6 se presentan los resultados de las medidas realizadas sobre la superficie de fractura de las probetas ensayadas. Como puede observarse del análisis de las Tablas 3.1, 3.3 y 3.5 en las probetas con entallas tipo AA existe la siguiente tendencia: a medida que aumenta el grado de trefilado del material origen de la probeta se observa una disminución del porcentaje de área ocupada por la ZI ( $A_{ZI}$ ), de modo que aumenta el área de la CE resultante ( $A_{CE}$ ) y de la ZPF ( $A_{ZPF}$ ). El mismo comportamiento se observa para las probetas con entalla tipo CC (véanse las Tablas 3.2, 3.4 y 3.6), salvo en el caso de aquellas mecanizadas a partir del alambre de trefilado (muestra B7-CC), si bien es cierto que se trata de una probeta difícil de analizar debido a su fractura anisótropa y los datos pueden verse afectados por este hecho.

Tabla 3.1. Datos característicos de la muestra B0-AA.

<b>B0</b>	<b>B0-AA-1</b>		<b>B0-AA-2</b>		<b>B0-AA-3</b>	
	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%
<b>A<sub>T</sub></b>	45.04	100	44.77	100	45.67	100
<b>A<sub>ZPF</sub></b>	1.95	4	2.17	5	1.28	3
<b>A<sub>ZI</sub></b>	41.31	92	39.65	88	42.13	92
<b>A<sub>CE</sub></b>	1.78	4	2.95	7	2.26	5

Tabla 3.2. Datos característicos de la muestra B0-CC.

<b>B0</b>	<b>B0-CC-1</b>		<b>B0-CC-2</b>		<b>B0-CC-3</b>	
	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%
<b>A<sub>T</sub></b>	37.9	100	36.61	100	32.56	100
<b>A<sub>ZPF</sub></b>	1.75	5	1.93	5	1.82	6
<b>A<sub>ZI</sub></b>	29.95	79	27.02	74	24.61	75
<b>A<sub>CE</sub></b>	6.2	16	7.84	21	6.13	19

Tabla 3.3. Datos característicos de la muestra B4-AA.

<b>B0</b>	<b>B4-AA-1</b>		<b>B4-AA-2</b>		<b>B4-AA-3</b>	
	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%
<b>A<sub>T</sub></b>	27.37	100	24.18	100	24.88	100
<b>A<sub>ZPF</sub></b>	2.11	8	0.65	3	1.52	6
<b>A<sub>ZI</sub></b>	16.09	59	15.19	63	13.94	56
<b>A<sub>CE</sub></b>	9.17	33	8.34	34	9.42	38

Tabla 3.4. Datos característicos de la muestra B4-CC.

<b>B0</b>	<b>B4-CC-1</b>		<b>B4-CC-2</b>		<b>B4-CC-3</b>	
	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%
<b>A<sub>T</sub></b>	18.08	100	18.97	100	16.01	100
<b>A<sub>ZPF</sub></b>	1.38	8	1.83	10	1.50	9
<b>A<sub>ZI</sub></b>	6.67	37	6.35	33	6.68	42
<b>A<sub>CE</sub></b>	10.03	55	10.79	57	7.83	49

Tabla 3.5. Datos característicos de la muestra B7-AA.

<b>B0</b>	<b>B7-AA-1</b>		<b>B7-AA-2</b>		<b>B7-AA-3</b>	
	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%
<b>A<sub>T</sub></b>	11.83	100	13.17	100	12.72	100
<b>A<sub>ZPF</sub></b>	1.63	14	1.22	9	1.35	11
<b>A<sub>ZI</sub></b>	3.78	32	6.17	47	4.53	35
<b>A<sub>CE</sub></b>	6.42	54	5.78	44	6.84	54

Tabla 3.6. Datos característicos de la muestra B7-CC.

<b>B0</b>	<b>B7-CC-1</b>		<b>B7-CC-2</b>		<b>B7-CC-3</b>	
	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%	(mm <sup>2</sup> )	%
<b>A<sub>T</sub></b>	12.45	100	11.74	100	12.09	100
<b>A<sub>ZPF</sub></b>	1.07	9	1.59	13	0.94	8
<b>A<sub>ZI</sub></b>	5.28	42	5.49	47	5.49	45
<b>A<sub>CE</sub></b>	6.1	49	4.66	40	5.66	47

### 3. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO: PROBETAS PRISMÁTICAS DE FLEXIÓN

#### 3.1. Análisis fractográfico de la muestra B0-A

La característica más reseñable de las probetas sometidas al ensayo de flexión por cuatro puntos es la alta deformación que sufren las diversas probetas ensayadas. Esta deformación se manifiesta, en general, en una pérdida de paralelismo en todas sus caras, que se observa en mayor o menor medida, en función de las particularidades de la probeta analizada. La deformación en la sección de fractura conduce a la probeta a un aumento de longitud en la sección opuesta a la entalla así como una contracción en la longitud de la sección de entalla, esto supone que las probetas presentan una forma característica. En las probetas B0-A se manifiesta en menor medida este fenómeno (Fig. 3.73).

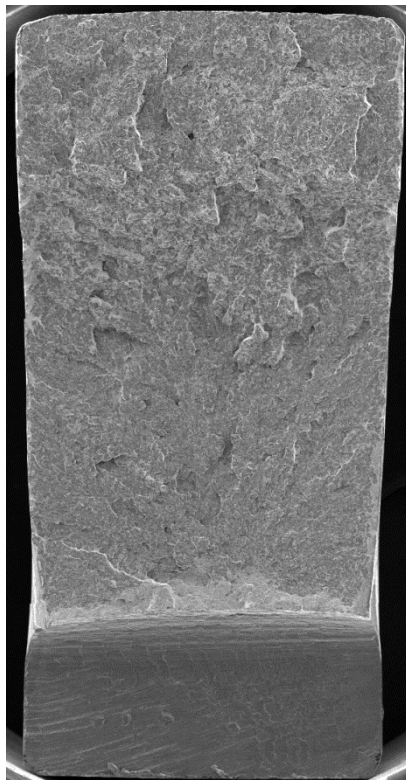


Fig. 3.73. Superficie de fractura de la probeta B0-A-1.

La fractografía correspondiente a la probeta B0-A-1 (Fig. 3.73) es una fractografía común de las probetas B0 con entalla tipo A (pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad), como se puede ver en el capítulo de Anexos dedicado a la fractografía. La probeta B0-A-1 presenta dos zonas claramente diferenciadas la ZI y la ZPF. La CE es escasamente representativa para este tipo de probetas, no es una corona que abarque la totalidad de la superficie de fractura (al contrario de lo que sucede con las probetas prismáticas sometidas a sollicitaciones de tracción B-AA y B-CC), sino que en este caso se presenta de forma puntual en los bordes externos de

la superficie de fractura. A modo de ejemplo considérese los valores que toma el área porcentual de CE: se observan ocupaciones que oscilan entre el 0.8% para la probeta B0-A-1 al 1% de la superficie total de fractura para la probeta B0-A-3.

La ZI se distribuye cubriendo el 96% de la superficie de fractura en los tres casos estudiados. Presenta una forma radial, o de estría longitudinales, que parte de la ZPF hacia el perímetro de la probeta atravesándola en toda su extensión. La ZPF se sitúa a lo largo de la entalla y muestra un color claro en contraste con el tono grisáceo de la ZI, distribuyéndose longitudinalmente a lo largo de la entalla y presentando una zona de profundidad máxima en la zona central de la misma (Fig. 3.73).

La primera textura que aparece al analizar la superficie de rotura de la probeta B0-A-1 (de arriba hacia abajo según las Figs. 3.73 y 3.74) es la CE o labio dúctil cortante, tal y como se puede ver en la imagen de la Fig. 3.74. La corona presenta un espesor pequeño, del orden de 5  $\mu\text{m}$ , y muestra una textura homogénea si se compara con la superficie colindante, la denominada zona intermedia ZI, gobernada en su práctica totalidad por el clivaje.

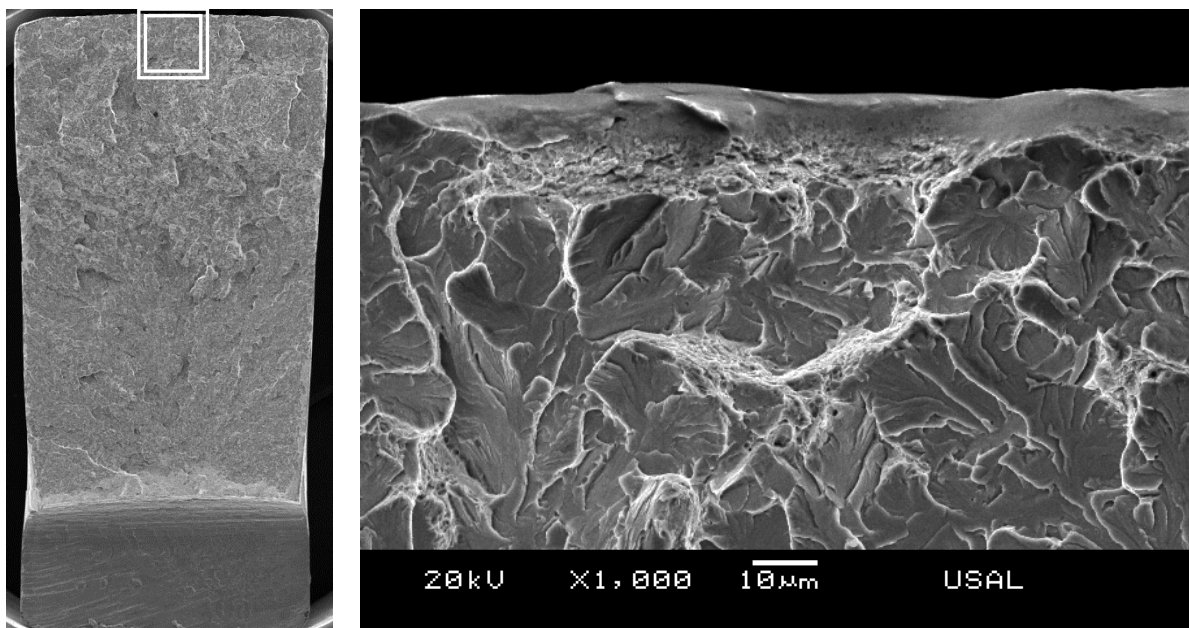


Fig. 3.74. Fractografía correspondiente al del borde superior de la superficie de fractura (lado contrario a la entalla) de la probeta B0-A-1.

Aunque la ZI se encuentra gobernada prácticamente por el clivaje se pueden encontrar pequeñas zonas de microhuecos embebidas en el mismo. Un análisis más minucioso indica la presencia de microhuecos distribuidos a lo largo de la superficie de clivaje como el que se encuentra representado en la Fig. 3.75. Se trata de un microhueco prácticamente esférico de pequeño tamaño y con un diámetro aproximado de 1  $\mu\text{m}$ . Dentro de la superficie de clivaje se



ha encontrado otro tipo de microhuevo, cuya recreación tridimensional aparece representada en la Fig. 3.76, éste presenta una geometría mayormente longitudinal y aparece de forma intersticial entre las crestas del clivaje.

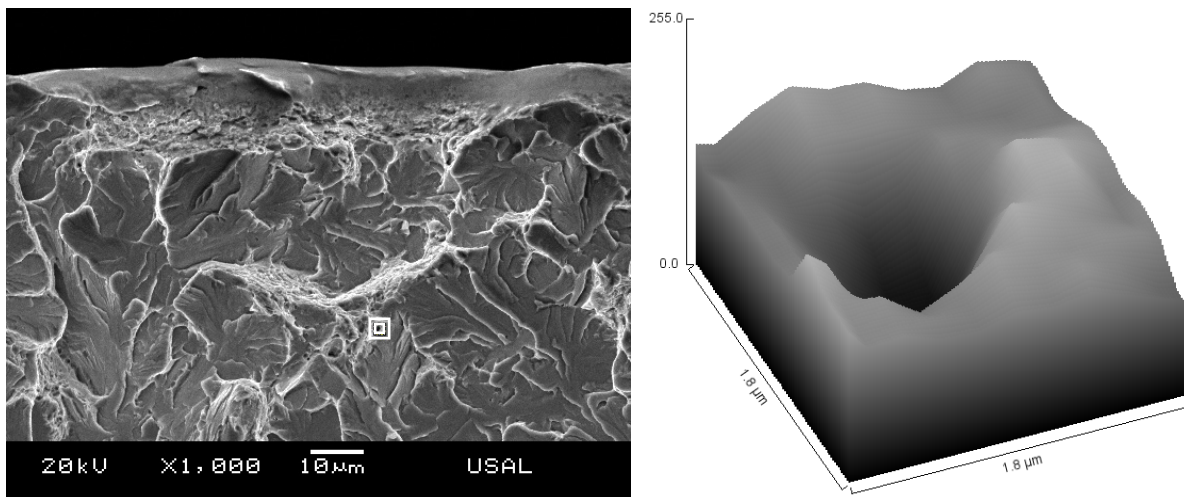


Fig. 3.75. Recreación tridimensional de un microhuevo inmerso en la superficie de fractura por clivaje (probeta B0-A-1).

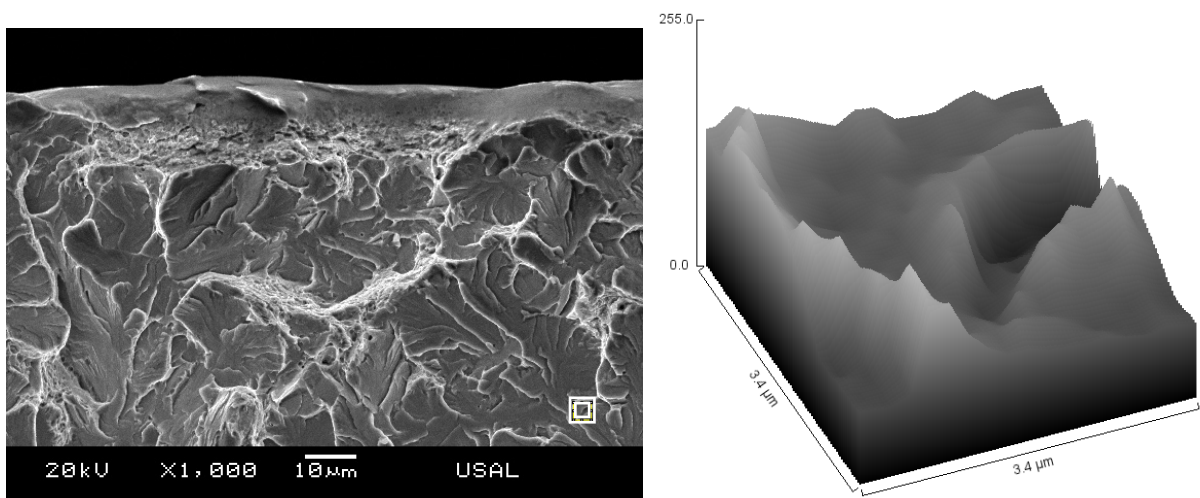


Fig. 3.76. Recreación tridimensional de un microhuevo inmerso en la superficie de fractura por clivaje (probeta B0-A-1).

Llegando a la entalla aparece la frontera entre la ZPF y la ZI formada por clivaje (Fig. 3.77). En esta zona se observa la presencia de una textura diferente inmersa entre la superficie de fractura por CMH\*. Se trata de una colonia perlítica que se ha despegado de su vecina a través del límite de colonia ó, con más seguridad, a través del límite de grano austenítico previo (Fig. 3.78), siendo esto una fractura típica dentro de la ZPF. En la imagen de la Fig. 3.79 se presenta una ampliación de la textura de esta zona.

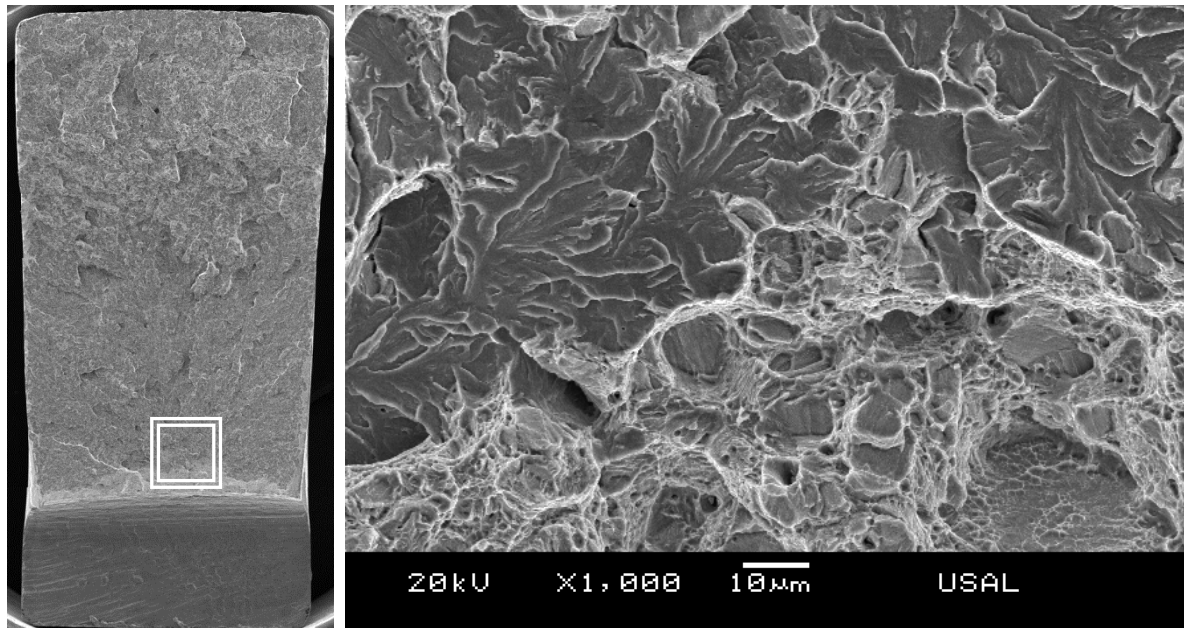


Fig. 3.77. Micro-fractografía correspondiente a la zona frontera de la ZI con la ZPF (B0-A-1).

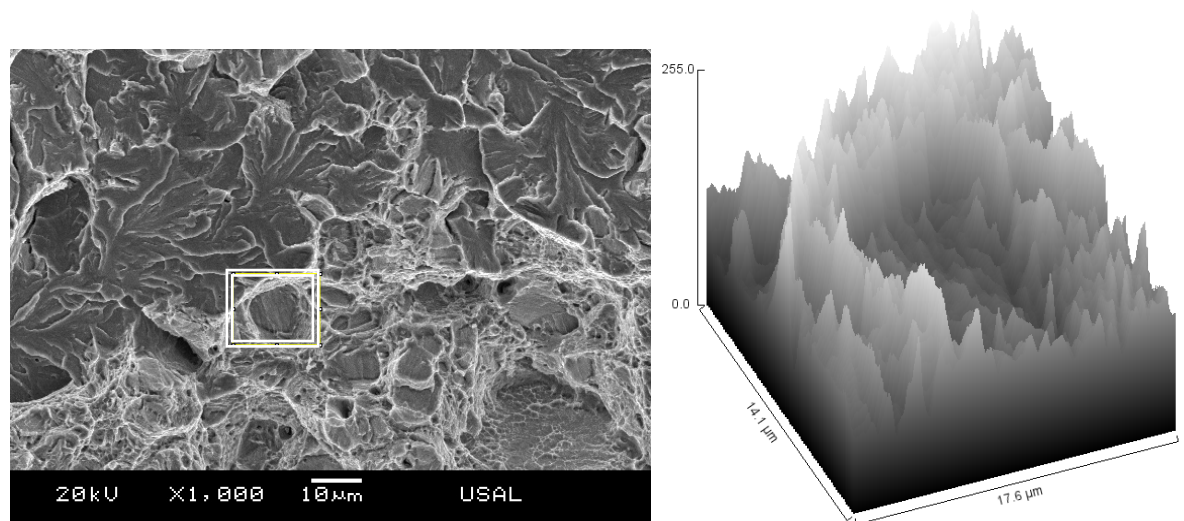


Fig. 3.78. Recreación tridimensional de la frontera comprendida entre el clivaje y la ZPF.

En la ZPF se observa un aumento significativo en el número de los microhuecos presentes. El tamaño y la forma geométrica de los mismos son diversos, como aparece reflejado en las imágenes de las Figs. 3.80 y 3.81. En la Fig. 3.80 se presenta un microhuevo de geometría alargada, aunque curvada, con una longitud aproximada de  $4.7 \mu\text{m}$ , inmerso en un entorno marcadamente irregular. La Fig. 3.81 muestra un microhuevo de forma geométrica más circular, sin embargo, de menor dimensión que el anterior, con un tamaño próximo a las  $3 \mu\text{m}$ . El entorno en el que se encuentra inmerso, como en el caso anterior, es marcadamente irregular. Para concluir el análisis de la fractografía de la muestra B0-A se presenta la Fig. 3.82, en la que se recoge una secuencia de fractografías correspondientes a las diferentes secciones que se presentan en la sección de rotura de la probeta B0-A-1.

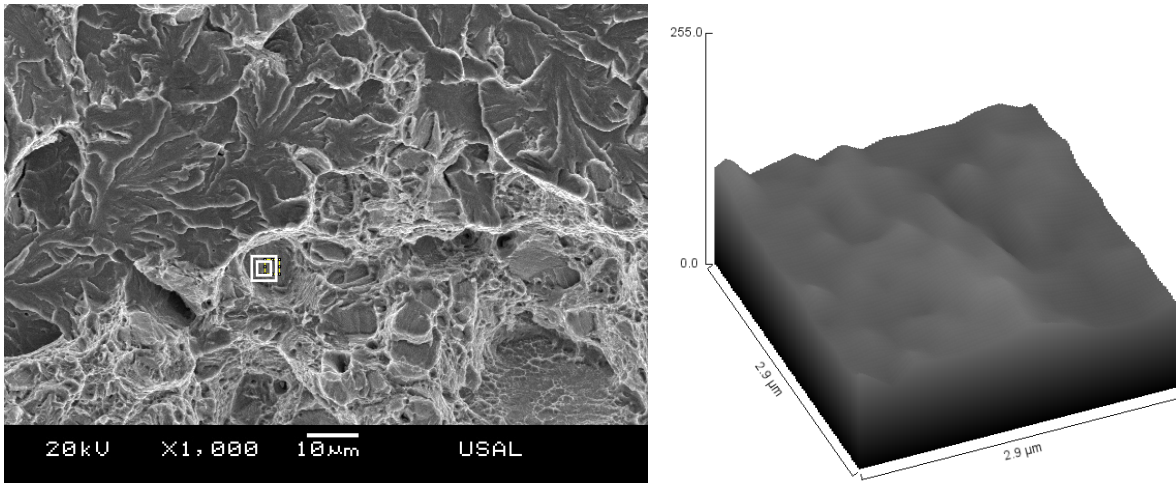


Fig. 3.79. Frontera entre la ZI y la ZPF; ampliación del detalle de la Fig. 3.78.

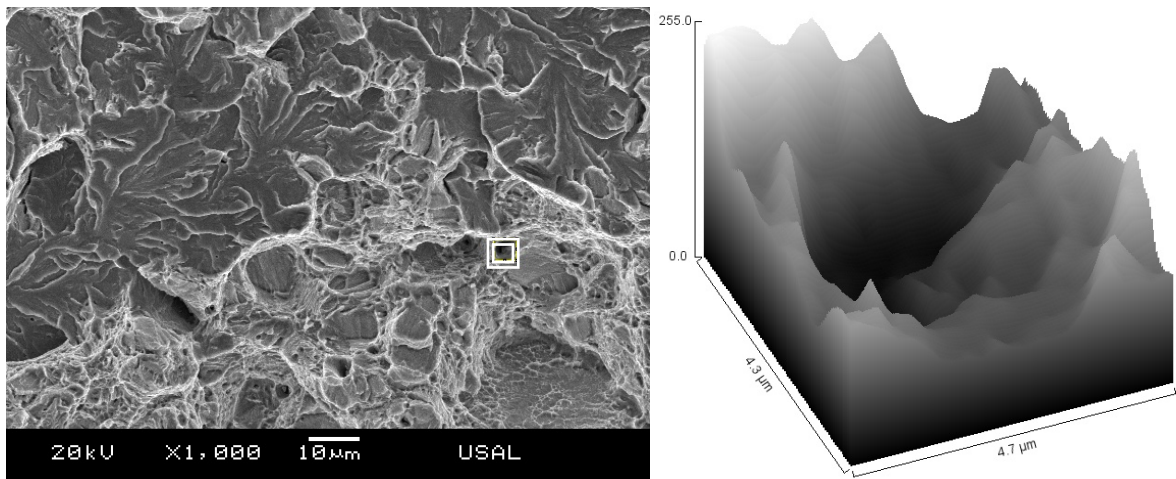


Fig. 3.80. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos insertos en la frontera ZPF.

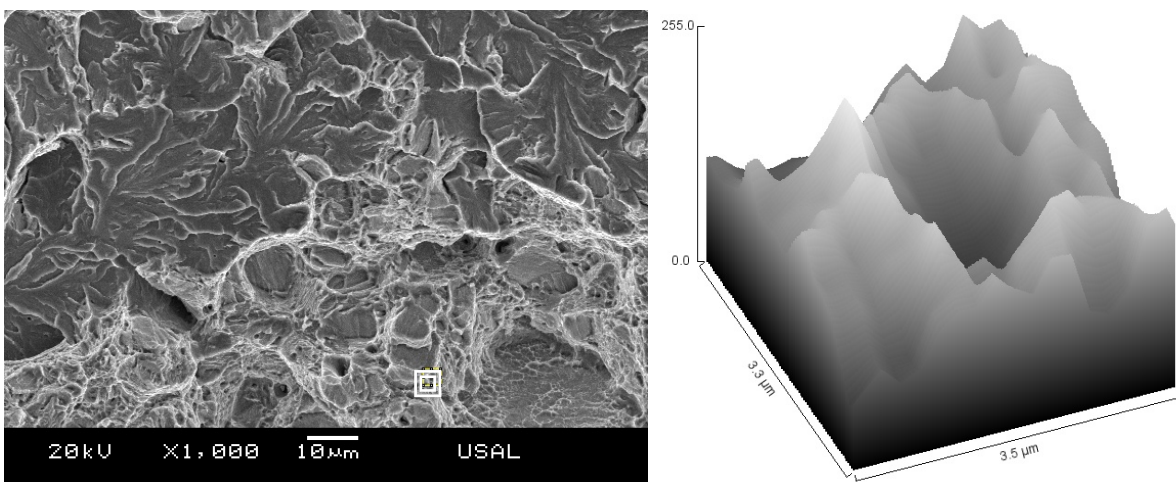


Fig. 3.81. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos insertos en la ZPF.

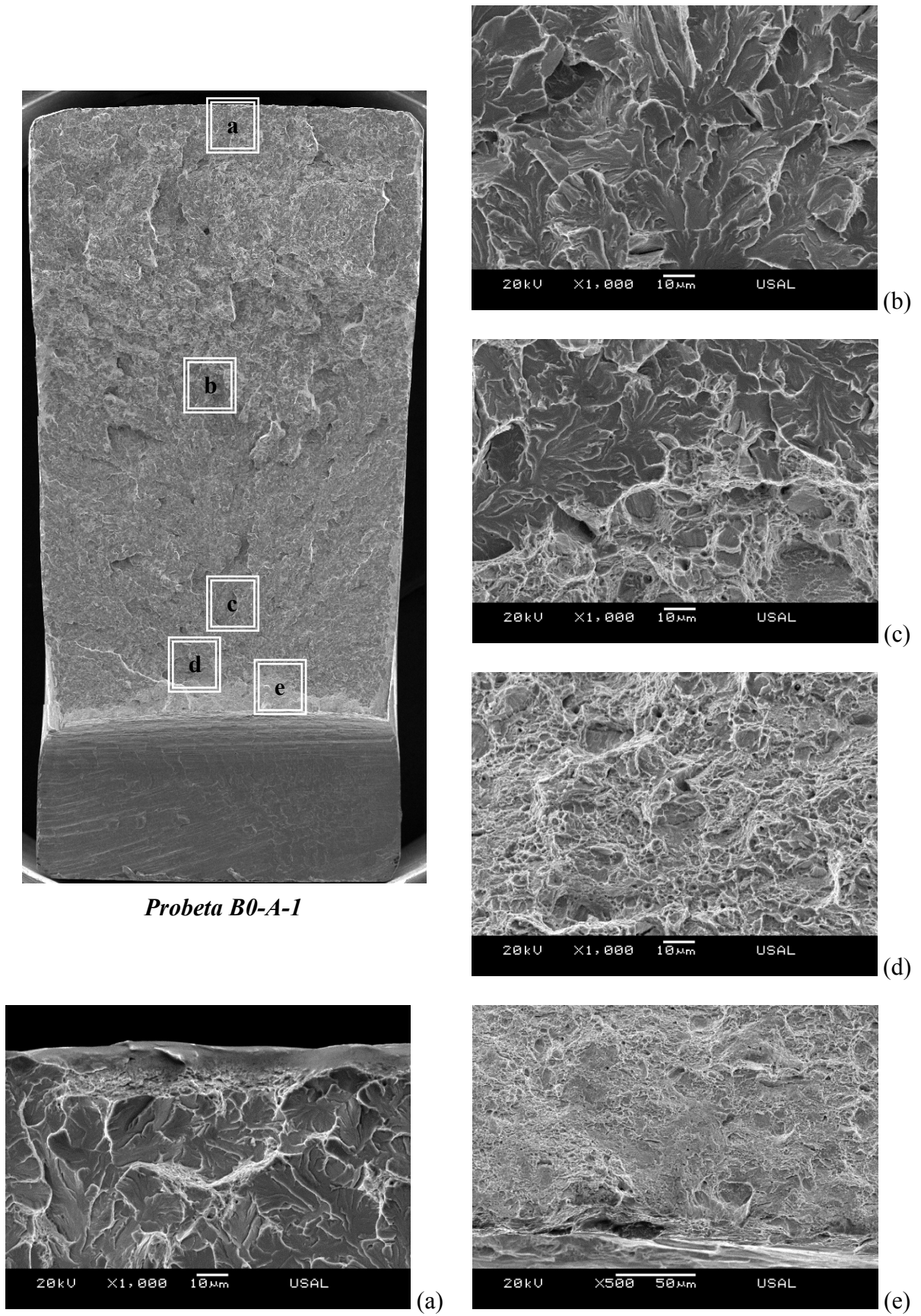


Fig. 3.82. Superficie de fractura de la probeta B0-A-1.

### 3.2. Análisis fractográfico de la muestra B4-A

Las probetas de acero B4 con entalla tipo A (B4-A) exhiben un comportamiento bastante semejante al que presentaban aquellas mecanizadas a partir del alambre (B0-A). La forma geométrica de la sección de rotura es más acusada, observándose una disminución gradual de la anchura al llegar a la zona de la entalla; sin embargo, al contrario de lo que sucedía en la muestra B0-C, la muestra B0-A no presenta una disminución lineal, sino que, la disminución se observa a partir de un tercio de las probetas que conforman la terna. El ángulo que acusan va desde  $2.18^\circ$  en la probeta B4-A-1 a  $4.49^\circ$  en la probeta B4-A-2. A modo de ejemplo considérese la probeta B4-A-2, representativa de la terna B4-A, de la Fig. 3.83.

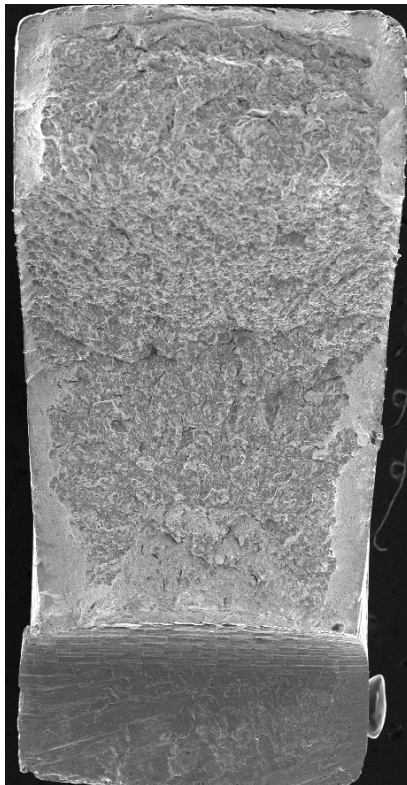


Fig. 3.83. Superficie de fractura de la probeta B4-A-2.

En cuanto a las distintas zonas características de la superficie de fractura se ha medido que la CE presenta una extensión más amplia que la que se presentaba en la muestra obtenida a partir del alambre (B0-A). Para la muestra B4-A el área porcentual de CE oscila entre el 15% en la probeta B4-A-3 y el 23% en la B4-A-1. En cuanto a la ZI ésta abarca entre un 68% y un 81% en las probetas B4-A-1 y B4-A-3 respectivamente, experimentando una disminución considerable respecto las probetas B0-A. Con relación a la ZPF ésta se encuentra situada en la zona central de la entalla, presenta una forma geométrica redondeada como puede verse en la Fig. 3.83. Para el caso de la muestra B4-A, la ZPF ocupa aproximadamente el 7% de la superficie total de fractura.

La superficie de fractura de la probeta B4-A-2, representativa de la muestra B4-A, presenta una apariencia ligeramente diferente de la de la muestra B0-A, *i.e.*, la presencia clara de una corona exterior, ésta se presenta bordeando toda la superficie de fractura presentando microhuecos dispersos homogéneamente a lo largo de la misma (Fig. 3.84). En la imagen derecha de la Fig. 3.85 se presenta la recreación de uno de los microhuecos inmersos en la corona exterior. Se trata éste, de un microhueco de pequeño tamaño con una forma geométrica próxima a la esférica y cuyo diámetro se sitúa próximo a las 2.5  $\mu\text{m}$ .

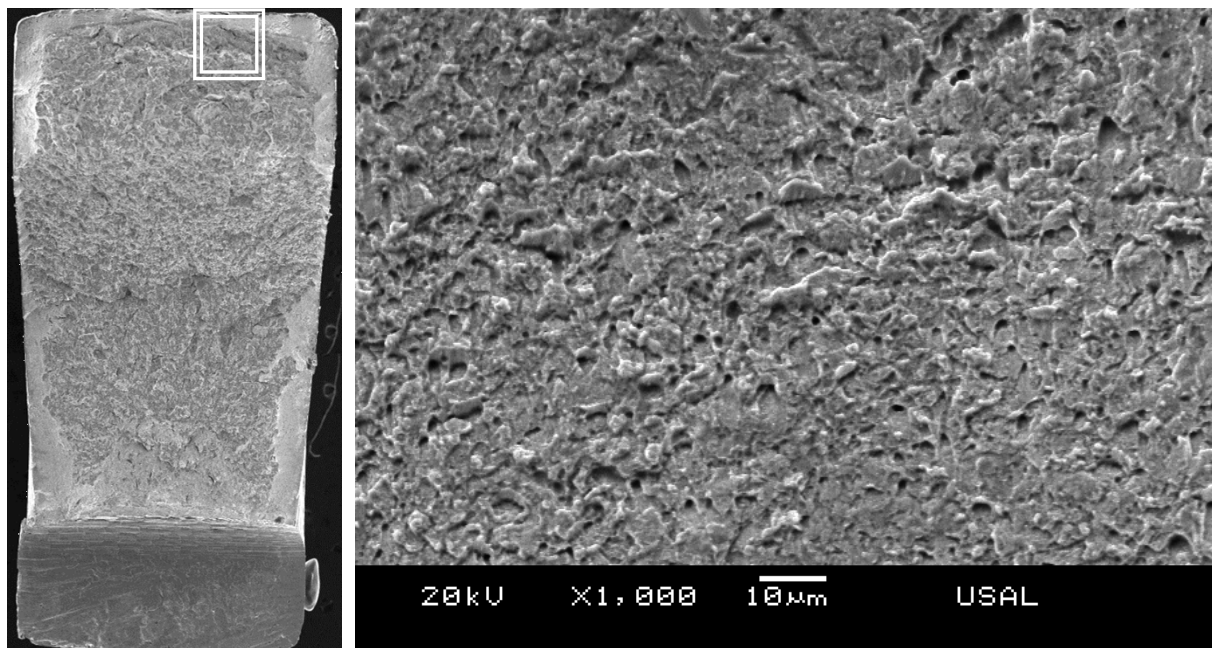


Fig. 3.84. Fractografía correspondiente a la CE de la probeta B4-A-2.

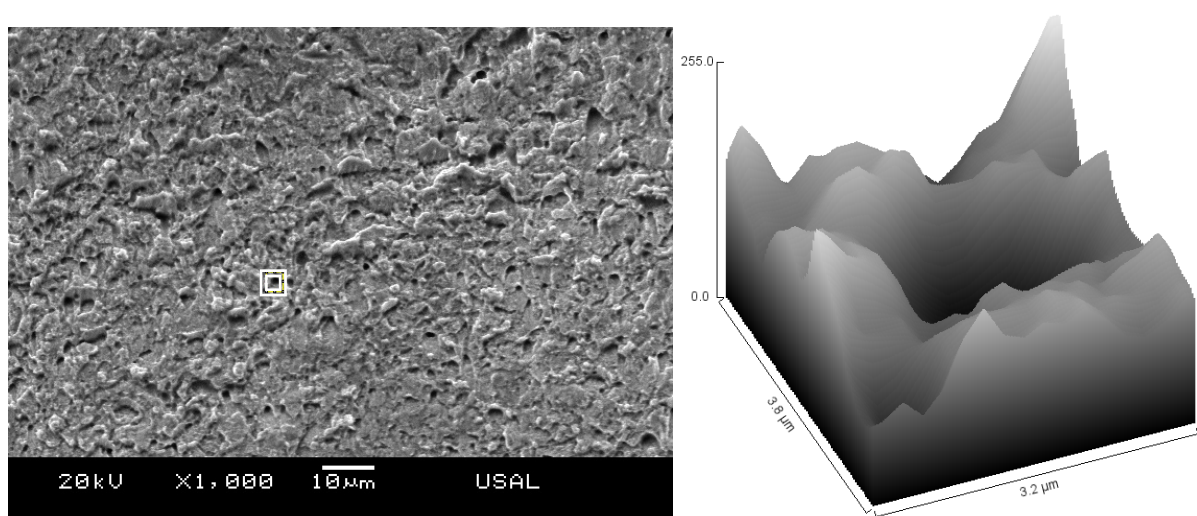


Fig. 3.85. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos en la CE de la probeta B4-A-2.

A medida que se desciende a través de la superficie de fractura (según la imagen mostrada) aparece el clivaje como micromecanismo básico de fractura denotando la ZI. Éste se presenta en diferentes planos dejando una imagen característica de la zona (Fig. 3.86). La presencia de diferentes planos de clivaje conlleva una textura de la zona altamente irregular. En aquellas zonas que son de mayor irregularidad también aparece la presencia de CMH y microfisuras, siendo que éstas últimas se manifiestan en general con geometría alargada y curva. En la imagen representada en la Fig. 3.87 se muestra la zona circundante a una de estas microfisuras, en ella se exhibe una zona de encuentro de planos de clivaje los cuáles se muestran formando ángulos de intersección próximos a los  $90^\circ$ .

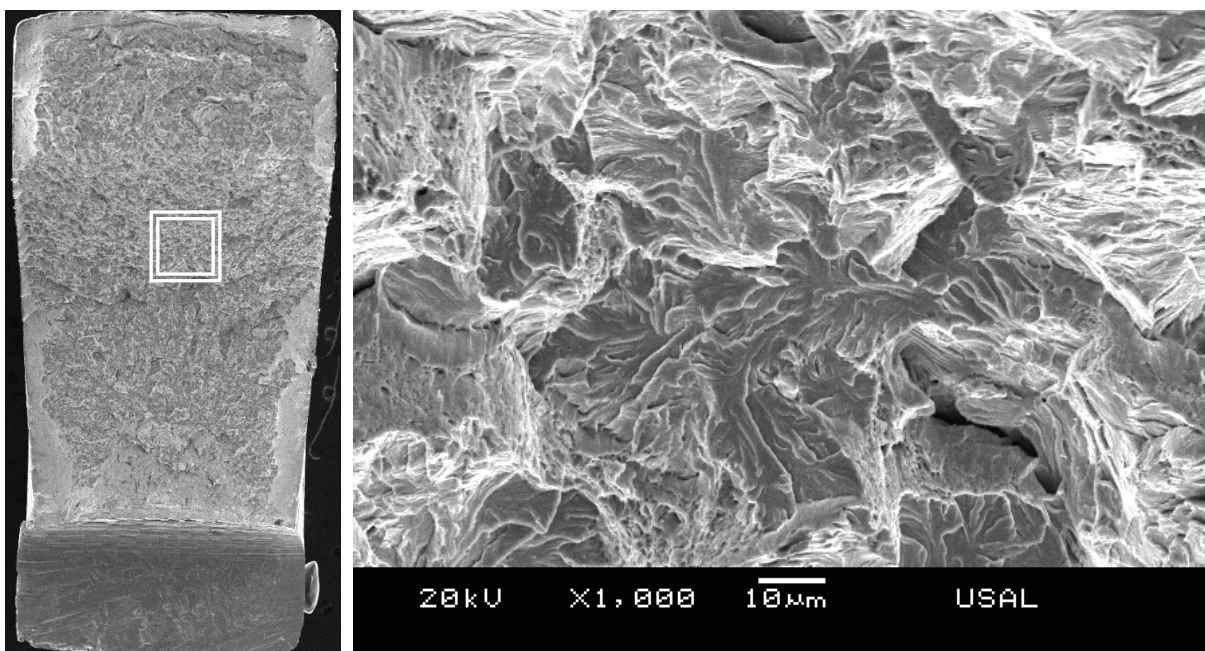


Fig. 3.86. Fractografía de la ZI en la probeta B4-A-2.

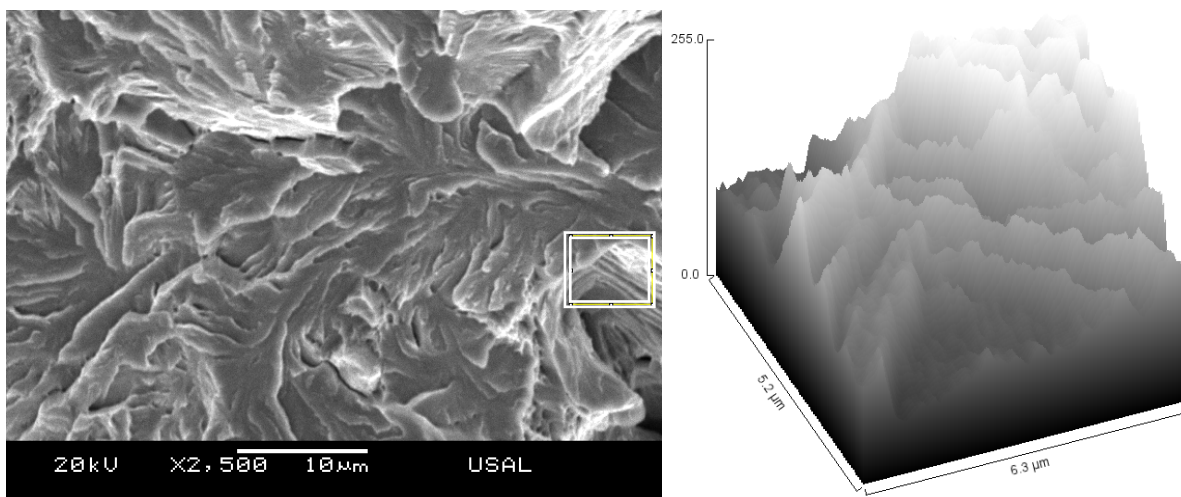


Fig. 3.87. Recreación tridimensional de uno de los encuentros entre planos de clivaje.

En la Fig. 3.88 se presenta la textura de una zona de las zonas de encuentro de fractura por clivaje en diferentes planos. La imagen muestra la intersección de un clivaje que se presenta en el plano de entalla con clivajes que se encuentran en el plano perpendicular a la entalla formando lo que en topografía se conoce como *cortados*.

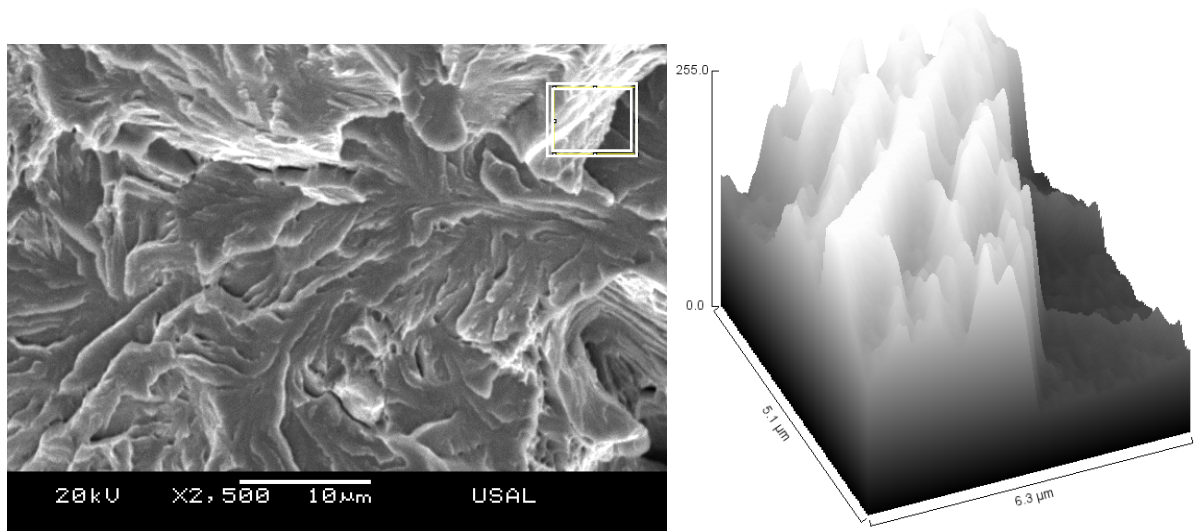


Fig. 3.88. Recreación tridimensional de la intersección, en la ZI, de dos planos de clivaje.

La intersección de los diferentes planos de clivaje enmarca una textura, como se ha observado anteriormente, abrupta y cambiante, con pequeñas microfisuras localizadas en estas zonas de cambios bruscos y que se distribuyen a lo largo de toda la superficie de fractura de la probeta. En la Fig. 3.89 se muestra una de estas microfisuras dentro de la zona intermedia ZI, la microfisura se localiza en la zona de encuentro de clivajes en diferentes planos y posee una longitud aproximada de 5.5 µm.

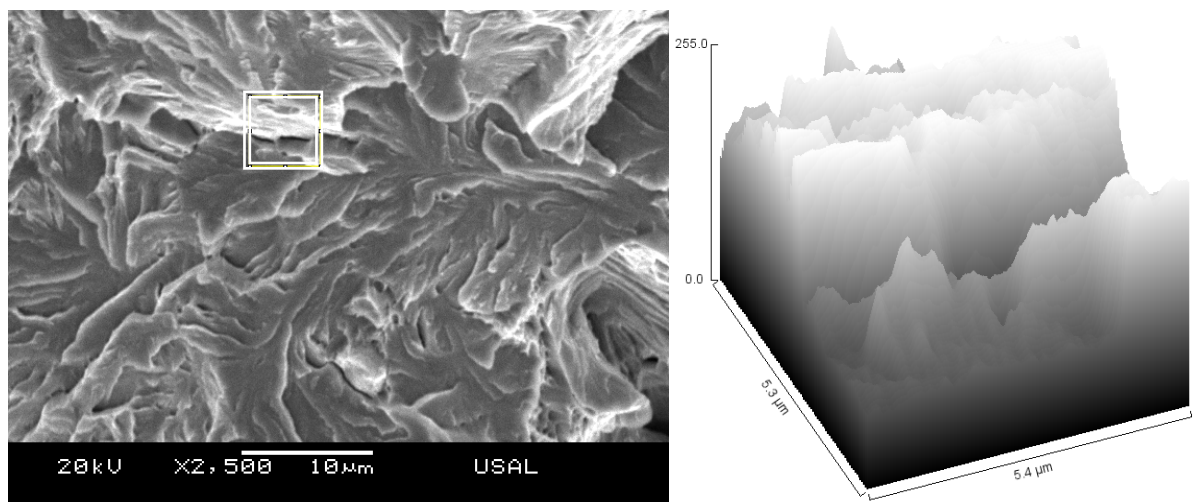


Fig. 3.89. Recreación tridimensional de una microfisura inserta entre dos facetas de fractura por clivaje, probeta B4-A-2.



La ZPF presenta microhuecos y microfisuras que se distribuyen a lo largo de toda ella, presenta además pequeñas zonas de fractura por clivaje. En la imagen dcha. de la Fig. 3.90 se pueden observar algunas microfisuras de gran tamaño situadas inmersas en zonas de fractura por clivaje, algunas de las cuales alcanzan más de  $26\ \mu\text{m}$  de longitud, como la que se muestra en la zona inferior izquierda de la imagen. En la parte dcha. de la Fig. 3.91 se presenta uno de los microhuecos inmerso en la ZPF, se trata de un microhueco profundo con una forma geométrica próxima a la circular y de paredes internas regulares.

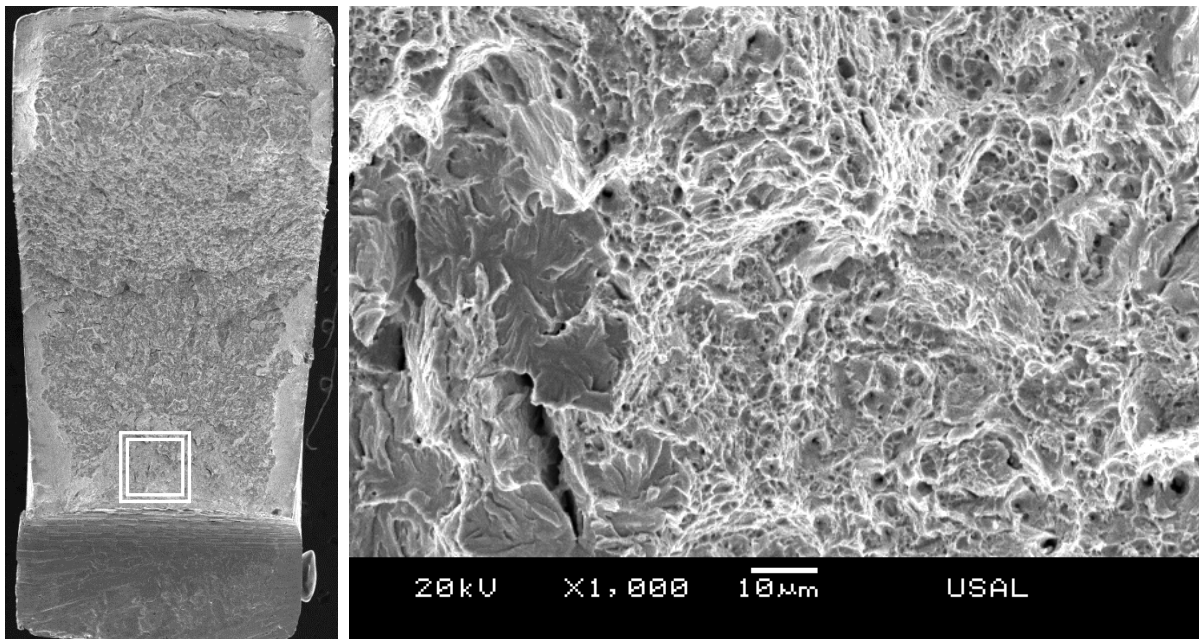


Fig. 3.90. Micro-fractografía a 1000 aumentos de la ZPF de la probeta B4-A-2.

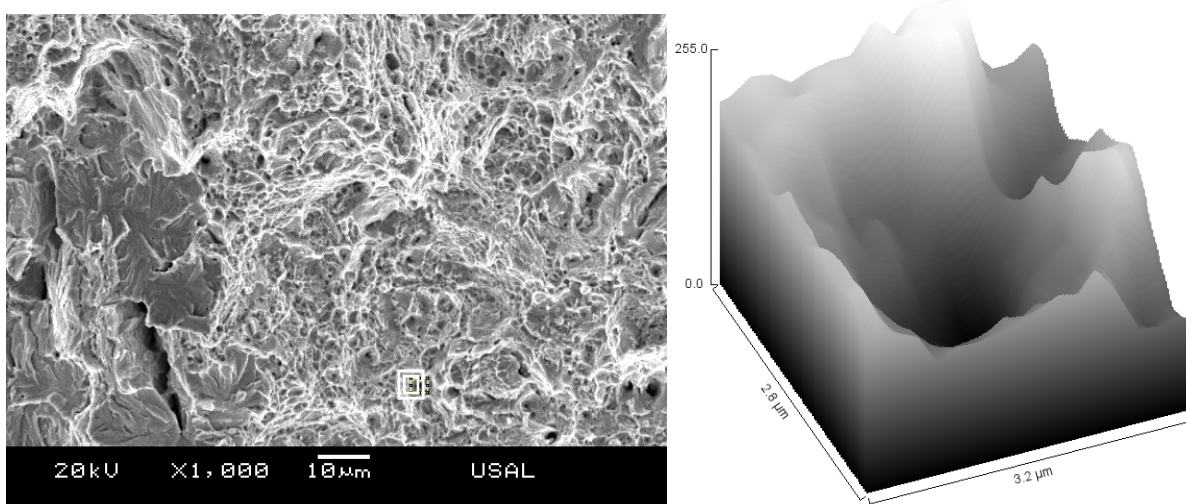


Fig. 3.91. Recreación tridimensional de un microhueco de la ZPF (probeta B4-A-2).

En la Fig. 3.92 se recoge, a modo de resumen, una secuencia de micro-fractografías correspondientes a la sección de rotura que presenta la probeta B4-A-2.

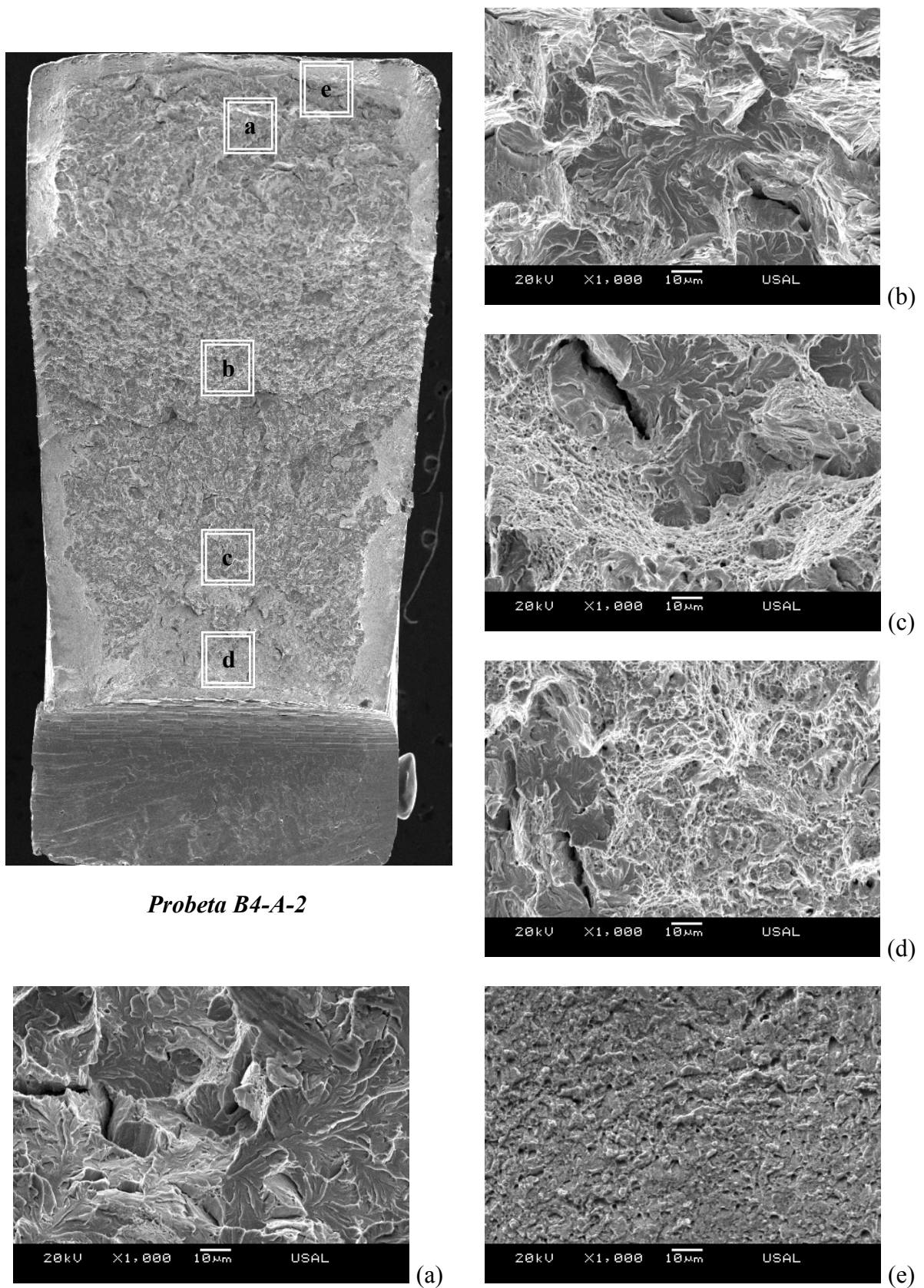


Fig. 3.92. Secuencia de fractografías de la probeta B4-A-2.

### 3.3. Análisis fractográfico de la muestra B7-A

Las tres probetas que conforman la muestra B7-A muestran una superficie de fractura muy similar entre ellas. La sección de rotura se caracteriza por una ligera contracción lineal de la anchura de la misma, de modo que la entalla presenta un ancho sensiblemente menor que en la sección superior. Esto hace que se establezca un ángulo entre ambas secciones de  $3.55^\circ$  para la probeta B0-A-1, de  $1.87^\circ$  en la probeta B2 y  $4.23^\circ$  en la probeta B0-A-3.

En cuanto a las zonas de fractura se observa que, en todas ellas, la ZI domina la mayor parte de sección de rotura de la probeta con porcentajes que van desde el 79% en la probeta B0-A-2 al 87% en la probeta B7-A-3. La ZI se encuentra marcada por la presencia de fisuras que se extienden radialmente desde la ZPF hacia el perímetro de la probeta. La CE sigue en porcentaje de ocupación a la ZI con proporciones que oscilan entre el 8% para la probeta B7-A-1 y el 17% para la probeta B7-A-2; la CE se extiende a lo largo del perímetro de la probeta y en algunos puntos es apenas perceptible como por ejemplo en el margen izquierdo de la probeta B7-A-2 (ver Anexo Fractografía). La ZPF se extiende en la superficie restante y en todos los casos observados se ha situado en la zona central de la entalla. Una imagen visual de la superficie de rotura de la probeta B7-A-3 (probeta representativa de la terna) indica que se trata de una fractura anisótropa marcada por la presencia de surcos que se encuentran distribuidos a lo largo de toda la superficie de fractura y especialmente a lo largo de la ZI (véase la Fig. 3.93).

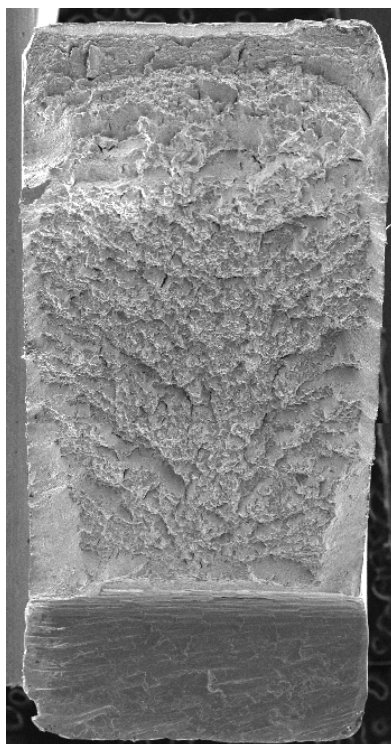


Fig. 3.93. Superficie de fractura de la probeta B7-A-3.

La fractografía que presenta la sección superior de la probeta indica la presencia de CMH en la corona exterior, se trata de una CE heterogénea, texturalmente hablando, ya que está marcada por la presencia de fisuras además de los microhuecos característicos de la misma. En la imagen derecha de la Fig. 3.94 se puede observar la presencia de una fisura que se extiende longitudinalmente a lo largo de toda la sección transversal. Con el fin de analizar una parte de la fisura longitudinal, se recrea en la imagen derecha de la Fig. 3.95 uno de los microhuecos inmersos dentro de esta fisura. El microhueco posee sección circular con un tamaño aproximado de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro. Las paredes internas, así como el entorno circundante, son altamente irregulares.

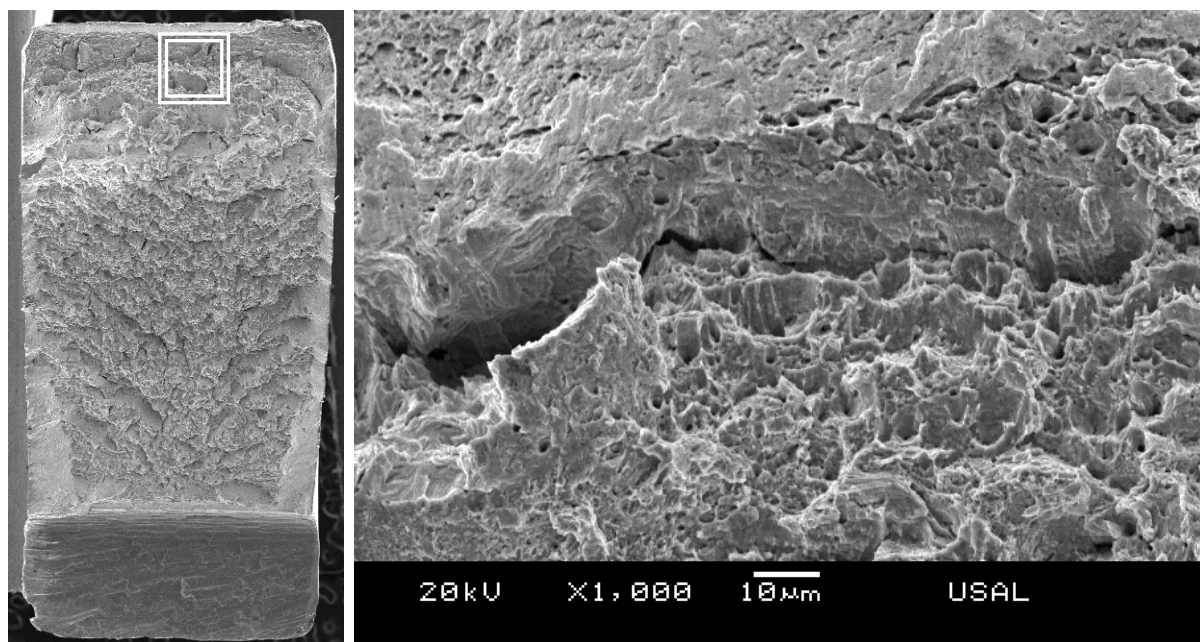


Fig. 3.94. Imagen de detalle de la CE de la probeta B7-A-3.

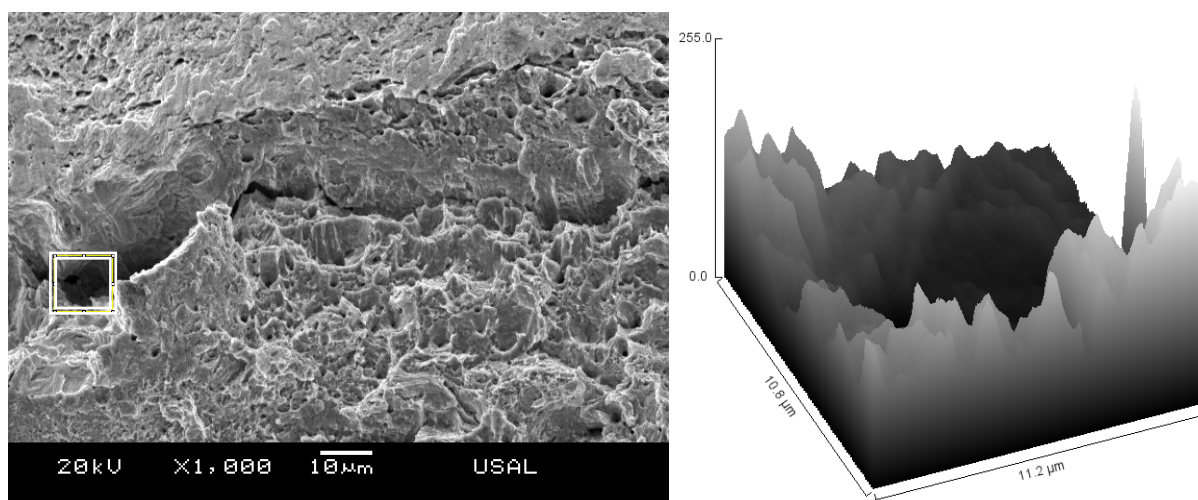


Fig. 3.95. Microhueco inmerso en una fisura dentro de la CE; probeta B7-A-3.

En la imagen derecha de la Fig. 3.96 se presenta uno de los microhuecos inmersos en la CE, presenta una forma geométrica aproximadamente esférica con un diámetro próximo a las 1.5  $\mu\text{m}$ . La textura que se observa en las paredes del mismo es suave en contraste con la textura abrupta encontrada en el microhueco inmerso en la fisura (Fig. 3.95).

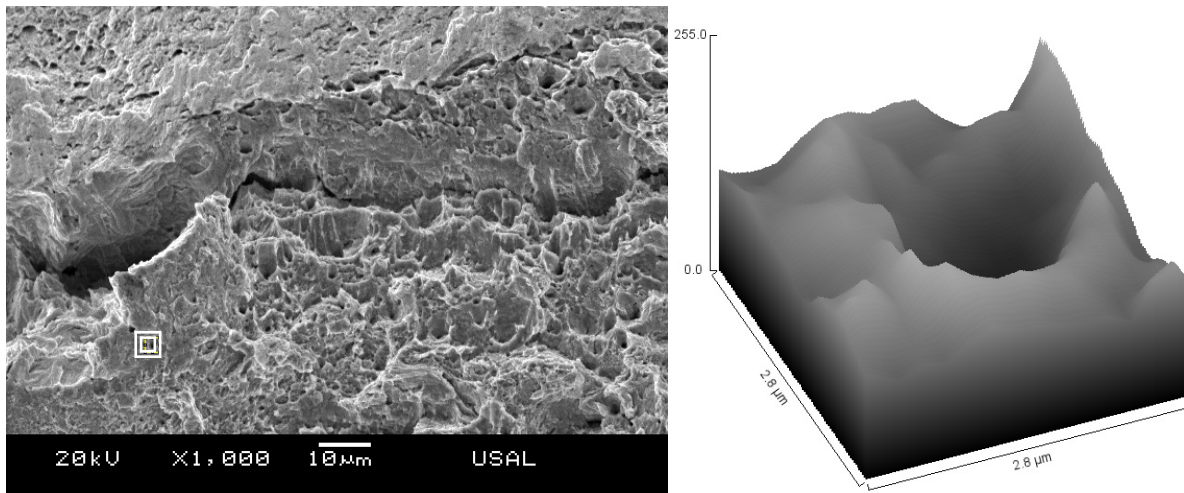


Fig. 3.96. Detalle de microhueco inmerso en la CE de la probeta B7-A-3.

A medida que se desciende a través de la sección la microestructura cambia, pasando a una zona que presenta abundantes microfisuras inmersas dentro de una fractografía híbrida de CMH y clivaje, *i.e.*, la zona intermedia ZI. Las fisuras presentan diversidad de tamaño llegando a observar fisuras de longitudes que oscilan entre 1 y 41.71  $\mu\text{m}$  (Fig. 3.97).

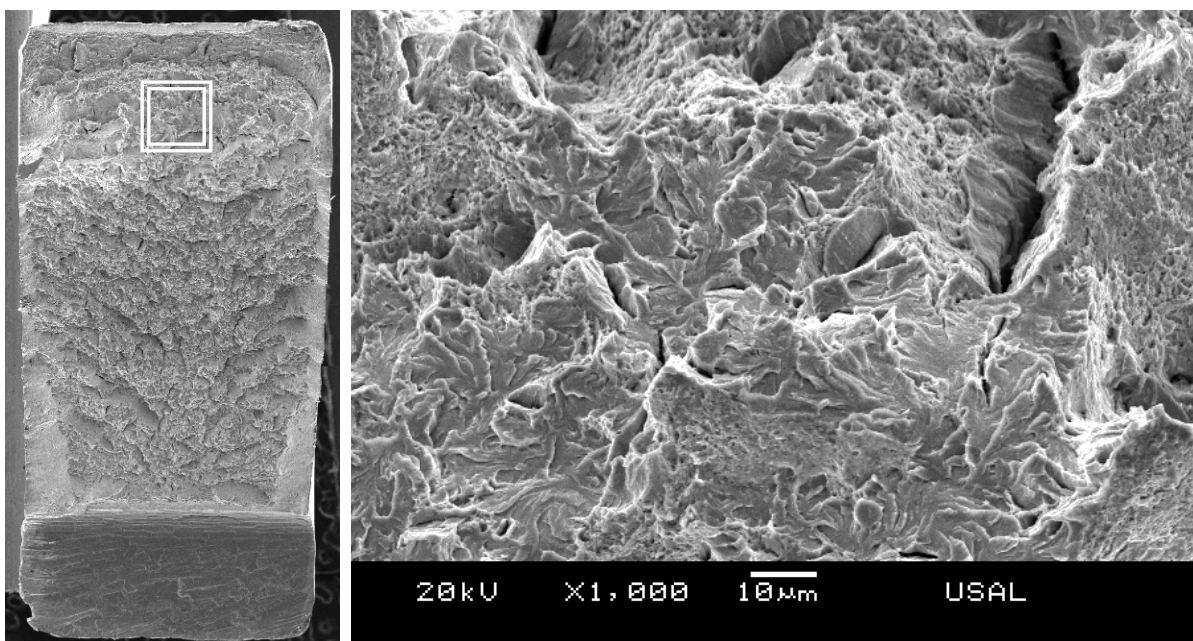


Fig. 3.97. Detalle de la fractografía híbrida CMH-clivaje; probeta B7-A-3.

La zona central de la superficie de fractura (zona central de la zona intermedia) se encuentra constituida también por una mezcla híbrida de clivaje y CMH, como se puede ver en la imagen derecha de la Fig. 3.98. En la misma se observa que prácticamente la parte superior de la diagonal está formada por clivaje, mientras que la zona situada bajo la diagonal se encuentra formada por una textura totalmente diferente a la del clivaje, en la que se observa una superficie de fractura con presencia extendida de microhuecos o CMH.

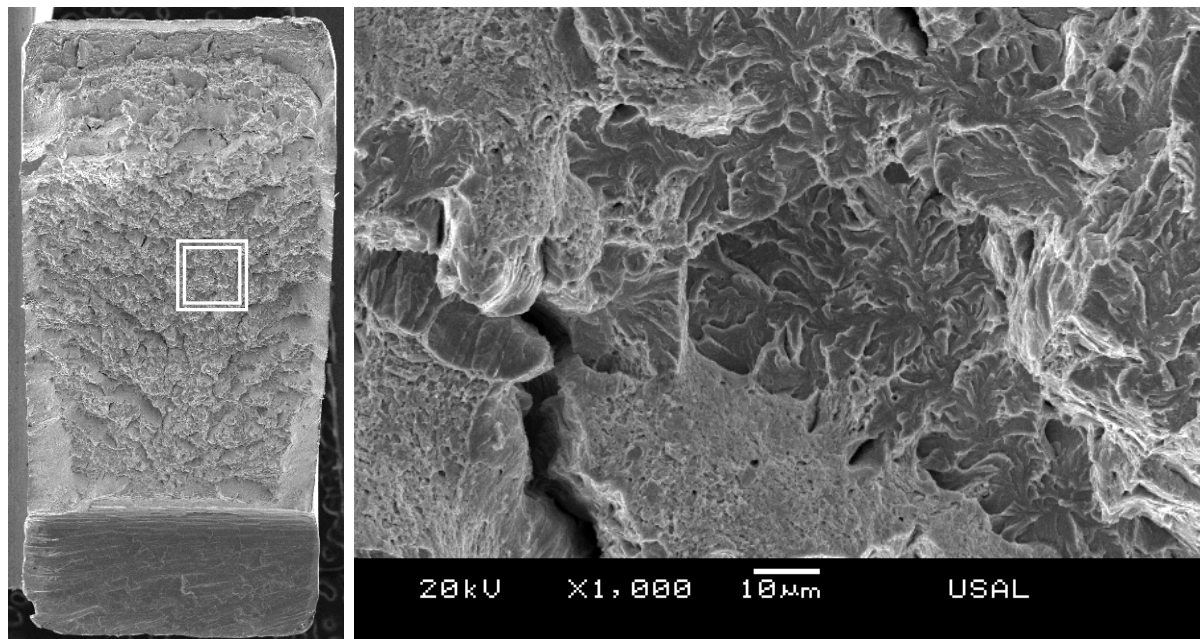


Fig. 3.98. Fractografía de la zona central de la probeta B7-A-3.

A medida que la fractografía se acerca a la ZPF se va invirtiendo el porcentaje representativo de los micromecanismos de fractura. La presencia de fractura por clivaje se ve reemplazado, dando lugar a una distribución formada prácticamente en su totalidad por la presencia de CMH\*, en los que se puede advertir algún punto de clivajes aislados (Fig. 3.99). A lo largo de esta sección se disponen microfisuras cuyas paredes se encuentran constituidas por clivajes, como se puede percibir en la imagen derecha de la Fig. 3.99.

La fractografía del perfil de la probeta fracturada se presenta en la imagen de la Fig. 3.100, se caracteriza por la presencia de microfisuras que se distribuyen a lo largo de la práctica totalidad de su superficie (anisotropía en fractura). El micromecanismo básico de fractura, como se puede apreciar en la imagen derecha de la Fig. 3.100, es el clivaje.

Para concluir el análisis de la fractografía de la muestra B7-A se presenta la Fig. 3.101, en la que se recoge una secuencia de micro-fractografías en las que se realiza un recorrido a través de las diferentes secciones que se presentan en la superficie de fractura de la probeta B7-A-3.

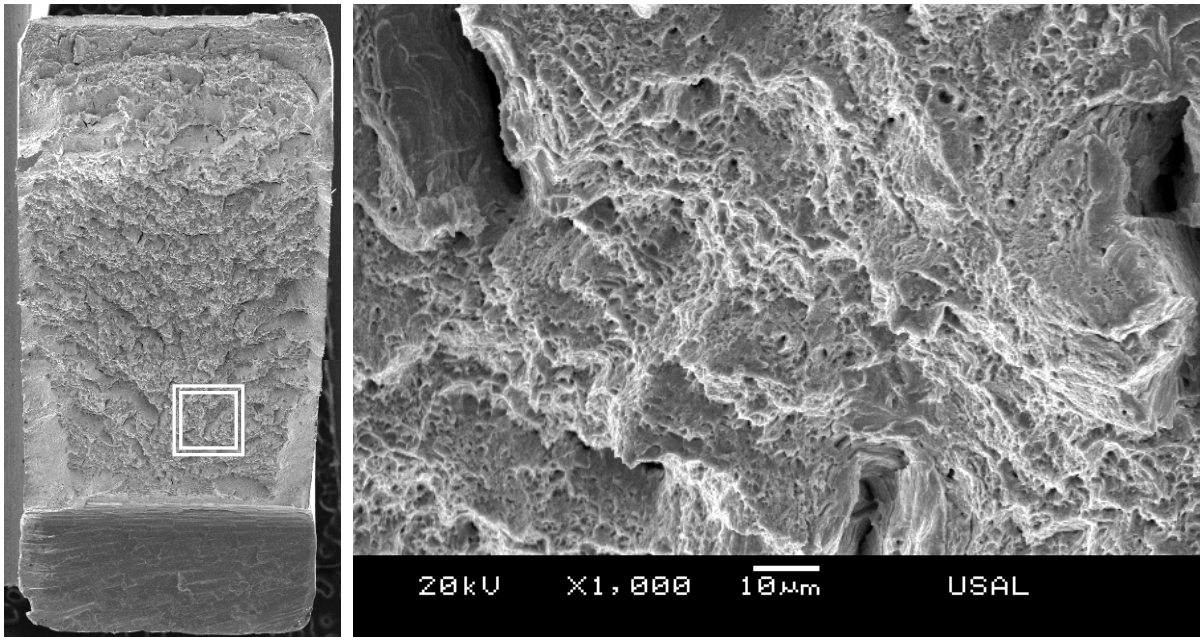


Fig. 3.99. Imagen correspondiente a la ZPF de la probeta B7-A-3.

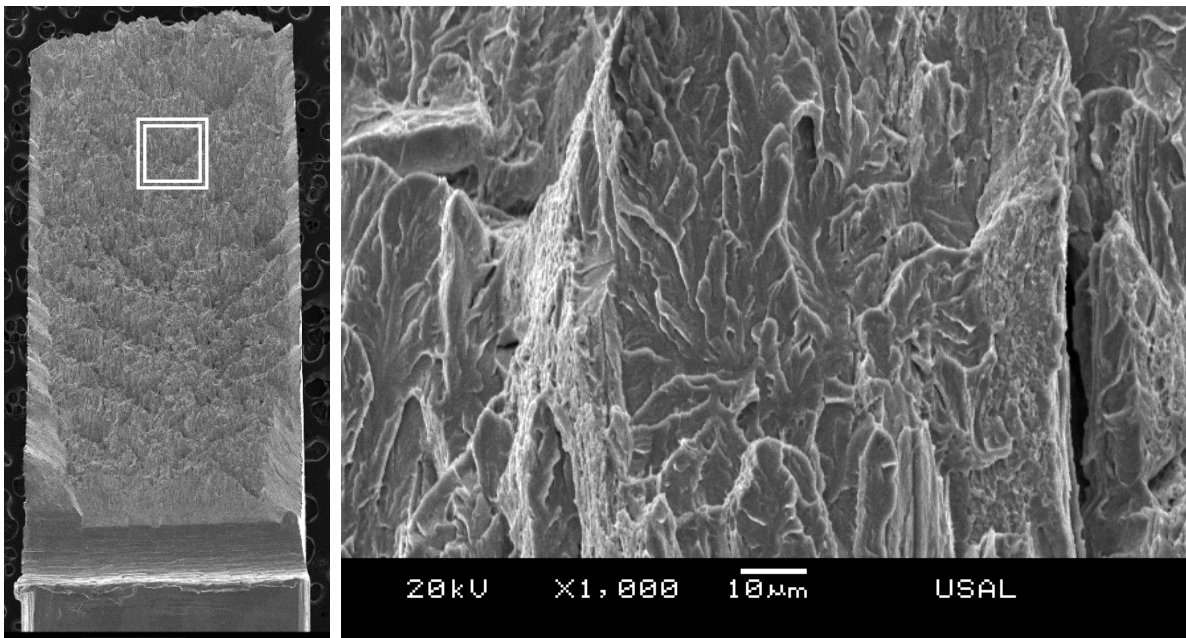
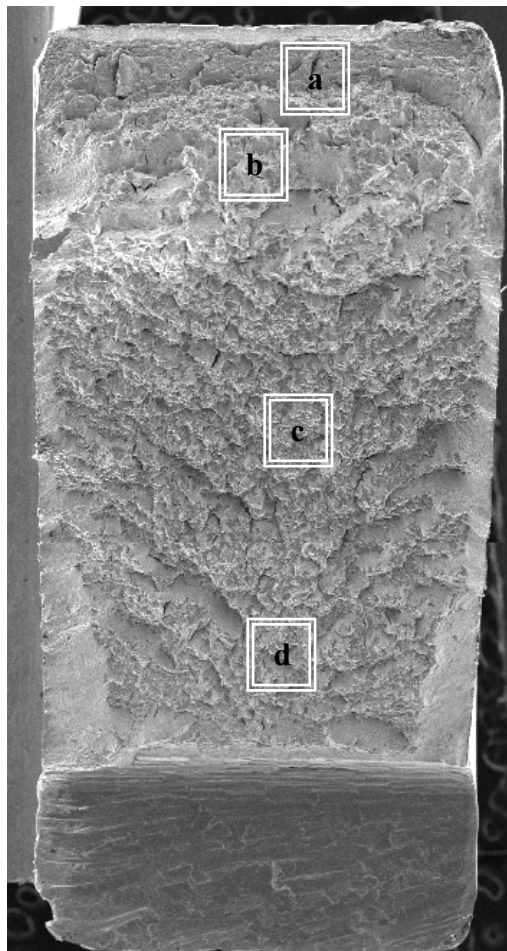
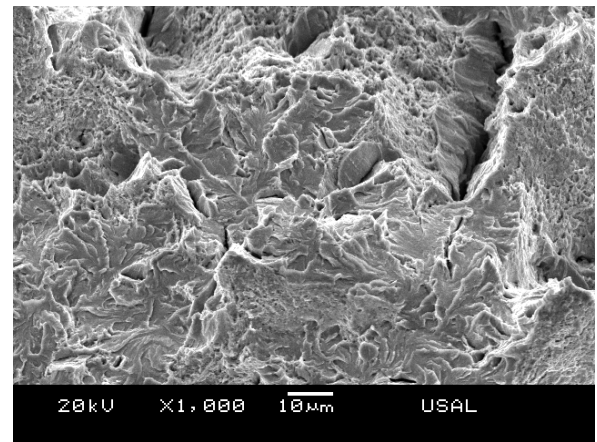


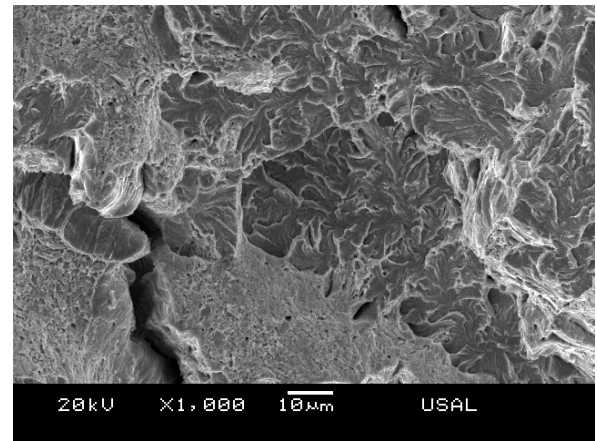
Fig. 3.100. Fractura por clivaje correspondiente al perfil de la probeta B7-A-3.



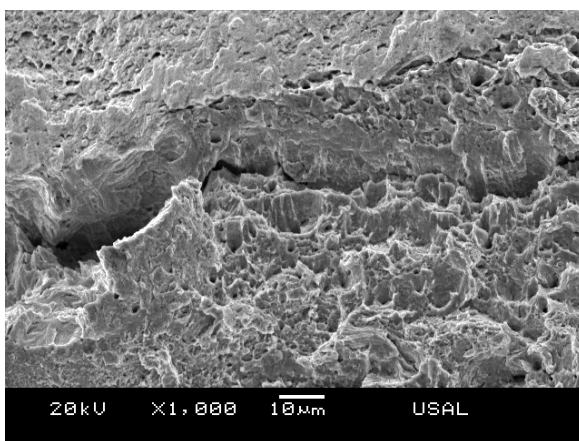
*Probeta B7-A-3*



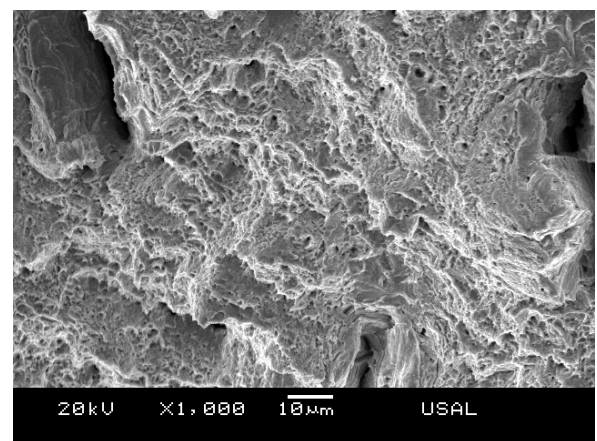
(b)



(c)



(a)



(d)

Fig. 3.101. Fractografía de la probeta B7-A-3.



### 3.4. Análisis fractográfico de la muestra B0-C

A diferencia de lo que sucedía con las probetas B0-A las probetas B0-C (entalla de gran radio de curvatura y pequeña profundidad) muestran un comportamiento sustancialmente diferente en cuanto a la fractografía se refiere (lo que se trata en este punto). Quizás el aspecto más llamativo sea la forma geométrica que ha adquirido la probeta, donde se observa una contracción elevada de la longitud en la entalla (Fig. 3.102). Se observa además una disminución lineal a lo largo de la longitud de la superficie de fractura presentando una angulosidad que oscila entre los  $4.80^\circ$  para la probeta B0-C-1 y de  $10.04^\circ$  para la B0-C-2.

La CE que muestran las probetas presentan valores que van desde el 4% de la superficie total de fractura para la probeta B0-C-2, hasta valores del 11.80% para la probeta B0-C-1. La ZI ocupa la mayor parte de la sección de rotura ostentando entre el 81% de la superficie total, hasta el 93% para la probeta B0-C-2. En la ZI se pueden apreciar surcos radiales que nacen en la ZPF y se dirigen hacia la periferia de la probeta. Dentro de la ZI se pueden apreciar, a nivel visual, dos zonas de diferente tonalidad: una más clara situada en el extremo opuesto a la entalla, que se extiende a lo largo de casi la mitad superior de la probeta, y una zona de tonalidad más oscura que se sitúa próxima a la ZPF. La ZPF se encuentra situada en la entalla, estando desplazada ligeramente del centro hacia la zona izquierda, como se puede ver en la imagen de la probeta representativa de la terna B0-C-2 en la Fig. 3.102.



Fig. 3.102. Superficie de fractura de la probeta B0-C-2.

La primera imagen que se presenta en el análisis fractográfico (Fig. 3.103) indica la presencia del labio dúctil que se encuentra enmarcando la zona intermedia. Presenta un ancho medido en planta de  $46.40\ \mu\text{m}$ , tomado éste en el punto medio de la fractografía. Está formada por microhuecos dispersos como el que se muestra en la Fig. 3.104. En la imagen tridimensional, se observa que se trata de un microhueco que presenta una geometría y un perfil interno marcadamente irregular, con unas dimensiones longitudinales próximas a las  $7\ \mu\text{m}$ .

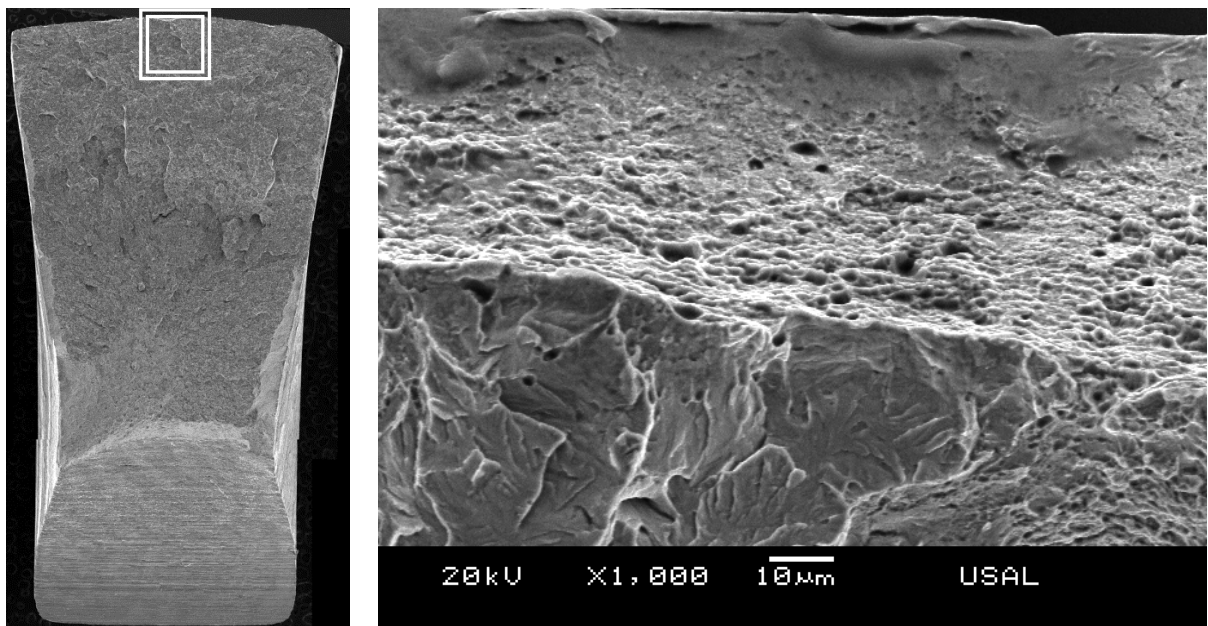


Fig. 3.103. Fractografía de la CE de la probeta B0-C-2.

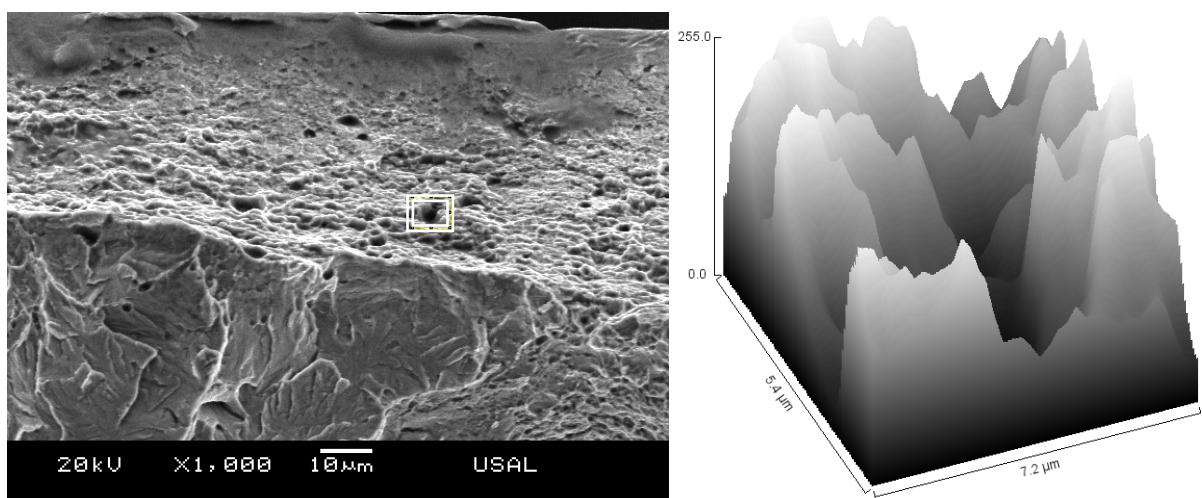


Fig. 3.104. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos dentro de la CE de la probeta B0-C-2.

Dentro de la superficie de fractura correspondiente a la zona intermedia, gobernada por el micromecanismo de fractura del clivaje, se puede observar la presencia de pequeños microhuecos que se encuentran dispersos a lo largo tanto de las facetas del clivaje, así como en los bordes de las mismas *crestas*. En la imagen de la Fig. 3.105 se presenta uno de estos microhuecos, con una geometría que se aproxima a la esférica con un diámetro próximo a las 3  $\mu\text{m}$ . La zona central de la probeta está formada por clivajes; sin embargo, a medida que se avanza hacia la entalla, se aprecia como el micromecanismo básico de fractura comienza a cambiar, ya que comienzan a aparecer, inmersos en la superficie de clivajes, pequeñas zonas de microhuecos, generando una textura marcadamente más irregular.

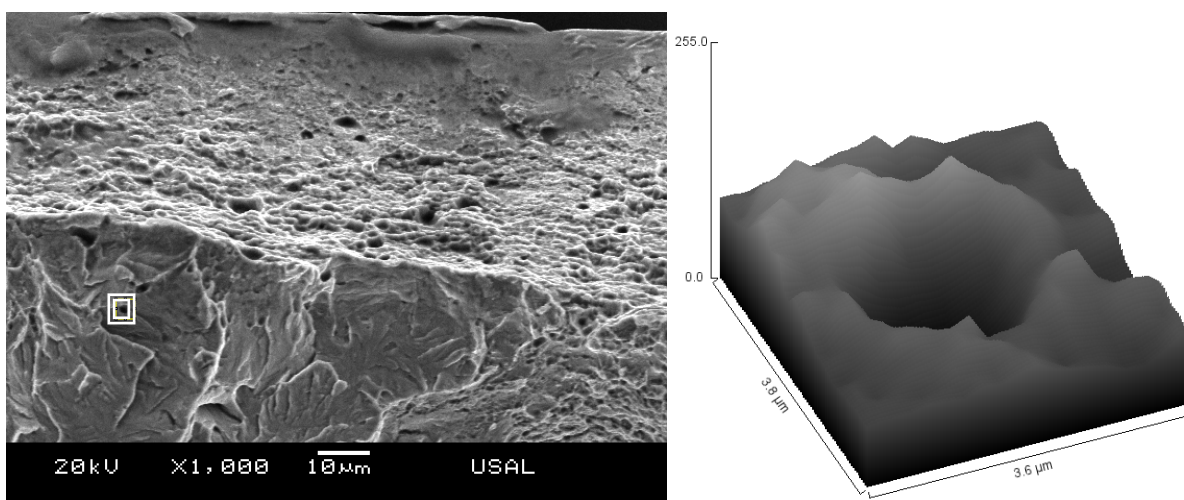


Fig. 3.105. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos en la superficie de fractura por clivaje de la probeta B0-C-2.

Al llegar a la ZPF se podría decir que el micromecanismo básico de fractura es un híbrido entre el clivaje y la fractura por CMH, como puede verse en la zona límite que se presenta en la imagen de la Fig. 3.106, en la que se ve la coexistencia de ambos micromecanismos de fractura. En la misma imagen se puede apreciar la presencia de microfisuras que bordean uno de los clivajes, estas fisuras presentan en su mayor parte geometría alargada con una longitud que oscila en el entorno de las 11  $\mu\text{m}$ .

La ZPF se encuentra situada en la zona inferior izquierda de la probeta, y se caracteriza por la presencia extendida de microhuecos (Fig. 3.107). El tamaño, así como la textura próxima a uno de los mismos, se presentan en la Fig. 3.108; en la imagen se presenta un microhueco que a primera vista parece de gran tamaño inmerso dentro de la ZPF. Presenta una geometría y un perfil interno irregular, sus dimensiones, que a priori parecían llamativas, no lo son tanto puesto que se sitúan en el entorno de las 5  $\mu\text{m}$ .

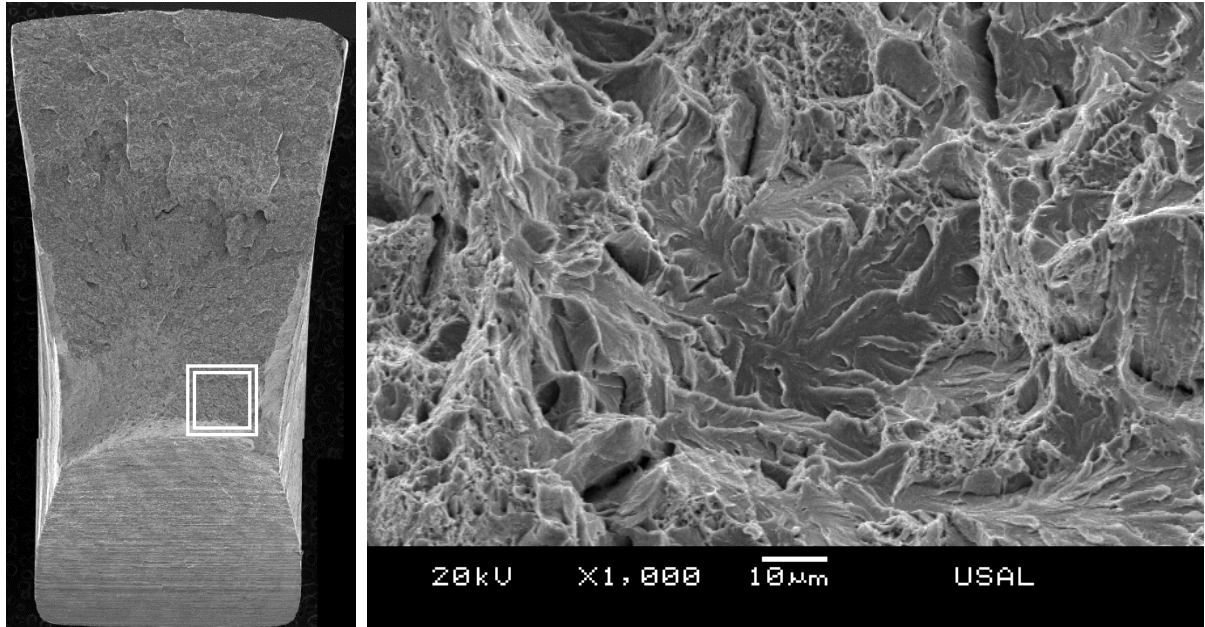


Fig. 3.106. Fractografía en la que se observa facetas de clivaje inmersas en una zona de fractura por CMH.

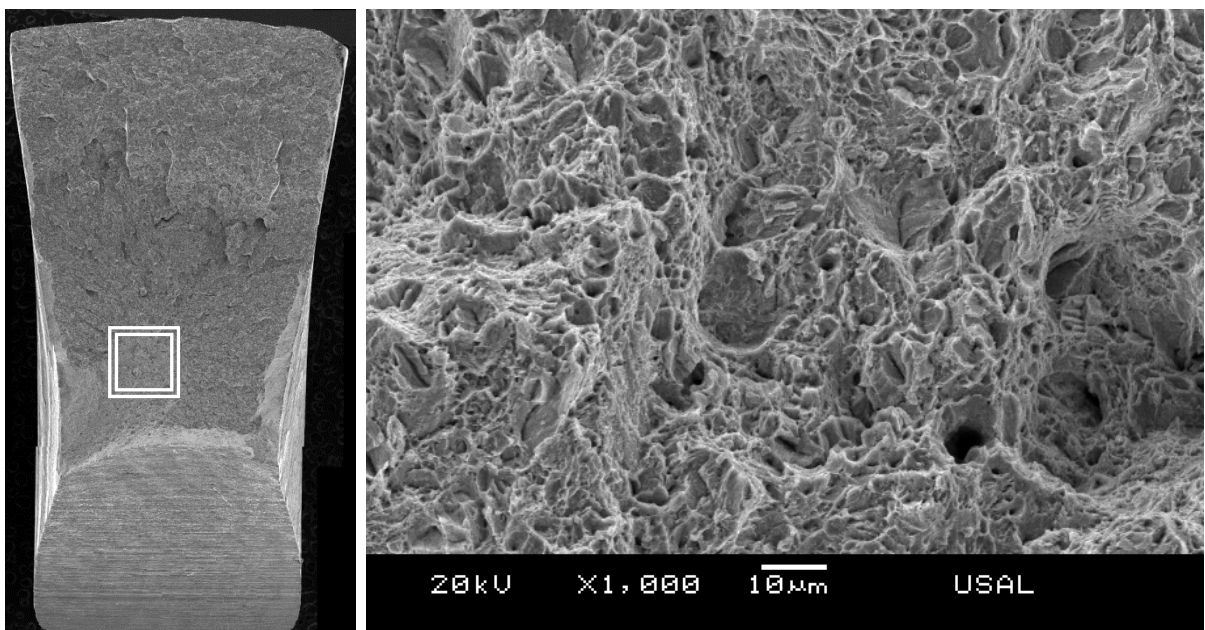


Fig. 3.107. Fractografía de la ZPF de la probeta B0-C-2.

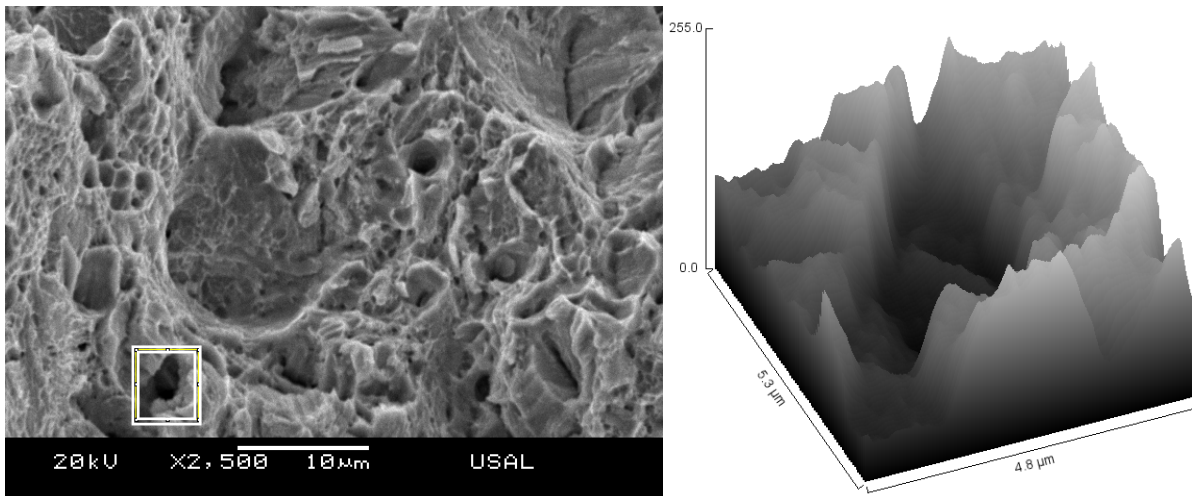
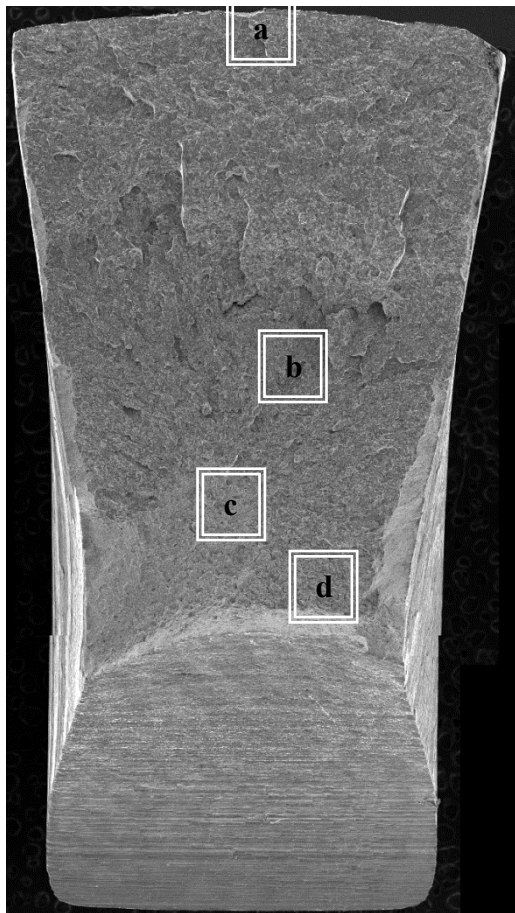
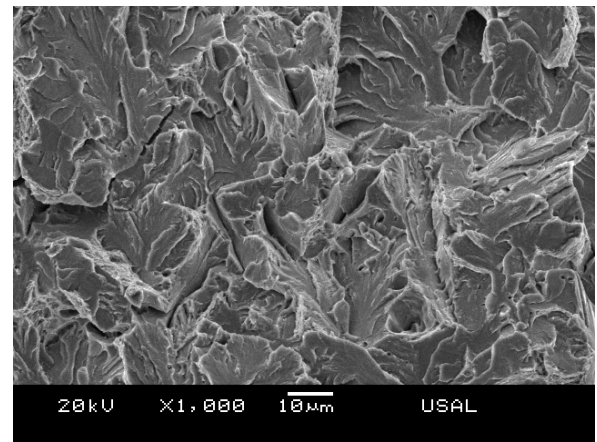


Fig. 3.108. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmersos en la ZPF de la probeta B0-C-2.

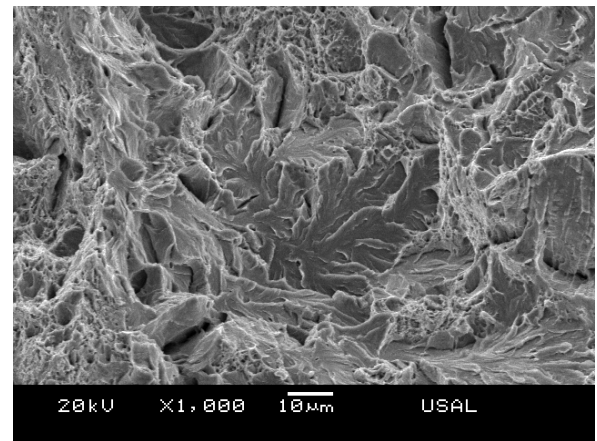
Para concluir el análisis de la fractografía de la muestra B0-C en la Fig. 3.109 se recoge una secuencia de fractografías en las que se realiza un recorrido a través de las diferentes secciones que se presentan en la sección de rotura de la probeta B0-C-2 (siendo ésta la probeta representativa de la muestra B0-C).



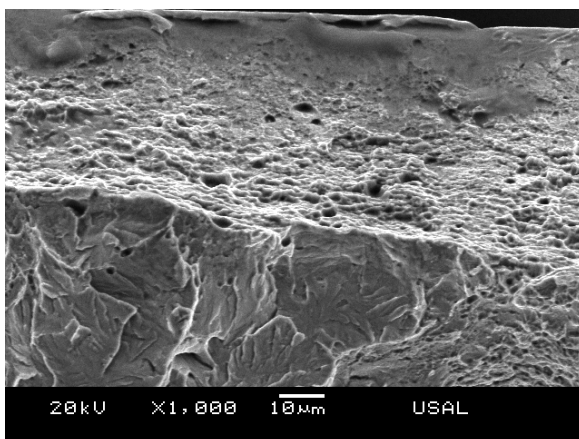
*Probeta B0-C-2*



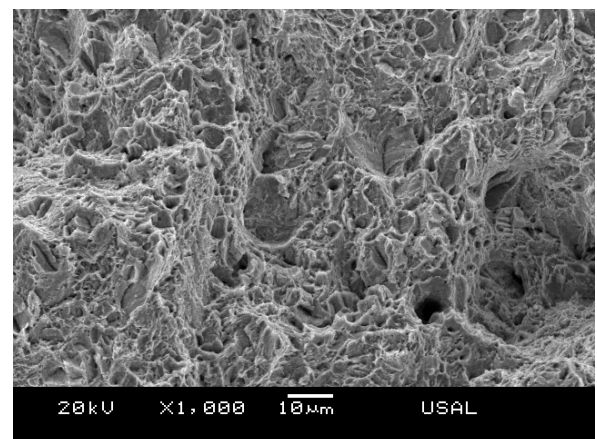
(b)



(c)



(a)



(d)

Fig. 3.109. Superficie de fractura de la probeta B0-C-2.

### 3.5. Análisis fractográfico de la muestra B4-C.

Las fractografías de la muestra B4-C muestran una gran deformación en la sección de entalla, como se muestra en la Fig. 3.110 (probeta B4-C-3). La reducción del ancho de la sección no se hace de un modo lineal, sino que se observa como el ancho de la probeta se preserva hasta aproximadamente media sección donde se aprecia una elevada contracción de la misma adquiriendo un ángulo de reducción de  $7.45^\circ$  para la probeta B4-C-3. En el análisis de las probetas anteriores se ha realizado un análisis fractográfico cuantitativo en todas las probetas ensayadas para cada acero, en este caso ello no va a ser posible ya que la probeta B4-C-1 no llegó a alcanzar la fractura final por separación total de superficies, de modo que los datos aportados se corresponden con los derivados de las dos probetas restantes.

En los dos casos estudiados (probetas B4-C-2 y B4-C-3) la zona intermedia (ZI) predomina sobre la superficie de fractura, con un valor que supone el 81% del área total en la probeta B4-C-2 y un 75 % en la probeta B4-C-3. La ZI se caracteriza, como en casos anteriores, por la presencia de fisuras radiales que parten de la ZPF y se extienden hacia la periferia de la probeta. La CE es la siguiente zona que presenta mayor porcentaje de ocupación con valores que van desde el 16% del área total para la probeta B4-C-2 al 18% de la probeta B4-C-3. La ZPF se presenta en el resto de la superficie de fractura y se sitúa en ambos casos en el centro de la entalla.



Fig. 3.110. Superficie de fractura de la probeta B4-C-3.

Un análisis longitudinal de la sección de rotura de la probeta B4-C-3, desde la parte superior hasta a la inferior, muestra que la primera superficie que aparece es la CE formada por CMH (Fig. 3.111). Los microhuecos difieren bastante de los encontrados hasta el momento, presentan una forma geométrica que se asemeja a elipses con su eje mayor perpendicular a la entalla debido a la gran inclinación del propio labio dúctil (aprox.  $45^\circ$ ). Son microhuecos de poca profundidad pero que presentan un tamaño superficial apreciable. El detalle de uno de los microhuecos se presenta en la Fig. 3.112, éste presenta una forma geométrica elíptica con unas dimensiones del eje mayor de  $14\ \mu\text{m}$  y de  $3\ \mu\text{m}$  de eje menor.

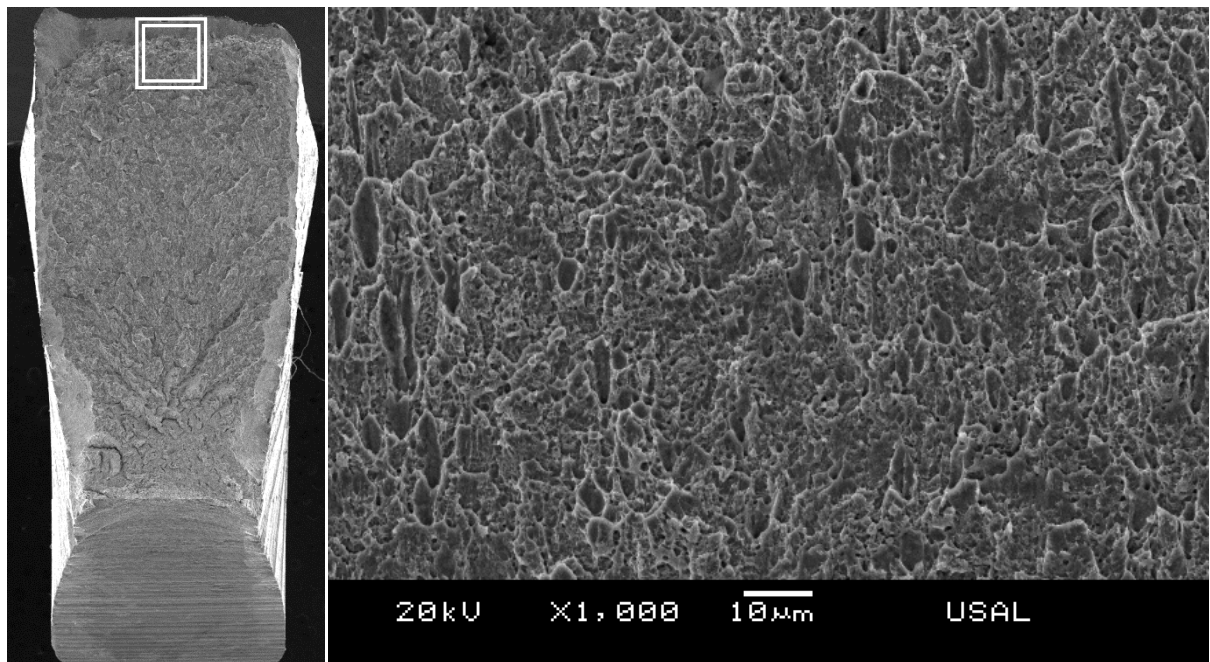


Fig. 3.111. Micro-fractografía correspondiente al borde exterior de la probeta.

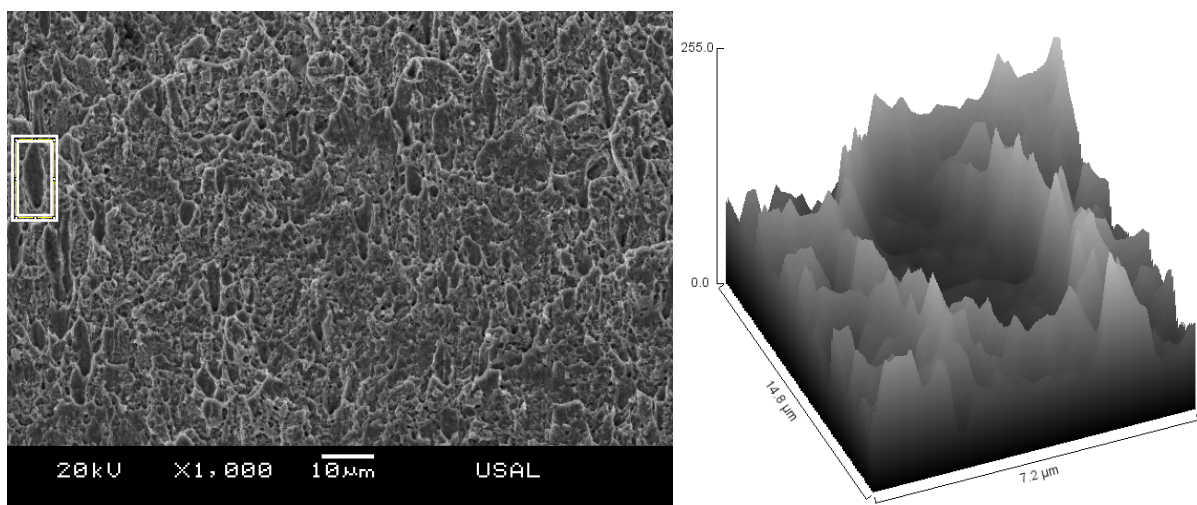


Fig. 3.112. Recreación tridimensional de uno de los microhuecos inmerso en la CE.



En la ZI el micromecanismo básico de fractura es el clivaje, éste domina la práctica totalidad de la probeta, hasta llegar a la zona próxima a la entalla donde empiezan a aparecer pequeñas zonas de microhuecos configurando el perímetro de la ZPF así como abundantes microfisuras como se muestra en la imagen derecha de la Fig. 3.113. La presencia de fractura por CMH aumenta progresivamente hasta llegar a la ZPF, Fig. 3.114, donde toda la microestructura que aparece está formada por microhuecos y microfisuras (CMH\*).

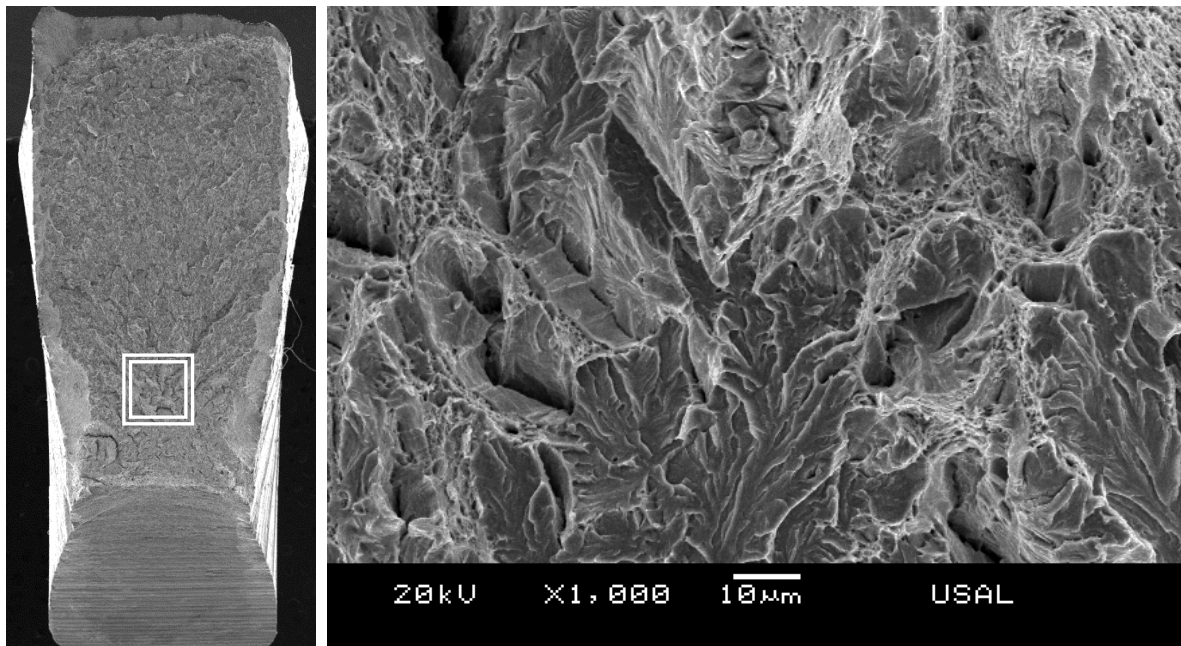


Fig. 3.113. Micro-fractografía correspondiente a la ZI, probeta B4-C-3.

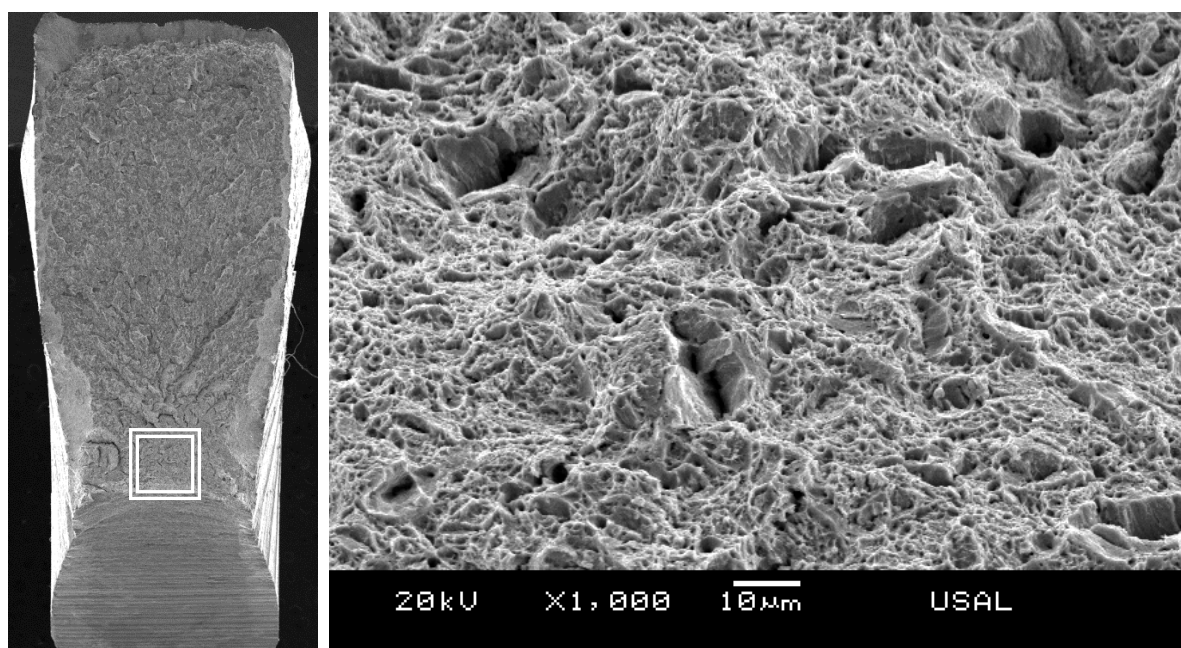


Fig. 3.114. Micro-fractografía a 1000 aumentos correspondiente a la ZPF de la probeta B4-C.

En la imagen Fig. 3.115 se presenta una recreación tridimensional de una de una de las fisuras que se presentan a lo largo de la ZPF. En ella se puede observar la presencia de un microhueco, de geometría en forma de *lágrima*, inmerso en la pared interna de la microfisura.

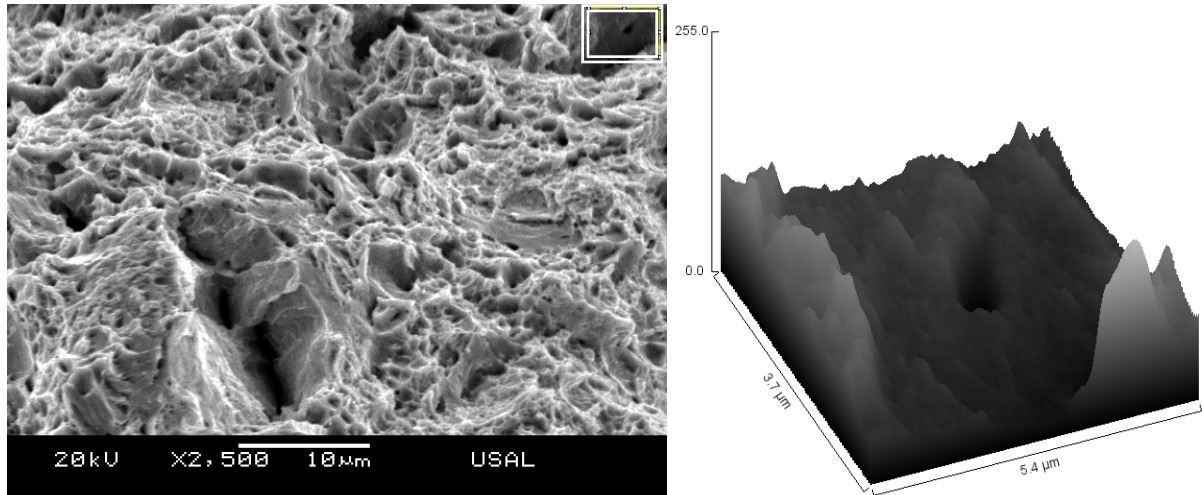


Fig. 3.115. Recreación tridimensional de una de las micro-fisuras presentes en la ZPF de la probeta B4-C-2.

En la imagen izquierda de la Fig. 3.116 se muestra el perfil de la probeta B4-C-3, en la que se observa un perfil de rotura marcadamente irregular. En la imagen derecha de la misma figura se presenta la micro-fractografía de la zona, la cual indica que el micromecanismo básico de fractura dominante es el clivaje; no obstante, también se pueden observar algunas zonas inmersas dentro de él formadas por la presencia de microhuecos, como la que se puede ver en la zona inferior izquierda de la imagen situada a la derecha, Fig. 3.116.

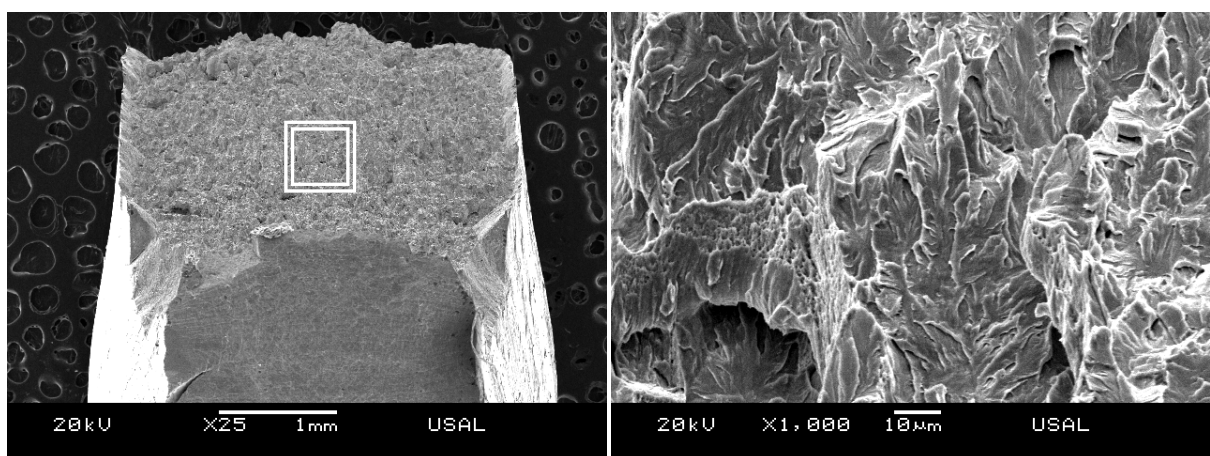
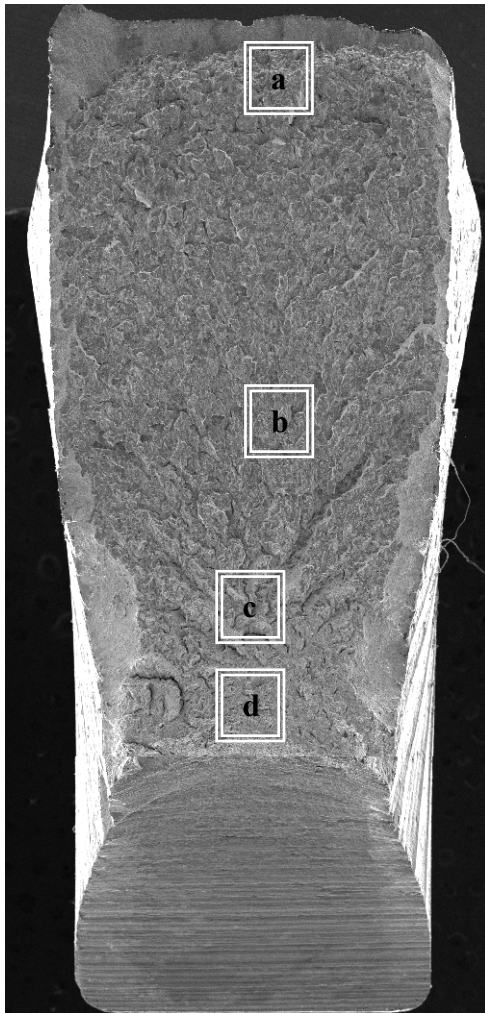
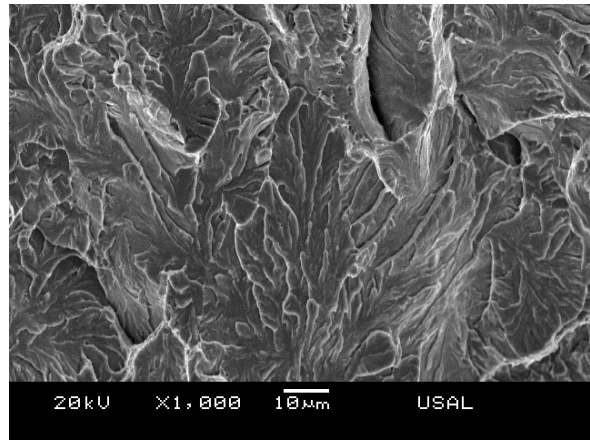


Fig. 3.116. Micro-fractografía correspondiente a los clivajes presentes en la sección de perfil de rotura de la probeta B4-C-3.

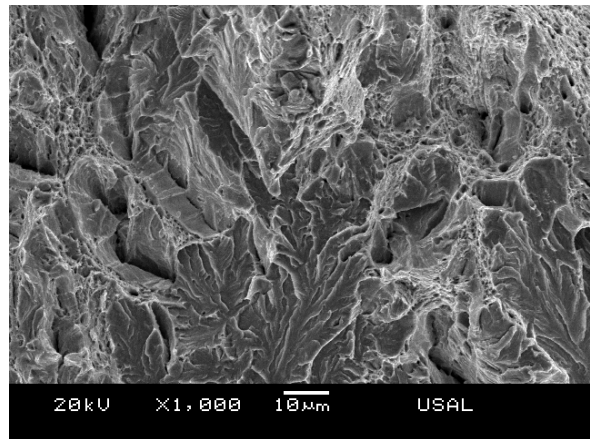
Para concluir el análisis de la fractografía de la probeta B4-C-3 se presenta la Fig. 3.117 en la que se recoge una secuencia de fractografías en las que se realiza un recorrido a través de las diferentes zonas que se pueden encontrar en la sección de rotura de la probeta B4-C-3.



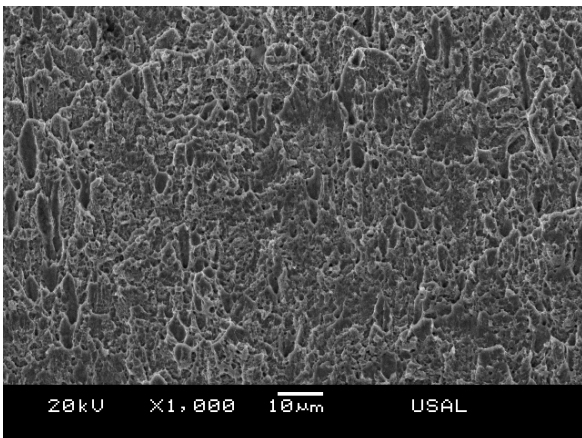
**Probeta B4-C-3**



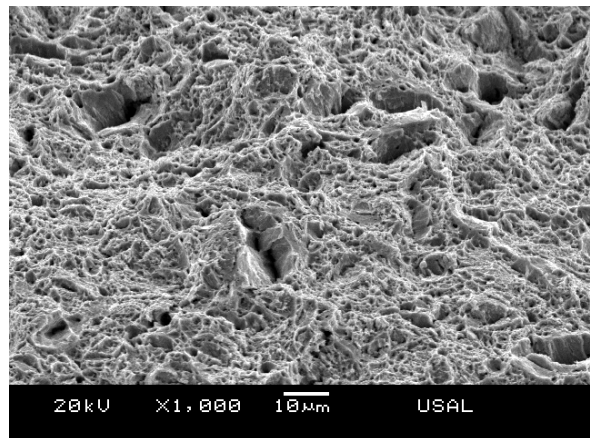
(b)



(c)



(a)



(d)

Fig. 3.117. Secuencia de fractografías para la probeta B4-C-3.

### 3.6. Análisis fractográfico de la muestra B7-C

Las probetas de la muestra B7-C muestran una sección de fractura que se caracteriza por la elevada deformación previa a la fractura final, la presencia de fisuras de gran tamaño, así como una amplia estricción en la sección de entalla (véase la Fig. 3.118), lo que se traduce en una disminución de la misma en las zonas cercanas a la entalla. Las disminuciones se traducen en una diferencia angular que se establece entre los  $4.66^\circ$  para la probeta B7-C-1 hasta los  $6.68^\circ$  para la probeta B7-C-2. La superficie de fractura de las probetas se reparte entre la CE, la ZI y la ZPF. La ZI presenta el área porcentual dominante estableciéndose entre el 73% para la probeta B7-C-3 y el 84% para la B7-C-2. En cuanto a la CE ésta se sitúa a lo largo del 14% de la superficie total de fractura para la probeta B7-C-2 hasta el 20% que se presenta en la probeta B7-C-3. La ZPF se sitúa como en casos anteriores en el entorno de la correspondiente entalla.

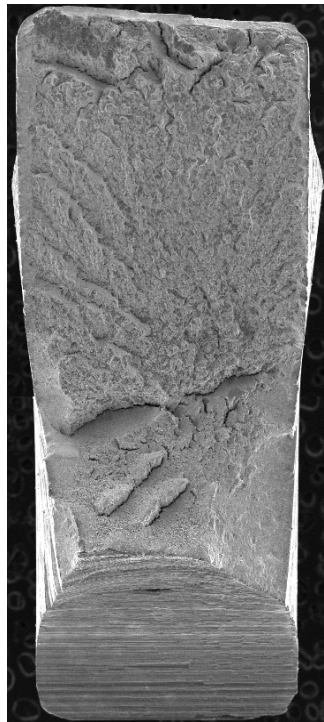


Fig. 3.118. Superficie de fractura de la probeta B7-C-2

La CE de la probeta B7-C-2 (probeta representativa de la terna) tiene una profundidad media de  $84.13 \mu\text{m}$  y está enmarcada por microfisuras de gran tamaño inmersas dentro de una distribución híbrida de clivajes y microhuecos (Fig. 3.119) que pertenecen a la ZI de la probeta. La textura de una porción de una de las microfisuras se presenta en forma de imagen tridimensional (Fig. 3.120). Se puede advertir que se trata de una fisura de gran tamaño, y altamente irregular, en cuanto a su superficie se refiere. Observando la Fig. 3.119 se aprecia como sus paredes verticales muestran una fractografía por clivaje.

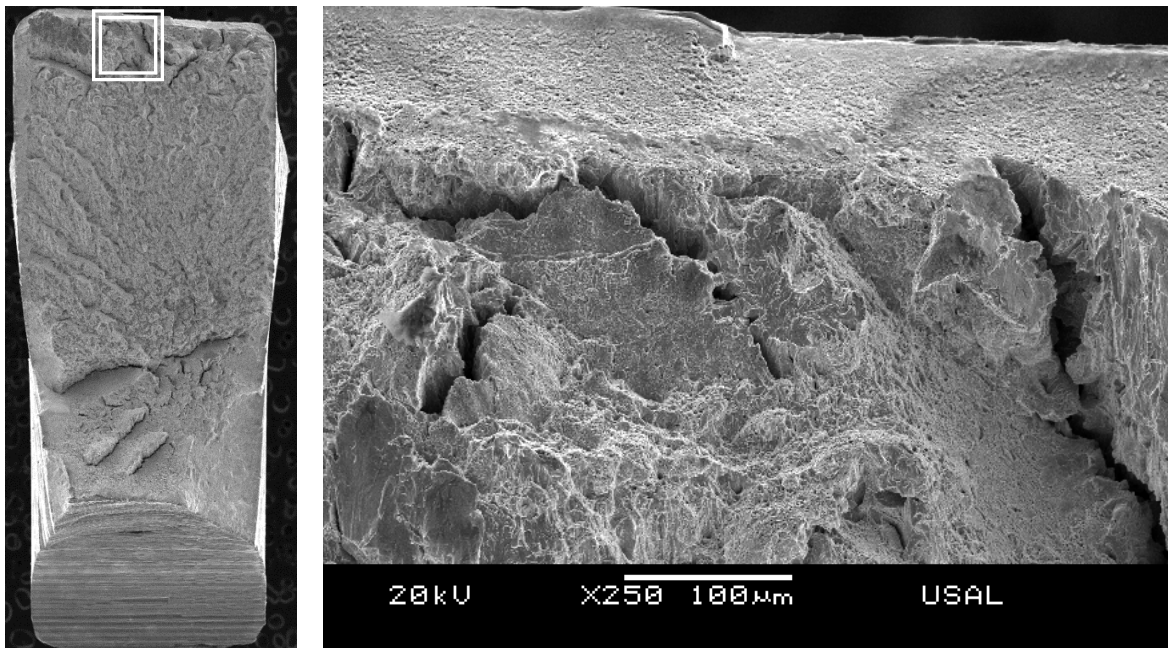


Fig. 3.119. Fractografía de la CE de la probeta B7-C-2.

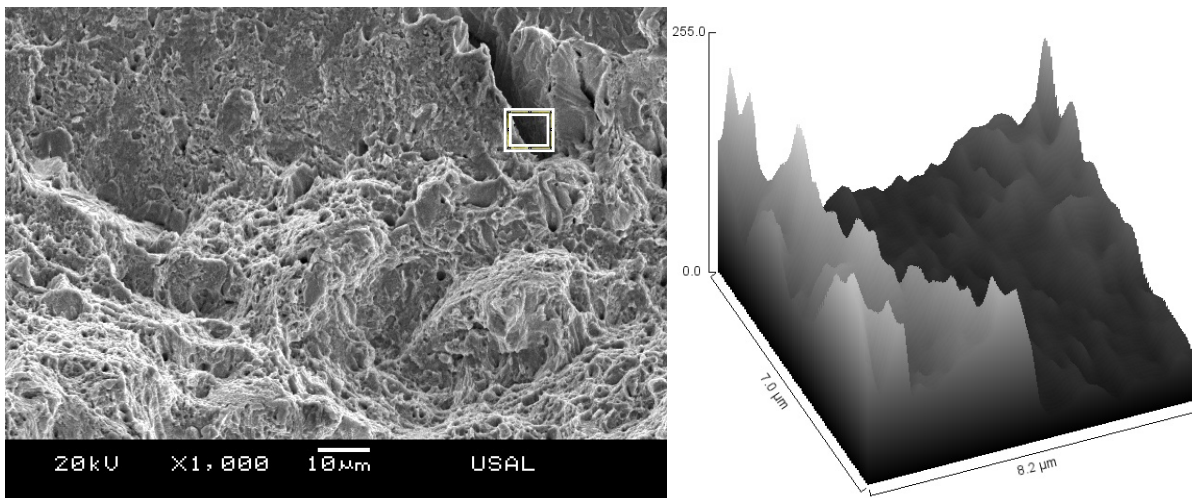


Fig. 3.120. Recreación tridimensional parcial de una microfisura situada en la CE.

Descendiendo a lo largo de la superficie de fractura se observa un decremento de la fractografía por clivaje en favor de la formación de una superficie de fractura por CMH, tal y como se observa en la imagen de la Fig. 3.121, donde la práctica totalidad de la imagen está formada por CMH, y en la cual los clivajes quedan, en general, relegados a las zonas adyacentes a las microfisuras. Las microfisuras presentes que se observan son de un tamaño próximo a las 100  $\mu\text{m}$ . En la zona inmediata a la entalla se presenta la ZPF que se caracteriza por estar formada por la presencia de microhuecos tipo CMH\* distribuidos a lo largo de toda ella (Fig. 3.122).

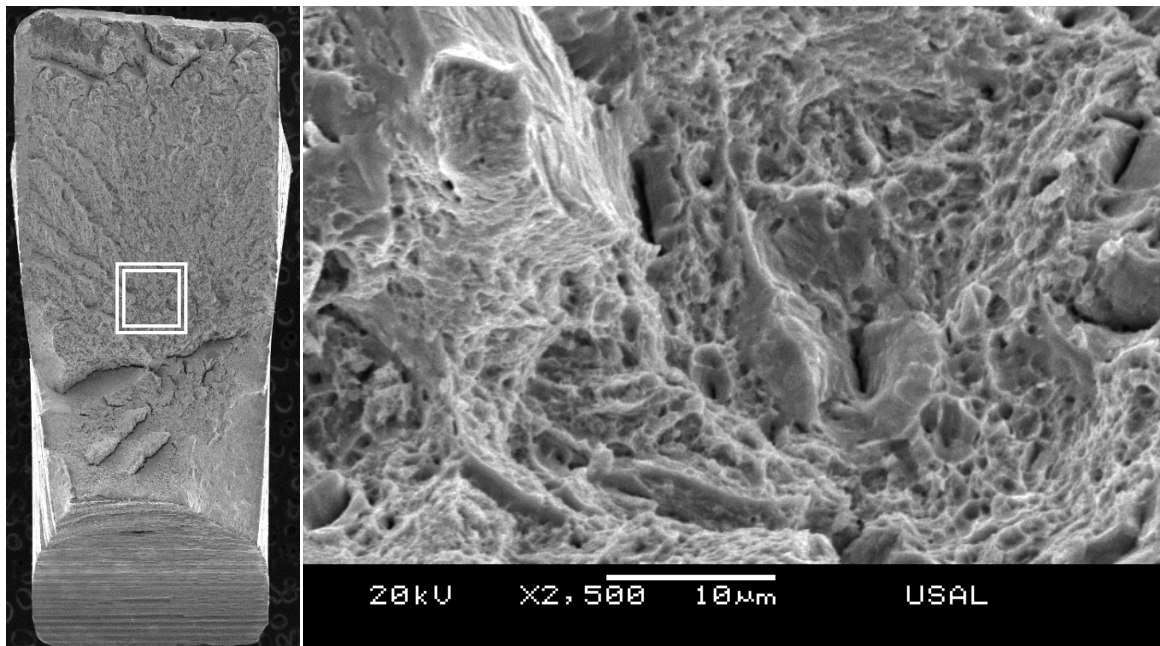


Fig. 3.121. Fractografía correspondiente a la zona central de la probeta.

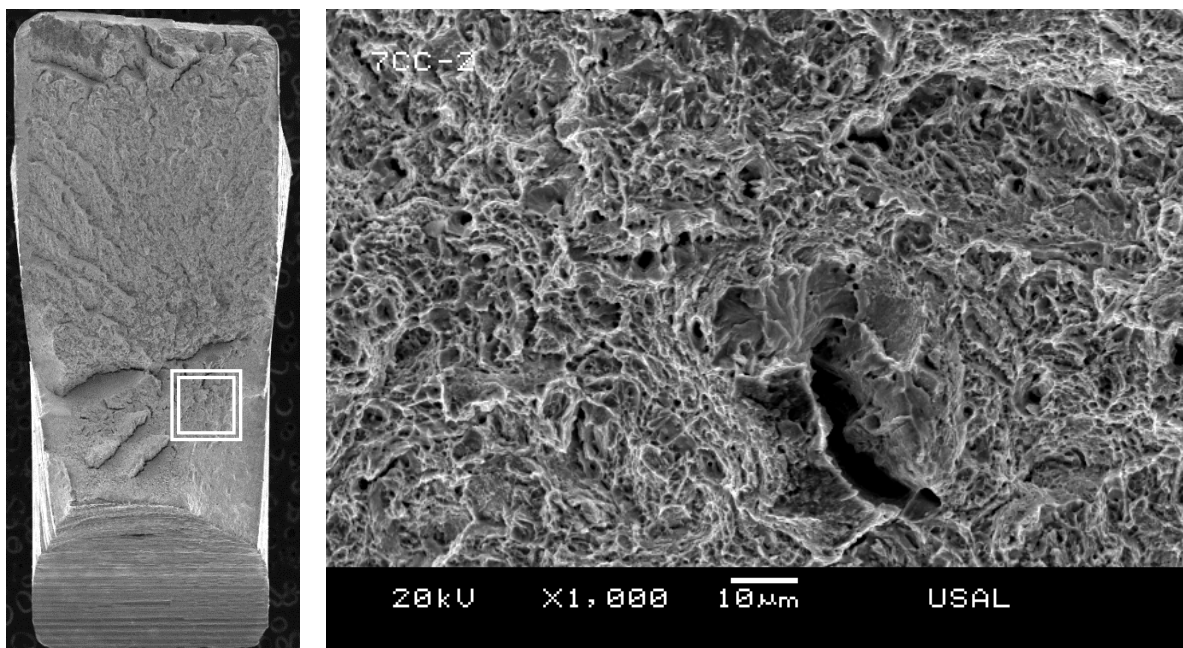


Fig. 3.122. Fractografía correspondiente a la ZPF (CMH\*).

Para concluir el análisis de la fractografía de la muestra B7-C se presenta la Fig. 3.123 en la que se recoge una secuencia de micro-fractografías en las que se realiza un recorrido a través de las diferentes secciones que se presentan en la superficie de fractura de la probeta B7-C-3, siendo ésta la probeta representativa de la terna ensayada.

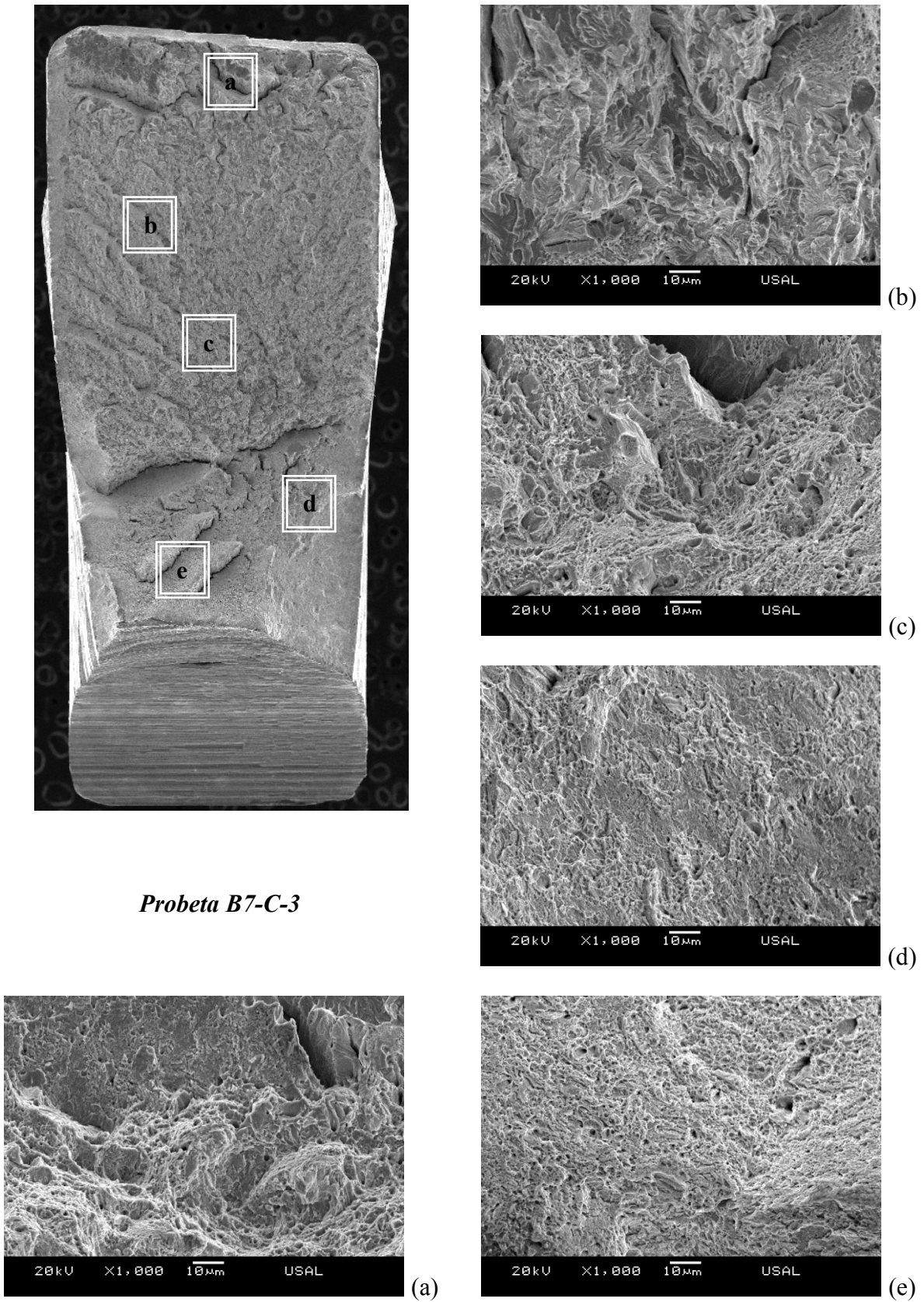
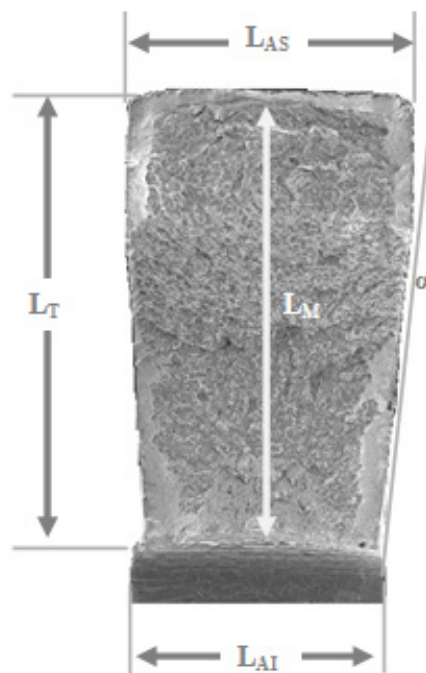


Fig. 3.123. Secuencia de fractografías para la probeta B7-C-3.

### 3.7. Análisis cuantitativo de las superficies de fractura

En este apartado se presentan en forma numérica (Tablas 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12) los datos correspondientes a las diferentes dimensiones características de las probetas ensayadas mediante el ensayo deflexión por cuatro puntos. Para el análisis de los mismos se hace necesario indicar una serie de circunstancias:

- > La probeta B4C-1 no rompió totalmente (por separación total de superficies), de modo que no se tiene en consideración para la medida de los ángulos de las secciones finales de la superficie de fractura (sección de fractura).
- > Las probetas B4C-2 y B4C-3 presentan una fractura caracterizada por una gran anisotropía, de modo que estas medidas son estimativas.
- > Las probetas B4C-3, B7C-1, B7C-2 y PB7C-3 presentan una fractografía claramente diferenciada del resto de probetas debido a su gran deformación plástica previa a la fractura final, de modo que el ángulo  $\alpha$  se toma a media altura.



$L_{AS}$ : longitud del ancho superior  
 $L_{AI}$ : longitud del ancho inferior  
 $L_{AM}$ : longitud del ancho mitad  
 $L_T$ : máxima longitud de la probeta sin entalla  
 $L_M$ : longitud de la probeta en la sección media

$\alpha$ : ángulo de la zona de contracción  
 $A_T$ : área total de la sección de rotura  
 $A_{ZPF}$ : área de la zona de proceso de fractura  
 $A_{ZI}$ : área de la zona intermedia  
 $A_{CE}$ : área de la corona exterior

Fig. 3.2. (repetida) Detalle de las dimensiones tomadas en las probetas sometidas a flexión.



Tabla 3.7. Datos característicos de la muestra B0-A.

Medida	B0-A-1	B0-A-2	B0-A-3	B0-A
$L_{AS}$ (mm)	4.28	4.49	4.21	<b>4.33</b>
$L_{AM}$ (mm)	-	4.20	4.05	<b>4.13</b>
$L_{AI}$ (mm)	3.67	3.91	3.62	<b>3.73</b>
$L_T$ (mm)	6.69	7.06	6.76	<b>6.84</b>
$L_M$ (mm)	6.61	6.93	6.65	<b>6.73</b>
$\alpha$ (°)	3.55	0.82	2.57	<b>2.31</b>
$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	26.82	29.38	27.07	<b>27.76</b>
$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	0.81	0.72	0.70	<b>0.74</b>
$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	25.79	28.41	26.03	<b>26.74</b>
$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	0.22	0.25	0.34	<b>0.27</b>

Tabla 3.8. Datos característicos de la muestra B0-C.

Medida	B0-C-1	B0-C-2	B0-C-3	B0-C
$L_{AS}$ (mm)	4.83	5.18	4.96	<b>4.99</b>
$L_{AM}$ (mm)	4.08	4.30	4.14	<b>4.17</b>
$L_{AI}$ (mm)	3.39	3.31	3.22	<b>3.31</b>
$L_T$ (mm)	6.94	6.88	6.97	<b>6.93</b>
$L_M$ (mm)	6.85	6.58	6.42	<b>6.62</b>
$\alpha$ (°)	4.80	10.04	9.45	<b>8.10</b>
$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	27.87	28.54	26.84	<b>27.75</b>
$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	1.79	0.64	0.88	<b>1.10</b>
$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	22.79	26.72	24.52	<b>24.68</b>
$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	3.29	1.20	1.44	<b>1.98</b>

Tabla 3.9. Datos característicos de la muestra B4-A.

Medida	B4-A-1	B4-A-2	B4-A-3	B4-A
$L_{AS}$ (mm)	3.48	3.52	3.49	<b>3.50</b>
$L_{AM}$ (mm)	2.78	2.91	3.30	<b>3.00</b>
$L_{AI}$ (mm)	3.26	3.31	2.96	<b>3.18</b>
$L_T$ (mm)	5.70	5.70	6.00	<b>5.80</b>
$L_M$ (mm)	5.52	5.60	5.76	<b>5.63</b>
$\alpha$ (°)	2.18	4.49	4.22	<b>3.63</b>
$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	17.92	18.57	19.34	<b>18.61</b>
$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	1.51	1.48	0.66	<b>1.22</b>
$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	12.25	13.84	15.70	<b>13.93</b>
$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	4.16	3.25	3.00	<b>3.47</b>

Tabla 3.10. Datos característicos de la muestra B4-C.

Medida	B4-C-1 (*)	B4-C-2	B4-C-3	B4-C
$L_{AS}$ (mm)	(*)	3.76	3.36	<b>3.56</b>
$L_{AM}$ (mm)	(*)	3.16	3.26	<b>3.21</b>
$L_{AI}$ (mm)	(*)	2.50	2.30	<b>2.40</b>
$L_T$ (mm)	(*)	5.86	6.56	<b>6.21</b>
$L_M$ (mm)	(*)	5.86	6.11	<b>5.99</b>
$\alpha$ (°)	(*)	7.01	7.45	<b>7.23</b>
$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	(*)	18.47	19.14	<b>18.81</b>
$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	(*)	0.56	1.22	<b>0.89</b>
$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	(*)	15.04	14.40	<b>14.72</b>
$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	(*)	2.87	3.52	<b>3.20</b>

(\*) La probeta B4-C-1 finalizó el ensayo de flexión por cuatro puntos sin alcanzar la fractura final por separación total de superficies, por lo que no se tiene en cuenta para el cálculo de los valores medios.

Tabla 3.11. Datos característicos de la muestra B7-A.

Medida	B7-A-1	B7-A-2	B7-A-3	B7-A
$L_{AS}$ (mm)	2.52	2.78	2.60	<b>2.63</b>
$L_{AM}$ (mm)	2.46	2.50	2.57	<b>2.51</b>
$L_{AI}$ (mm)	2.15	2.31	2.38	<b>2.28</b>
$L_T$ (mm)	4.15	5.15	4.14	<b>4.48</b>
$L_M$ (mm)	4.06	4.92	4.05	<b>4.34</b>
$\alpha$ (°)	3.55	1.87	4.23	<b>3.22</b>
$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	10.06	12.62	10.34	<b>11.01</b>
$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	0.87	0.40	0.13	<b>0.47</b>
$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	8.37	10.07	8.99	<b>9.14</b>
$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	0.82	2.15	1.22	<b>1.40</b>

Tabla 3.12. Datos característicos de la muestra B7-C.

Medida	B7-C-1	B7-C-2	B7-C-3	B7-C
$L_{AS}$ (mm)	2.67	2.58	2.67	<b>2.64</b>
$L_{AM}$ (mm)	2.54	2.43	2.42	<b>2.46</b>
$L_{AI}$ (mm)	2.14	2.00	2.03	<b>2.06</b>
$L_T$ (mm)	5.22	5.09	5.36	<b>5.22</b>
$L_M$ (mm)	4.86	5.01	4.90	<b>4.92</b>
$\alpha$ (°)	4.66	6.68	5.12	<b>5.49</b>
$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	12.39	12.14	12.36	<b>12.30</b>
$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	0.47	0.17	0.83	<b>0.49</b>
$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	9.78	10.23	9.04	<b>9.68</b>
$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	2.14	1.74	2.49	<b>2.12</b>

## CAPITULO IV: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la utilización del método de los elementos finitos (MEF) en esta parte de la Tesis es prestar el apoyo que proporciona el análisis numérico a fin de establecer los valores de los campos de tensión y de deformación, así como los desplazamientos de los distintos puntos de la probeta entallada en cuestión, durante los correspondientes ensayos de fractura bajo solicitaciones de tracción y de flexión. Para analizar los campos de tensiones, deformaciones y desplazamientos se ha de realizar una modelización virtual del proceso de carga sobre la probeta que reproduzca fielmente el ensayo al que está sometida.

El MEF surge como una técnica de aproximación para estudiar problemas en los que la solución real no se encuentra mediante cálculos sencillos, y por tanto no resulta factible obtenerla analíticamente (ZIENKIEWICZ, 1994). El MEF se utiliza en la mayoría de las diferentes áreas de conocimiento, bien sea en análisis de campos electromagnéticos o en mecánica de fluidos, así como en construcción, mecánica y, en general, en problemas en los que se ven involucradas ecuaciones diferenciales de segundo orden cuya solución exacta no sea posible por métodos tradicionales.

Con el fin de habilitar el medio continuo para su estudio por elementos finitos se ha de proceder a realizar una discretización del mismo, lo que supone el reemplazo del sistema material continuo objeto de análisis por un sistema discreto conocido como malla, y que estará formado por un número finito de componentes que se denominan elementos finitos; de este modo, se pasa de un sistema continuo de material a un sistema discreto con la consiguiente sintetización del problema. Los elementos finitos estarán conectados entre sí en una serie de puntos discretos conocidos como nodos. Los nodos pueden estar localizados en los extremos o esquinas de los elementos o bien en puntos intermedios de los mismos. En su conjunto la malla habrá de representar lo más fielmente que sea posible el sistema sólido objeto de estudio.

Matemáticamente la malla representa el paso de un número infinito de parámetros, para representar el sistema continuo, a un número finito de ellos para representar el comportamiento del sistema discreto. La solución al sistema completo se compondrá a partir de la composición de todos los elementos, la cual se obtendrá por interpolación de los datos obtenidos en los nodos de los elementos.

El estudio tenso-deformacional de un sólido conlleva la resolución simultánea de un conjunto de ecuaciones cuya solución conduce a la obtención de los desplazamientos en cada uno de los nodos que forman la malla. Una vez obtenidos estos se habrá determinado el campo de desplazamiento del conjunto. Tras el establecimiento del campo de desplazamiento ya es posible obtener las tensiones y deformaciones en todos los puntos del sólido mediante sus relaciones constitutivas.

En el proceso de discretización de la malla se habrán de tener en cuenta una serie de factores, entre los que se encuentran los siguientes:

- > *La precisión requerida:* cuanto mayor es la adaptación de la malla al sólido objeto de estudio mayor será la calidad del resultado y por tanto más aproximado al valor real.
- > *El esfuerzo computacional:* que se transformará en horas de trabajo del equipo y por tanto en valor económico.
- > *La memoria utilizada:* que resulta limitada por la capacidad de los equipos utilizados.
- > *Los grados de libertad del sistema, etc.*

En cuanto a la extensión de la malla será imprescindible tener en cuenta la existencia de simetrías que reducen considerablemente el número de elementos de la misma, así como el conocimiento del principio de Saint-Venant, que establece que el efecto de la concentración de tensiones desaparece a distancias relativamente pequeñas, lo que hace que se pueda reducir apreciablemente el problema.

El tipo de elemento a utilizar obedece al tipo de problema que se plantea, así como a la fidelidad con que se quiere representar una geometría o un modelo; por ejemplo, si se quiere representar una superficie curva será mejor adoptar en su límite elementos isoparamétricos que elementos lineales, por la capacidad de estos para adoptar formas curvas. No obstante, habrá que tener en cuenta el incremento de esfuerzo computacional que suponen dichos elementos sobre los lineales, ya que aquellos aumentan el número de nodos por elemento y por tanto aumentan el número de cálculos, así como la necesidad de memoria (no siempre disponible). El número de elementos utilizados en la representación de la malla será función del tamaño de los mismos: a menor tamaño de los elementos mayor calidad de mallado y previsiblemente mejor aproximación a la solución real, pero ello requiere mayor esfuerzo computacional y, por tanto, mayor coste (LIU, QUEK, 2013).

Una posible solución para limitar el número de elementos para cada cálculo es utilizar lo que se conoce como gradiente de mallado, que consiste en diseñar una malla que varíe en función de la estimación previa de las variaciones de las magnitudes, así se hará un mallado más denso en zonas con cambios abruptos de magnitudes y uno más liviano en zonas donde no se esperen estos cambios.

Como ya sucedió en el capítulo II dedicado al procedimiento experimental, el estudio MEF se va a estructurar en dos partes. En la primera parte se desarrollarán los cálculos correspondientes a las probetas prismáticas sometidas a solicitaciones de tracción hasta fractura (probetas PAA y PCC), en la segunda parte se desarrollarán aquellos correspondientes a las probetas prismáticas sometidas a solicitaciones de flexión por cuatro puntos (probetas PA y PC). Cada ensayo realizado por el MEF se realiza sobre una probeta concreta elegida de entre los tres especímenes que se han ensayado en el procedimiento experimental: la probeta representativa de la terna en cuestión.

### **1.1. Consideraciones sobre el proceso de cálculo**

La primera hipótesis que se va a realizar es la relativa a la consideración del material como isótropo. Esta hipótesis es válida para el acero B0 (alambre de acero sin trefilar: alambrón), y no tanto para los aceros con un mayor grado de trefilado (B4 y B7), donde se manifiesta un comportamiento anisótropo debido a la orientación progresiva de las colonias de perlita y sus láminas durante el proceso de trefilado.

La presencia de la entalla en el material genera un estado triaxial de tensiones, por lo que se hace necesario un criterio de plastificación. Con la hipótesis de material isótropo la elección del criterio de plastificación resulta directa, por ello se ha optado por la utilización del criterio

de plastificación de von Mises junto con una regla de endurecimiento por deformación isotrópica, siendo esta última igualmente aplicable a los aceros B4 y B7 por desconocer los parámetros de anisotropía que definen el comportamiento mecánico de los mismos.

En los cálculos se ha utilizado la *formulación Lagrangiana actualizada*, procedimiento desarrollado por MCMEEKING y RICE (1977). Dicho método resulta conveniente en problemas que involucran grandes deformaciones plásticas. En esta formulación el *MSC.Marc®* (que es el programa informático empleado para realizar los cálculos MEF) hace uso de las tensiones verdaderas y de Cauchy en las relaciones constitutivas, así como de la deformación verdadera o también denominada logarítmica.

Para realizar en un sólido el análisis elasto-plástico, como es el que se utiliza el programa *MSC.Marc®*, se puede hacer uso de dos tipos de descomposición de la deformación: la descomposición aditiva o bien la descomposición multiplicativa del incremento de deformación. A pesar de que la descomposición multiplicativa tuvo controversias en el pasado debido al inconveniente que se presentaba por la rotación del sólido, actualmente se acepta sin ambigüedades en el caso de materiales isotrópicos. En el presente trabajo, sin embargo, se ha optado por el uso tradicional que consiste en la descripción aditiva. (CASTELLÓ, y FLORES, 2006). En el análisis elasto-plástico con altas deformaciones el procedimiento básico del programa *MSC.Marc®* es la descomposición de la deformación incremental en parte elástica y parte plástica, junto con la aplicación de un algoritmo de retorno.

## 1.2. Consideraciones sobre el material empleado

Las curvas de comportamiento (tensión vs deformación plástica) de los materiales utilizados en la presente Tesis (B0, B4 y B7) se han obtenido a partir de los ensayos de tracción simple (TS) de las probetas B0-TS-3, B4-TS-3, B7-TS-3 aportados por el Grupo de Investigación en Fractura e Integridad Estructural (GIFIE) de la Universidad de Salamanca (USAL).

Los datos aportados en el ensayo de tracción simple son la carga ( $F$ ) a la que está sometida la probeta y la extensión de la misma ( $\Delta l$ ) medida con la ayuda un extensómetro de con una base de medida ( $l_0$ ) de 25 mm. Se hace necesario el conocer la tensión ingenieril ( $s$ ) así como la deformación ingenieril ( $e$ ) para posteriormente poder calcular la tensión verdadera ( $\sigma$ ) y la deformación verdadera ( $\varepsilon$ ). El cálculo de la tensión ingenieril ( $s=F/A_0$ ) se realiza dividiendo la carga suministrada a la probeta de tracción simple  $F$  por el valor de su área transversal inicial ( $A_0$ ); posteriormente se procede a calcular la deformación ingenieril ( $\varepsilon = \Delta l/l_0$ ), donde  $\Delta l$  es el incremento de longitud que sufre el trozo de probeta situado entre las cuchillas del

extensómetro, cuchillas las cuales están separadas entre sí una distancia  $l_0$  (base de medida del extensómetro empleado).

Llegado a este punto se hace necesario calcular la verdadera tensión ( $\sigma$ ) y la verdadera deformación ( $\varepsilon$ ) que está soportando la probeta de acero durante todo el ensayo de tracción simple; ello se consigue teniendo en cuenta la actualización geométrica de la probeta a lo largo de dicho ensayo de tracción simple (en cada instante del ensayo la sección transversal de la probeta disminuye y la longitud de la probeta considerada aumenta a medida que se incrementa la carga aplicada a la probeta). La tensión verdadera se obtiene mediante la expresión  $\sigma = s(1 + e)$ , mientras que la deformación verdadera es igual a:  $\varepsilon = Ln(1 + e)$ . La deformación verdadera calculada tiene una componente elástica ( $\varepsilon_e$ ) y una componente plástica ( $\varepsilon_p$ ), se ve entonces que la deformación plástica se puede calcular sustrayendo la deformación elástica a la deformación total, *i.e.*,  $\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$ ; donde la deformación elástica se obtiene al dividir la tensión ( $\sigma$ ) por el módulo elástico ( $E$ ) del acero correspondiente.

Con los pasos sencillos descritos en los dos párrafos anteriores se puede obtener la ley de comportamiento del material para ser introducida en el programa de cálculo MEF, ley de comportamiento dada en la forma de la tensión verdadera y de la deformación plástica verdadera (curva  $\sigma-\varepsilon_p$ ). En las tres figuras que se muestran a continuación (Figs. 4.1, 4.2 y 4.3) se presentan las curvas de comportamiento resultantes para los tres materiales empleados en la presente Tesis: aceros B0, B4 y B7.

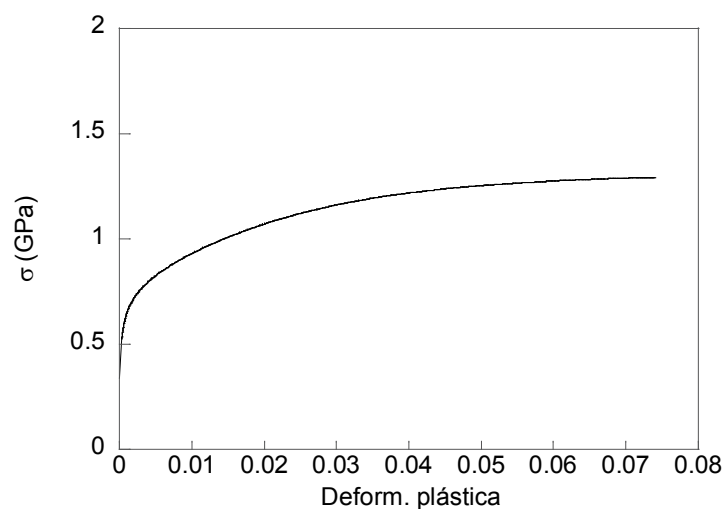
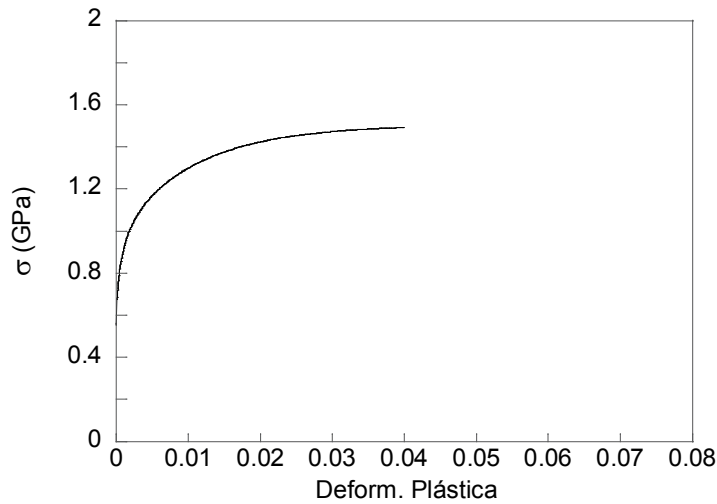
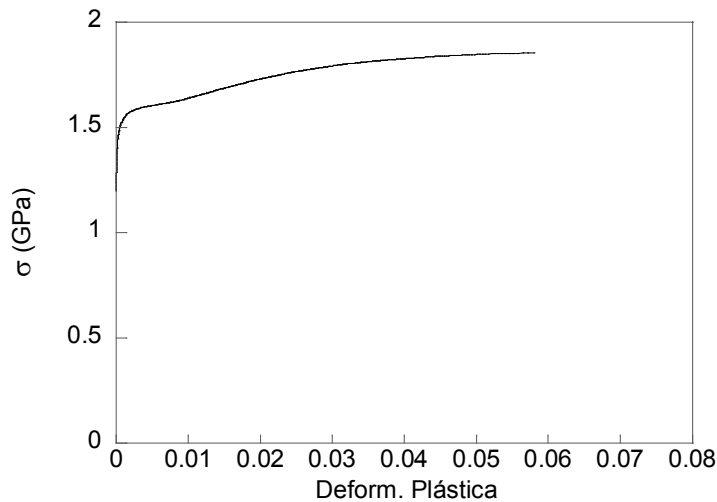


Fig. 4.1. Curva de comportamiento ( $\sigma-\varepsilon_p$ ) del acero B0.



Fig. 4.2. Curva de comportamiento ( $\sigma$ - $\varepsilon_p$ ) del acero B4.Fig. 4.3. Curva de comportamiento ( $\sigma$ - $\varepsilon_p$ ) del acero B7.

### 1.3. Evaluación de las variables internas

A lo largo de los siguientes apartados se hará un estudio de las variables características que rigen los ensayos bajo solicitaciones de tracción. En aquellas probetas mecanizadas a partir del alambre se realizará un seguimiento de las variables más importantes a lo largo de todo el ensayo de tracción tales como, la tensión equivalente de von Mises, campos de deformación, tensión hidrostática y los campos de desplazamiento. El motivo de realizar un seguimiento del ensayo de tracción en las probetas procedentes del alambre es el poder visualizar el comportamiento de las variables a lo largo del ensayo y que es en esencia el mismo que se da en los aceros B4 y B7. Del mismo modo se hará un estudio particular sobre las variables internas en los fondos de entalla en el instante previo correspondiente a la

fractura de las probetas en el ensayo real. Las variables que se van a calcular para establecer el criterio de fractura son las que se detallan *grosso modo* a continuación:

- > *Desplazamiento*: establece la diferencia entre el vector de posición de una partícula en un instante denominado actual y el vector de posición de ésta en un instante base que sirve de referencia.
- > *Deformación*: establece el movimiento relativo de un entorno diferencial material de una partícula concreta que sirve como referencia.
- > *Tensión efectiva o equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ )*:  $\bar{\sigma} = [3/2(\boldsymbol{\sigma}' \cdot \boldsymbol{\sigma}')]^{1/2}$ ; donde  $\boldsymbol{\sigma}'$  es el tensor desviador de tensiones y el operador  $\cdot$  denota el producto interno.
- > *Tensión hidrostática ( $\sigma$ )*: se define como la tercera parte del valor de la traza del tensor de tensiones ( $\boldsymbol{\sigma}$ ), es una variable fundamental para el estudio de la difusión del átomo de hidrógeno en las aleaciones metálicas.
- > *Factor de Triaxialidad ( $t$ )*:  $t = \sigma/\bar{\sigma}$  se trata de un factor adimensional que indica el grado de constreñimiento al cual se encuentra sometido el material por la existencia de concentradores de tensión (entallas).
- > *Deformación plástica efectiva, equivalente o generalizada ( $\bar{\varepsilon}^p$ )*, parámetro escalar que gobierna el endurecimiento por deformación:  $\bar{\varepsilon} = [2/3(\boldsymbol{\varepsilon}^p \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^p)]^{1/2}$ ; donde  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  es el tensor de deformaciones plásticas y el operador  $\cdot$  denota el producto interno.
- > *Densidad de energía de deformación ( $\omega$ )*:  $\omega = \int_0^\varepsilon \boldsymbol{\sigma} \cdot d\boldsymbol{\varepsilon}$ , donde  $\boldsymbol{\sigma}$  es el tensor de tensiones y  $\boldsymbol{\varepsilon}$  es el tensor de deformaciones.

## 2. SIMULACIÓN DEL ENSAYO BAJO SOLICITACIÓN DE TRACCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

La simulación numérica del ensayo bajo solicitación de tracción mediante MEF se va a realizar teniendo en cuenta los siguientes parámetros en todos los casos. Los detalles de cada malla particular se estudiarán en el apartado correspondiente. En cuanto al mallado se refiere se tendrá en cuenta lo siguiente:

- > Se van a diseñar mallas específicas que sean capaces de reproducir lo más fielmente posible las condiciones del problema. Las mallas reproducirán las condiciones de falta de simetría que existe entre ambas entallas (denominadas *izquierda* y *derecha*).
- > Aunque lo más interesante desde un punto de vista matemático sería mantener una densidad de mallado uniforme de suficiente densidad para hacer un análisis que fuese capaz de reproducir lo más fielmente posible las tensiones y deformaciones en toda la probeta, la falta de capacidad de los medios informáticos disponibles hace que sea necesario hacer una distribución de nodos y elementos en una malla que se adapte a las condiciones del problema y sea capaz de reproducir lo más fielmente posible los resultados experimentales. Por ello se ha optado por la realización de una malla que presenta gradientes de densidad de elementos, de modo que la zona de entalla se presenta densamente mallada con el fin de captar las tensiones y deformaciones que se están produciendo, mientras que las zonas más alejadas de las mismas presentan una variación menor del número de elementos.
- > Se ha optado por diseñar una malla donde todos los puntos, salvo los que se mencionen posteriormente, sean simétricos, de modo que al analizar las imágenes resultantes se aprecien directamente las diferencias existentes que existen entre unos nodos y otros. Los nodos de la malla que no tienen su simétrico son aquellos que van a reproducir las condiciones de la entalla particular, de modo que los nodos situados en la frontera de la entalla en unos casos se verán trasladados respecto su simétrico y en otros casos, en los que las entallas izquierda y derecha sean lo suficientemente diferentes, se hará necesaria una introducción de elementos adicionales para reproducir la forma específica de la entalla. En cualquier caso en cada probeta se estudiará su propio caso particular.
- > Los elementos utilizados son del tipo hexaedro (*Hex*) de 8 nodos. En algunos casos, y por causas debidas a las condiciones de diseño de la malla, los elementos se encuentran distorsionados pero aptos para el cálculo.

En cuanto al proceso de cálculo se seguirá el siguiente criterio de simetría tanto para los modelos utilizados a tracción como a flexión:

- > El principio de *Saint Venant* establece que la concentración de tensiones desaparece a pequeñas distancias, de modo que las probetas que se van a modelizar tienen una longitud de 25 mm. Estos 25 mm, no son aleatorios, sino que se corresponden con la medida de incremento de longitud que se lleva a cabo en los *brazos* o extremos del

extensómetro. La imposición de las condiciones de simetría reduce significativamente la geometría de la probeta, y por tanto permite un aumento significativo del número de nodos y elementos para definir la malla.

- > La probeta entallada es simétrica respecto a su sección transversal neta, ello permite reducir el problema de modo que los 25 mm longitudinales se pueden reducir a 12.5 mm imponiendo condiciones de simetría longitudinal en la probeta (Fig. 4.4).

El proceso de cálculo se divide en 200 incrementos (INC) guardando los datos en cada incremento de cálculo; esto será muy útil a la hora de conocer el estado tenso-deformacional de una probeta entallada en un instante dado del ensayo experimental (tracción ó flexión).

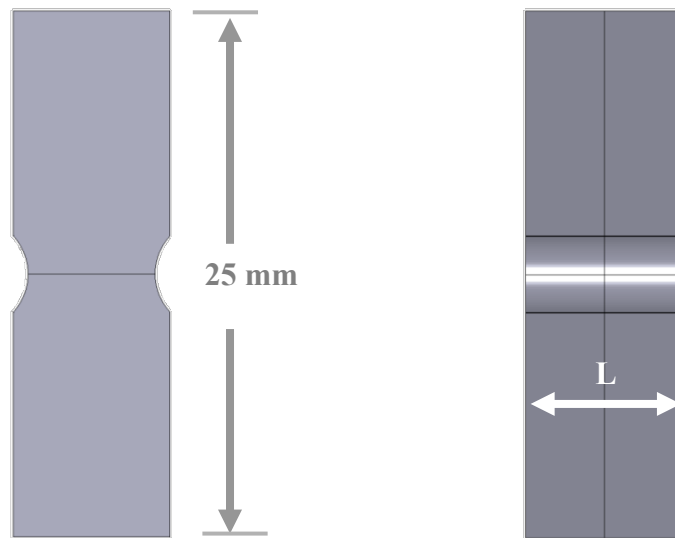


Fig. 4.4. Simetría longitudinal y transversal de la probeta.

La sección transversal de la probeta también se verá reducida a la mitad por condiciones de simetría como se aprecia en la Fig. 4.5 (simetría a lo largo de un plano longitudinal).

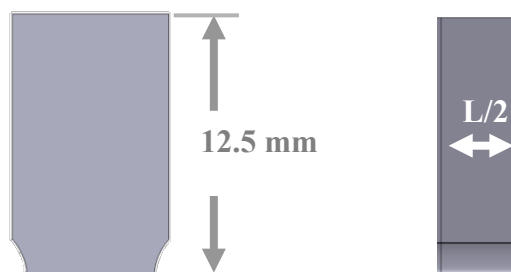


Fig. 4.5. Detalle de sección transversal de la probeta.

## 2.1. Análisis numérico de la muestra B0-AA

Los estudios del mallado realizados en trabajos anteriores [AYASO, 2001], se definen las densidades de mallado necesarias para garantizar la convergencia de la malla. En estos estudios se establece que con 488 elementos cuadriláteros de 4 nodos se garantiza la convergencia de la misma en las entallas Tipo A. Para el paso a escala tridimensional se toman de referencia estos valores y se genera una malla simétrica (Fig. 4.5) salvo en la zona de la entalla en la que se ha procedido a realizar una corrección en la posición de los nodos frontera de la entalla izquierda para adaptarla a la entalla real. La malla generada presenta 11270 elementos *Hex* de 8 nodos con un total de 13189 nodos analizados. En la Fig. 4.6 se presenta la imagen de la malla realizada para el cálculo. Así mismo en la Tabla 4.1 se presentan las dimensiones de las entallas que se han simulado en el ensayo por el MEF, como se puede verificar de la misma las entallas simuladas son exactas a las que se han obtenido experimentalmente.

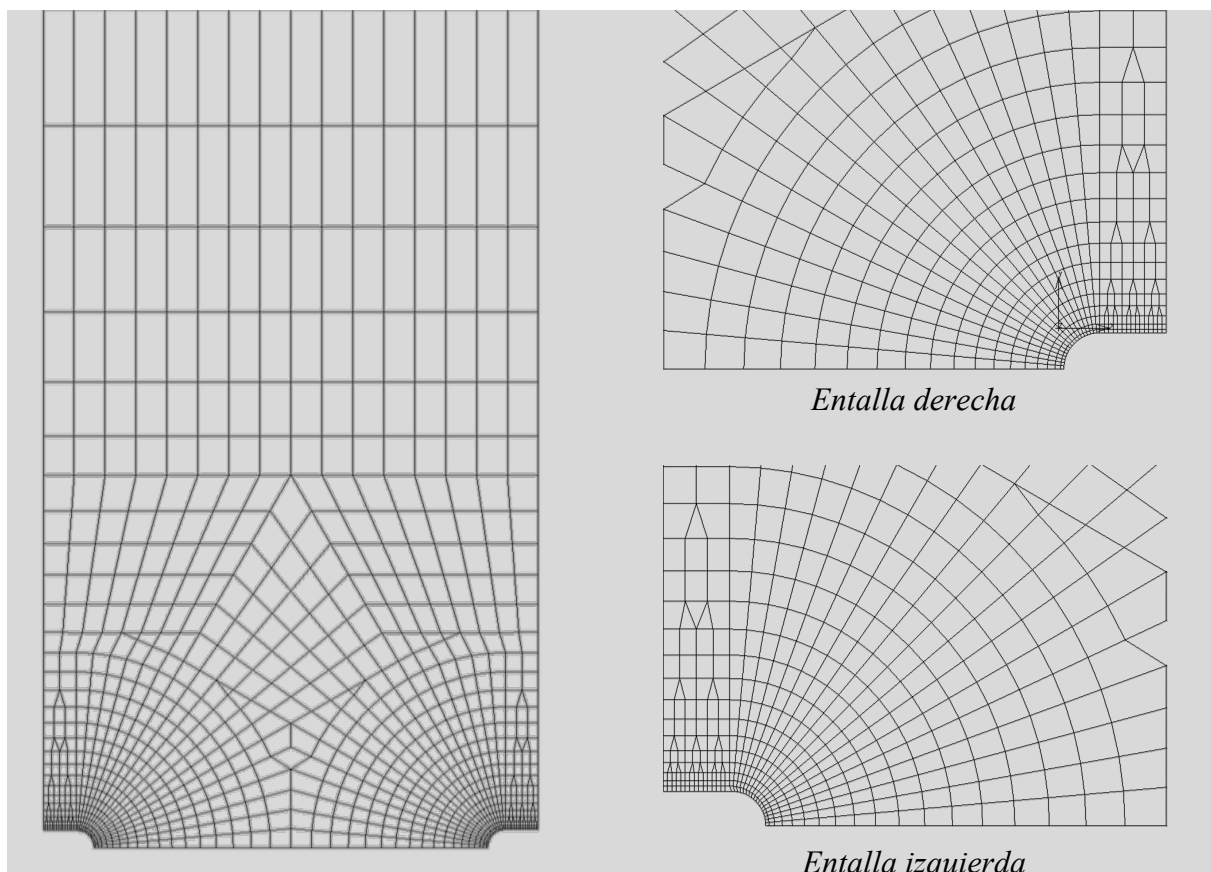


Fig. 4.6. Malla realizada para la probeta B0-AA.

En la gráfica de la Fig. 4.7 se representan los datos obtenidos en el proceso numérico (MEF) junto con los del ensayo experimental (EXP). En la misma se puede apreciar la fidelidad que

existe entre el comportamiento virtual y el experimental de la probeta B0-AA. Como se puede observar el instante de carga máxima coincide con el instante en el que se produce la rotura del material, por lo tanto para los análisis posteriores se simplifica el estudio de modo que sólo será necesario analizarlo en el último incremento (INC=200) del proceso de la simulación MEF. En cuanto a los datos del proceso de cálculo se ha obtenido lo siguiente: ratio de singularidad:  $3.8839 \cdot 10^{-13}$ , ratio de convergencia:  $2.316 \cdot 10^{-5}$ .

Tabla 4.1. Dimensiones características (mm) de las entallas de la probeta B0-AA (tómese como referencia la figura 2.3 de la presente Tesis).

Entalla	B0-AA	
Izquierda	$C_{Real} = 0.756$	$C_{MEF} = 0.756$
	$\xi_{Real} = 0.2515$	$\xi_{MEF} = 0.2515$
Derecha	$C_{Real} = 0.755$	$C_{MEF} = 0.755$
	$\xi_{Real} = 0.2650$	$\xi_{MEF} = 0.265$

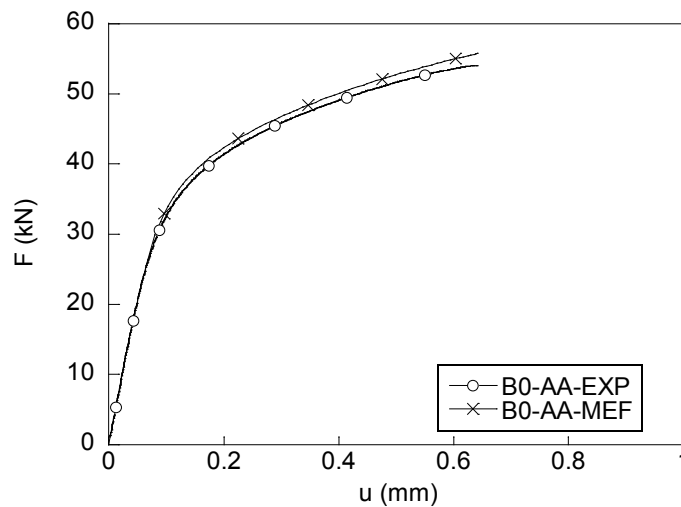


Fig. 4.7. Curva F-u experimental (EXP) vs simulación numérica (MEF); probeta B0-AA.

### 2.1.1. Deformación plástica equivalente

En este apartado de la Tesis se presentarán una serie de imágenes que corresponden a la secuenciación en la evolución de las diferentes variables analizadas durante el proceso de ensayo. Para ello se ha hecho uso de una visualización que responde a la probeta completa de cada una de las muestras analizadas. El ensayo por el MEF se ha dividido el tiempo de cálculo en un total de 200 incrementos (INC), ello permite el poder estudiar las distintas variables internas a lo largo de diversos instantes del ensayo mecánico correspondiente (ya sea de tracción o de flexión por cuatro puntos), prestando una especial atención al último

incremento de la simulación numérica (INC=200), por ser coincidente con la fractura final por separación total de superficies.

La simulación numérica del ensayo de tracción mediante MEF indica que en los primeros instantes de tracción la probeta concentra toda su deformación plástica en las zonas de las entallas, presentando una distribución semicilíndrica en torno a las mencionadas, cuyo radio se amplía ligeramente al llegar al borde exterior. A medida que aumenta el radio de análisis y por tanto el punto de vista se aleja de la zona de entalla, se observa una disminución progresiva de la deformación plástica.

En el transcurso del proceso de carga la deformación plástica adquiere una forma bilobulada centrada en la entalla y cuyo máximo se encuentra situado aproximadamente a 45 grados respecto al plano de entalla ó sección neta transversal (Fig. 4.8). Estos lóbulos presentan una geometría diferenciada a lo largo del plano perpendicular al plano de entalla, de modo que se observa una apertura de los mismos hacia el exterior de la probeta, refiriendo *el efecto de borde o frontera* que presenta esta zona y que concuerda exactamente con la variación de la deformación plástica a través del espesor del material a la que se refieren la mayoría de los autores de libros dedicados a la fractura de los medios materiales.

La zona de máxima deformación plástica se sigue localizando, durante el INC 100, medio del ensayo *real* de tracción, en el fondo de entalla y con una forma geométrica marcadamente semicilíndrica en torno a la misma. Las deformaciones plásticas máximas localizadas en la zona de entalla presentan un valor de 0.127 en el instante correspondiente al punto medio del ensayo de tracción.

A medida que avanza el proceso de carga se produce un crecimiento homotético de la forma bilobulada, de manera que los valores máximos de deformación van aumentando progresivamente, como se pone de manifiesto en la Fig. 4.9. Un proceso de entallado perfecto presentaría una tendencia en el crecimiento de los lóbulos que conduciría a una convergencia de los mismos en el eje de simetría, no siendo así el caso ensayado, donde las entallas no son completamente simétricas por causas debidas al proceso de mecanizado. Esta carencia de simetría se puede apreciar en las pequeñas diferencias que se observan tanto en la forma geométrica de los lóbulos, como en los valores de deformación plástica que se pondrán de manifiesto en secciones posteriores.

En el instante previo a la rotura, el material sigue concentrando su deformación plástica en la zona de la entalla (Fig. 4.9), con valores que oscilan entre máximos de 0.28 junto a la entalla y mínimos de  $4.5 \times 10^{-5}$  en las zonas más alejadas del perfil del fondo de entalla.

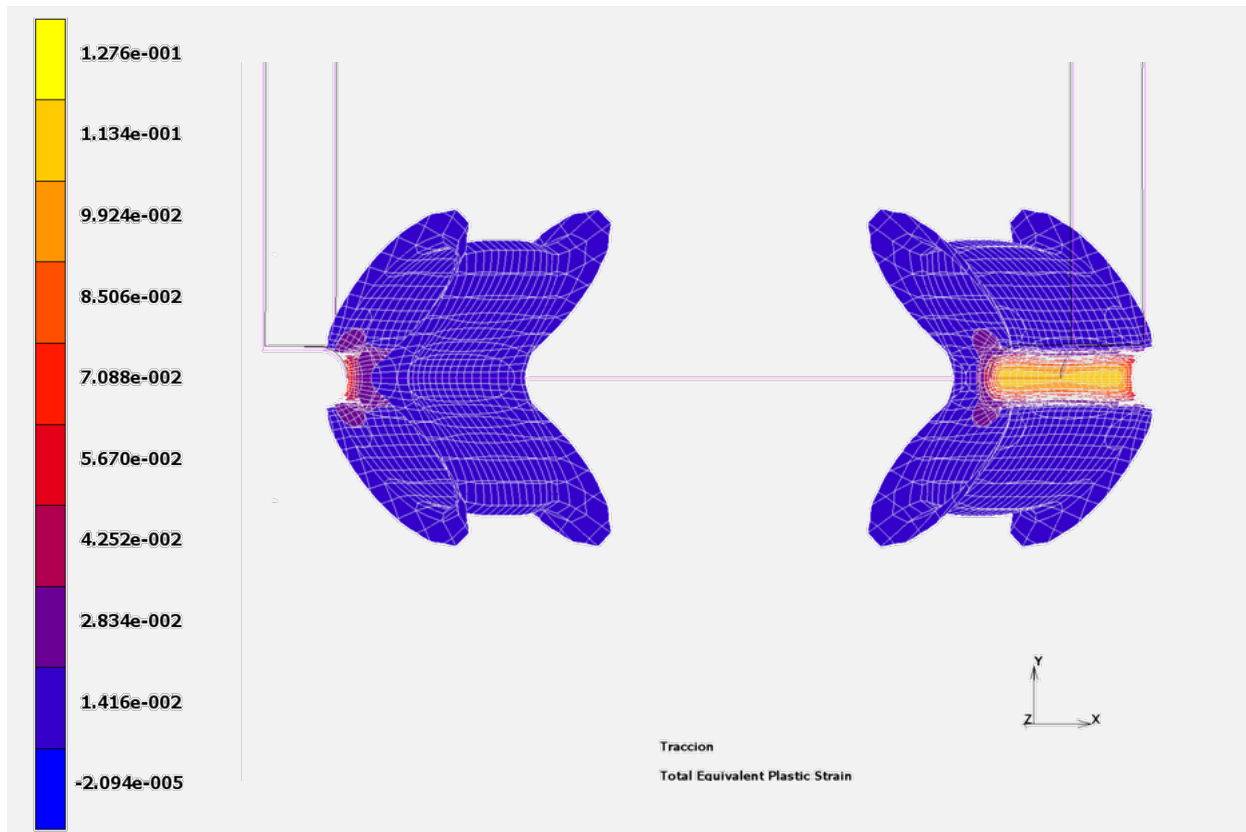


Fig. 4.8. Deformación plástica equivalente, INC n° 100, probeta B0-AA.

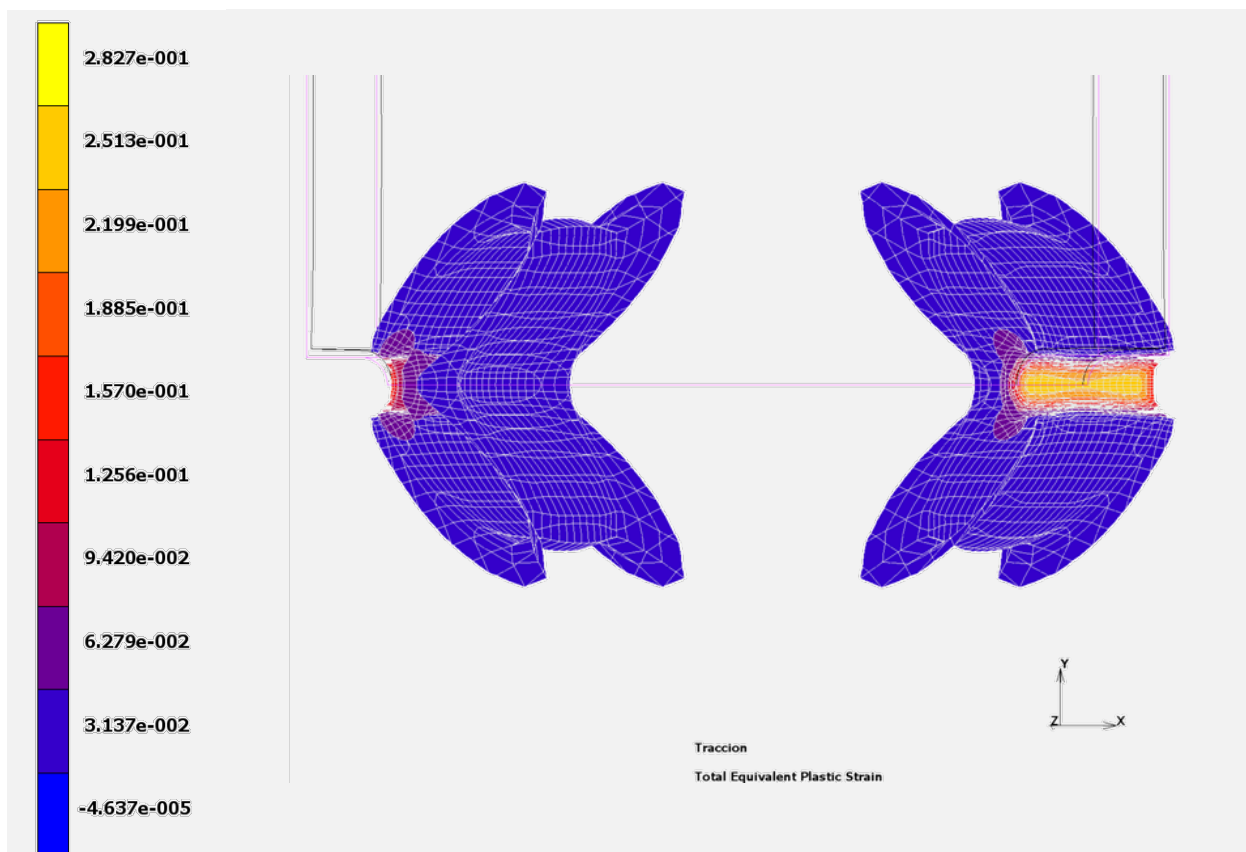


Fig. 4.9. Deformación plástica equivalente, instante previo a fractura, probeta B0-AA.



### 2.1.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

De un modo semejante a lo que previamente sucedió con la deformación plástica equivalente, el doble entallado tipo AA provoca que la distribución de la tensión equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ ) se manifieste en forma de lóbulos que crecen desde las entallas; estos lóbulos que en sus comienzos se originan formando aproximadamente  $45^\circ$  con el plano de entalla, a medida que avanza el ensayo tienden a ocupar un mayor espectro de ángulos, así como a presentar una convergencia en la sección media de la probeta (Fig. 4.10), salvo en aquellos que se presentan próximos al límite de probeta en los que aparecen de modo parecido pero únicamente con la mitad de la superficie lobular.

Para el caso de la tensión equivalente de von Mises, a diferencia de lo que sucediese con la deformación plástica equivalente, se ve claramente cómo, desde los primeros instantes de tracción, los lóbulos convergen en el centro (Fig. 4.10). En los límites de la probeta se aprecia una apertura de los lóbulos, así como una relajación tensional en aquellas zonas más externas.

Durante el progreso del ensayo los lóbulos aumentan progresivamente de tamaño hasta que convergen en el centro, una vez que convergen se disuelven en pos de la frontera de la probeta, donde se observan ya con tan sólo la mitad de su superficie.

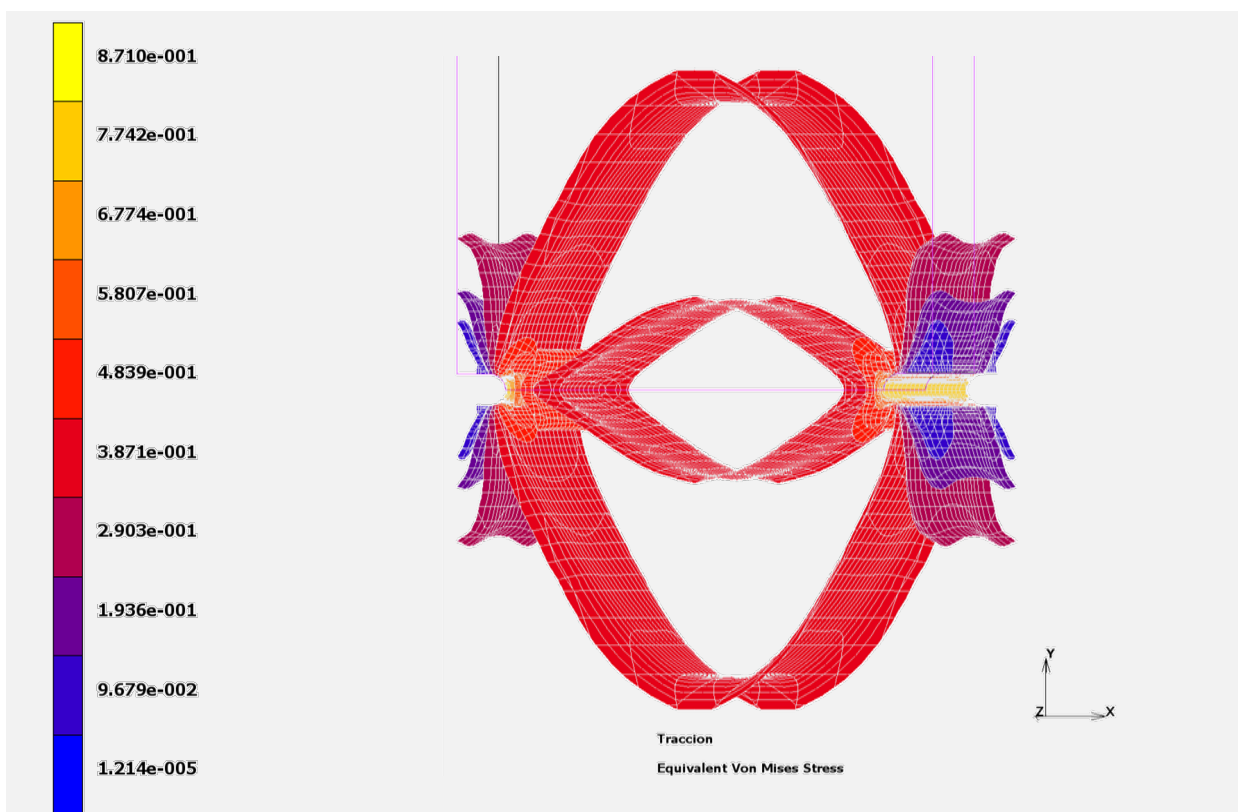


Fig. 4.10. Tensión equivalente de von Mises, probeta B0-AA (INC 15).

A medida que avanza el proceso de tracción se observa la formación de elipsoides prolatos en el plano de entalla (Fig. 4.11). Estas superficies se incuban en los bordes exteriores de la probeta y, a medida que avanza la sollicitación externa (ensayo de tracción), van aumentando de tamaño progresivamente hasta que ocupan prácticamente la totalidad de la sección. En la Fig. 4.11 se presentan los primeros instantes de la generación de los elipsoides (INC 102) en el plano de entalla, lo que se corresponde prácticamente con el punto medio del ensayo de tracción. La tensión alcanzada en ese instante en el fondo de entalla es de 1.33 GPa y la tensión de generación de los elipsoides es de 1 GPa aproximadamente.

La Fig. 4.12 muestra la distribución de la tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura del material (INC=200). La sección neta transversal de la probeta (fondo de entallas) no presenta una distribución homogénea a lo largo de la misma, sino que se observa una distribución de valores máximos de tensión en los puntos próximos a las entallas. La geometría de la distribución es semicircular en torno a la misma, mientras que en las zonas adyacentes pero ligeramente más separadas la geometría de la distribución adopta una forma geométrica lobular a 45° con el plano de entalla, al igual que en la distribución de la deformación plástica equivalente. El valor máximo de la tensión equivalente o efectiva de von Mises presente, en el instante previo a la rotura del material, es de 1.43 GPa, siendo el valor medio (en toda la sección neta) de 1.26 GPa.

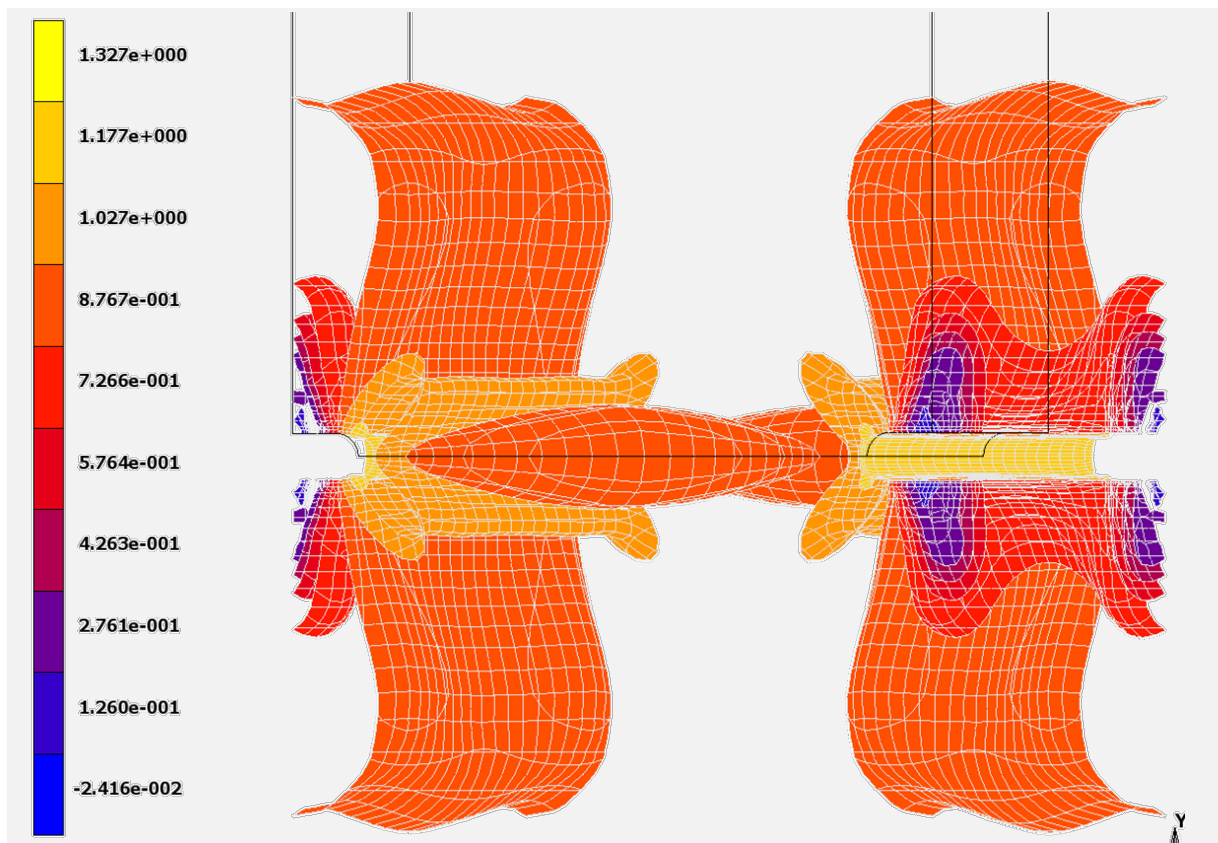


Fig. 4.11. Tensión equivalente de von Mises (INC 102), probeta B0-AA.

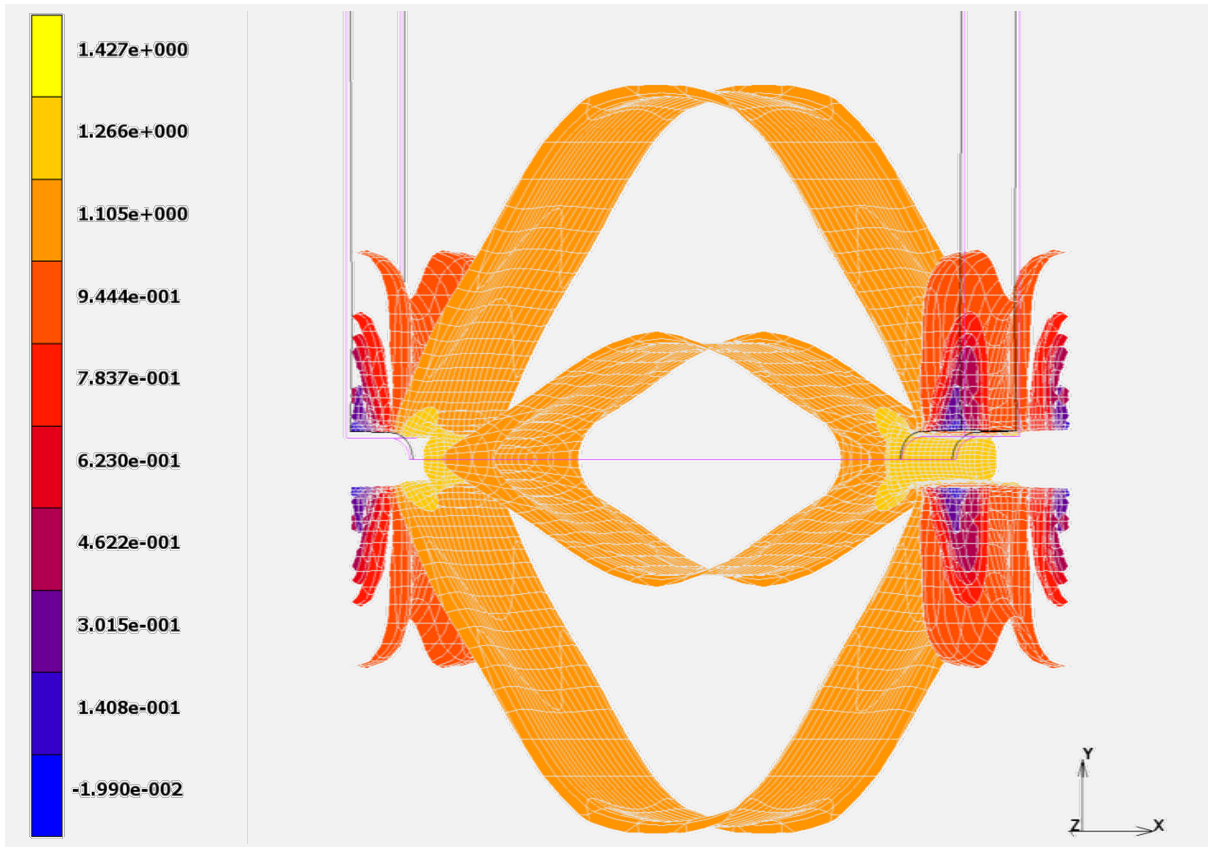


Fig. 4.12. Tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura (B0-AA).

### 2.1.3. Análisis de la sección de rotura

El estudio del plano de corte correspondiente a la sección de entalla (sección neta de la probeta considerada) deja una imagen que presenta ciertas características comunes con la fractografía de la propia probeta B0-AA (Fig. 4.13). Como se puede apreciar de la comparación entre la imagen que proporciona el MEF y la fractografía de la probeta, la ZPF (zona de proceso de fractura) se encuentra en una de las zonas que muestra un valor máximo de tensión equivalente o efectiva de von Mises. Se observa cómo el máximo tensional que predice el MEF se encuentra, en cuatro puntos, desplazado del centro de entalla y situándose en los tercios exteriores de la misma. Este hecho indica que en principio existen cuatro puntos posibles en los que ubicar la ZPF (Fig. 4.14). Esto puede ser indicativo de que cuando se ha iniciado el proceso de fractura por uno de los focos posibles se produce una liberación de tensiones en el resto de modo que no ha lugar a la formación de la ZPF en los otros tres posibles focos. Las imperfecciones en el mecanizado y en el propio material de ensayo en sí, provocan que el material muestre una única zona de proceso de fractura en lugar de las cuatro teóricas (*mecanismo del eslabón más débil*).

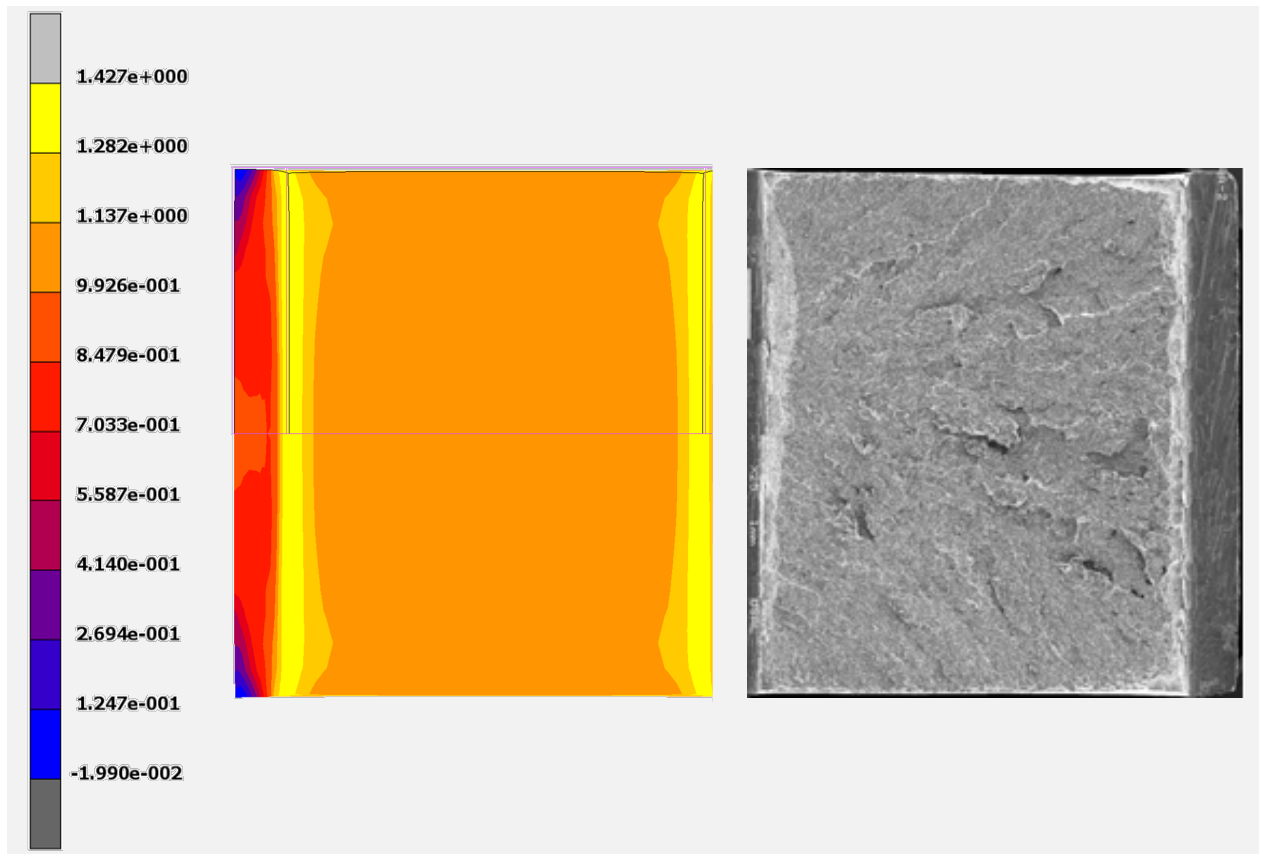


Fig. 4.13 Distribución de la tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura del material: sección de rotura, probeta B0-AA.

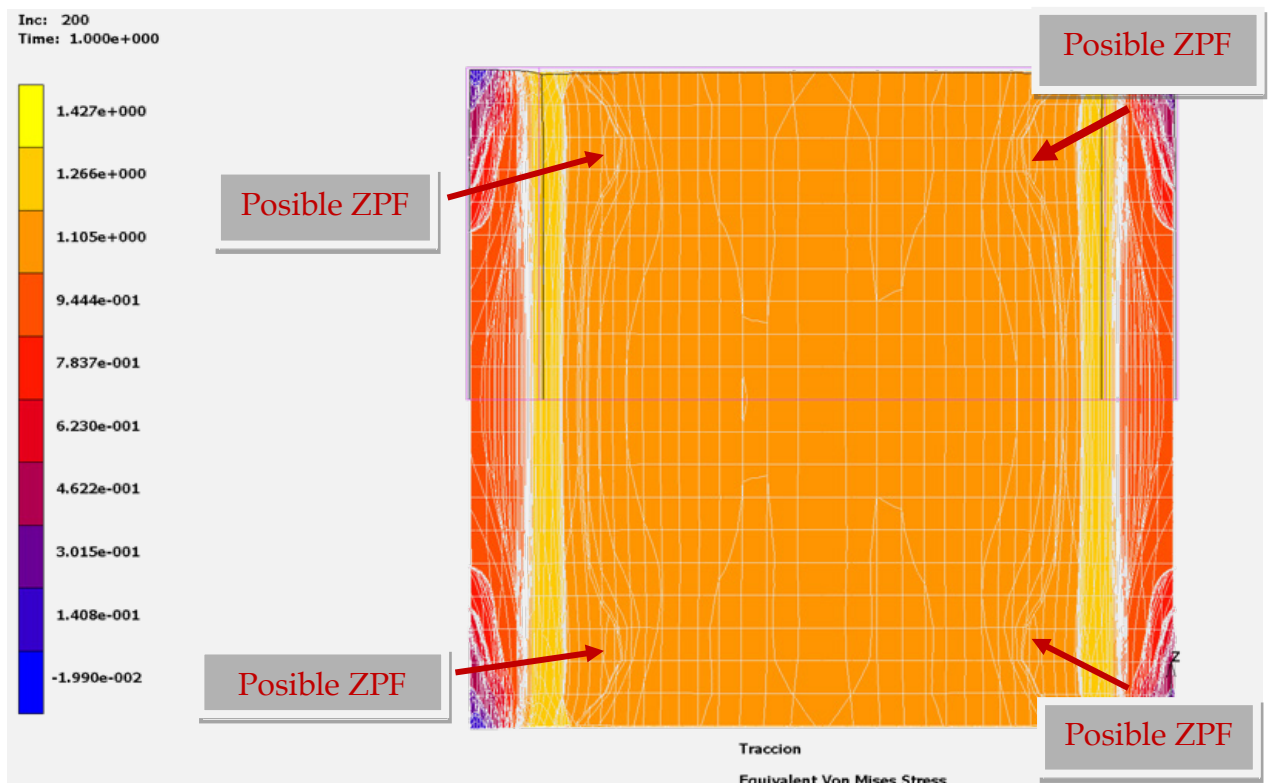


Fig. 4.14. Posibles puntos para la formación de la ZPF, sección neta de la probeta B0-AA.

2.1.4. Evolución de las variables internas en el fondo de entalla

En este apartado se realiza un análisis de la evolución de los parámetros característicos en los puntos medios o centrales de ambas entallas. Para ello se estudia la deformación plástica equivalente, la tensión equivalente o efectiva de von Mises, la tensión hidrostática, la triaxialidad tensional y el desplazamiento de los dos puntos correspondientes a la sección longitudinal central de la probeta y situados en cada fondo de entalla. La tensión hidrostática y el desplazamiento de los puntos centrales de ambas entallas, se han dejado para el Anexo II con el fin de que éste apartado se simplifique.

En la Fig. 4.15 se presenta la gráfica de la evolución de la deformación plástica equivalente en ambos *centros de entalla*. Como se puede observar, la deformación plástica equivalente mantiene en el proceso de carga un comportamiento lineal, presentándose en la entalla izquierda un comportamiento ligeramente más acusado que en la entalla derecha. Se puede observar también cual es el instante en que comienza a aparecer la deformación plástica en el fondo de entalla, mostrando hasta dicho instante un comportamiento elástico.

Las Figs. 4.16 y 4.17, representativas de la tensión equivalente o efectiva de von Mises así como de la triaxialidad tensional, indican que ambas entallas presentan el mismo tipo de conducta para cada una de las variables, siendo despreciables las diferencias observadas entre ambas; no obstante, se puede apreciar una mayor diferencia entre el comportamiento de ambas entallas en cuanto al factor de triaxialidad, fruto de la diferencia existente en la evolución de la tensión hidrostática.

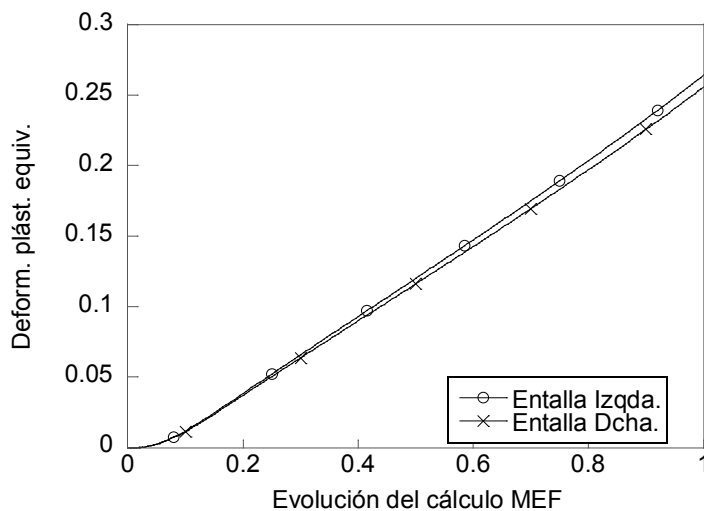


Fig. 4.15. Deformación plástica total equivalente a lo largo del ensayo bajo sollicitación de tracción: fondo de entalla, probeta B0-AA.

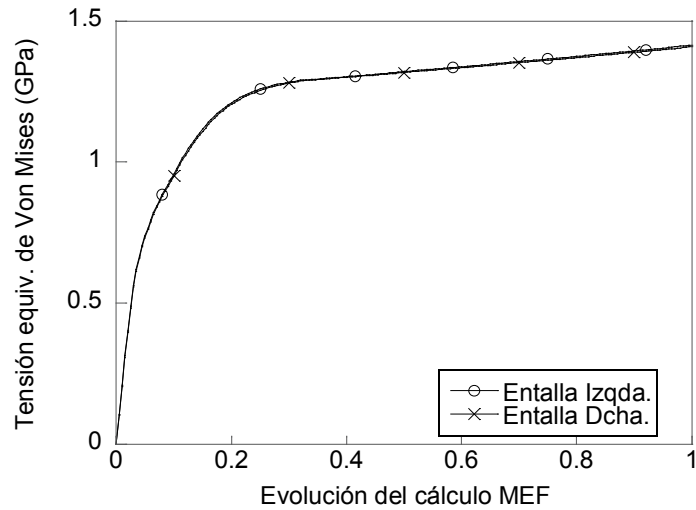


Fig. 4.16. Tensión equivalente de von Mises: fondo de entalla, probeta B0-AA.

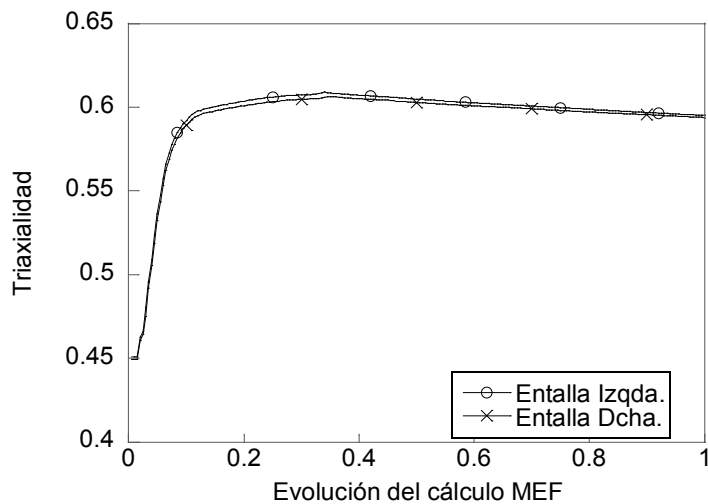


Fig. 4.17. Evolución de la triaxialidad: fondo de entalla, probeta B0-AA.

## 2.2. Análisis numérico de la muestra B4-AA

Las características del acero objeto de estudio en este apartado (acero B4: alambre de acero correspondiente al cuarto paso de trefilado) y la geometría de la probeta entallada (entalla tipo AA: pequeño radio y profundidad) conducen a la generación de una malla de 21584 nodos distribuidos en 19050 elementos de tipo *Hex* de 8 nodos por elemento. El análisis de convergencia implicaría, como en el caso anterior, dividir cada uno de los elementos en 16 elementos lo que supera con creces, como ya sucediese en el acero B0, la potencia de cálculo de que se dispone. Los estudios previos en entalla tipo A garantizan la convergencia con 488 elementos, de modo que se garantiza de por sí la convergencia.

La malla realizada utilizada para la simulación del ensayo de tracción es similar a la empleada en el acero B0, salvo las circunstancias particulares de la geometría que se ven reflejadas en la imagen de la Fig. 4.18, con gran densidad de elementos en la zona de entalla, con el fin de crear una buena definición de la misma, y una densidad progresivamente menor a medida que se alejan del fondo de entalla.

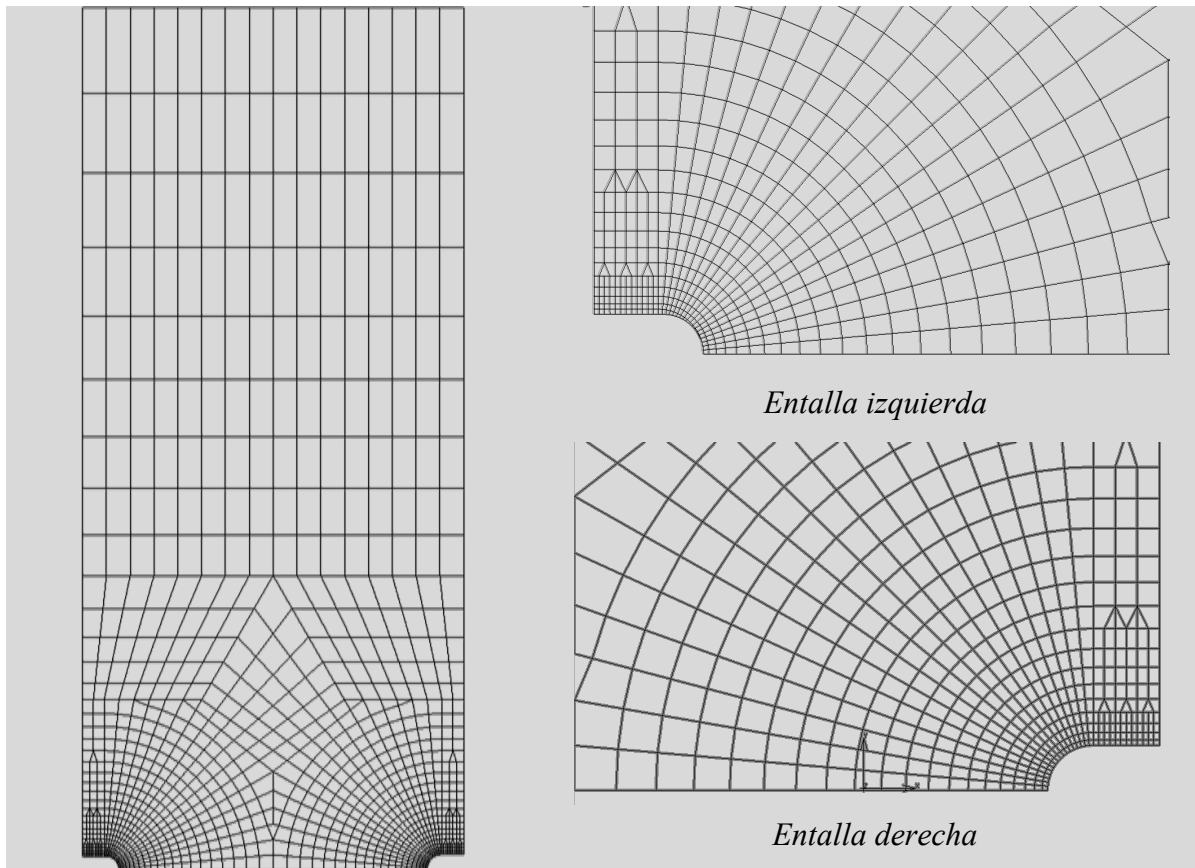


Fig. 4.18. Malla realizada para la simulación del ensayo de tracción de la probeta B4-AA.

Los detalles de verificación de la geometría de las dos entallas se presentan en la Tabla 4.2. Como se puede observar en la tabla, se presentan los valores reales y los utilizados para la simulación realizada por MEF. Como se puede apreciar, las dimensiones de la probeta simulada reproducen exactamente lo que se han medido en el laboratorio con la ayuda del proyector de perfiles.

En la Fig. 4.19 se presenta la curva de comportamiento de la carga frente al desplazamiento (curva  $F-u$ ) obtenida a partir del ensayo real ó experimental (EXP) y a partir del cálculo mediante el MEF. En dicha figura se puede ver la buena correspondencia existente entre ambas curvas, lo que lleva a deducir que el método de cálculo empleado ha sido el adecuado. En cuanto a los datos del proceso de cálculo se tiene: ratio de singularidad:  $7.3199 \cdot 10^{-13}$ , ratio de convergencia: 0.0001315.

Tabla 4.2. Dimensiones características (mm) de las entallas de la probeta B4-AA (Tómese como referencia la figura 2.3 de la presente Tesis).

Entalla	B4-AA	
Izquierda	$C_{Real} = 0.528$	$C_{MEF} = 0.528$
	$\xi_{Real} = 0.191$	$\xi_{MEF} = 0.191$
Derecha	$C_{Real} = 0.53$	$C_{MEF} = 0.53$
	$\xi_{Real} = 0.2165$	$\xi_{MEF} = 0.2165$

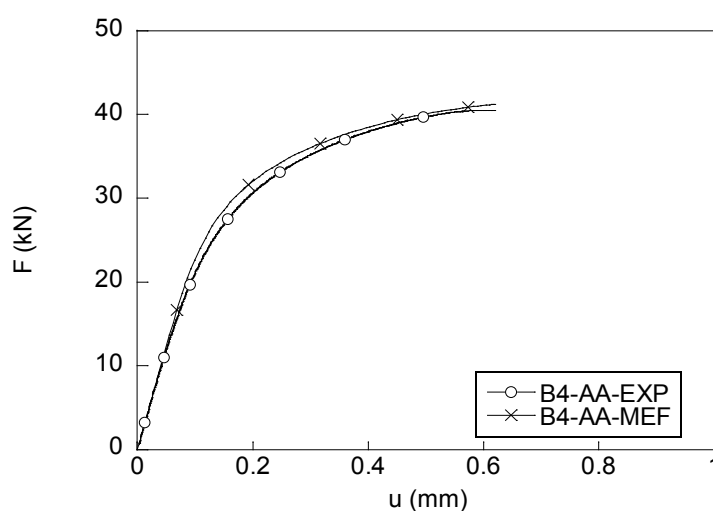


Fig. 4.19. Curva comparativa entre el ensayo de tracción real de la probeta B4-AA y la simulación por elementos finitos.

### 2.2.1. Deformación plástica equivalente

El comportamiento de la deformación plástica total equivalente es semejante al que se ha obtenido para la probeta B0-AA lo que en principio sería indicativo de que el comportamiento interno de la deformación plástica equivalente viene marcado, sobretudo, por la forma física de la geometría de la probeta. La deformación plástica aparece en los primeros instantes del ensayo, localizándose en las zonas del material que circundan a las entallas, presenta una forma de crecimiento bilobulada, a medida que avanza el proceso de ensayo. Esta forma bilobulada se dibuja a 45° con el plano de entalla. En aquellas zonas del material que se encuentran próximas a los bordes de la probeta, se observa una apertura de los lóbulos hacia el exterior, remarcando la condición de frontera que se presenta en esta zona.

En el último instante del ensayo de tracción (Fig. 4.20), la probeta B4-AA presenta una zona afectada por la deformación plástica equivalente mayor que la observada en la probeta B0-



AA, con valores que oscilan entre los 0.82 en el borde de la entalla y los  $-0.35 \cdot 10^{-3}$  en las zonas externas, difiriendo así de aquellos encontrados en la probeta B0-AA, los cuáles oscilaban entre los 0.28 en el borde de la entalla y los  $0.46 \cdot 10^{-4}$  en los lóbulos exteriores.

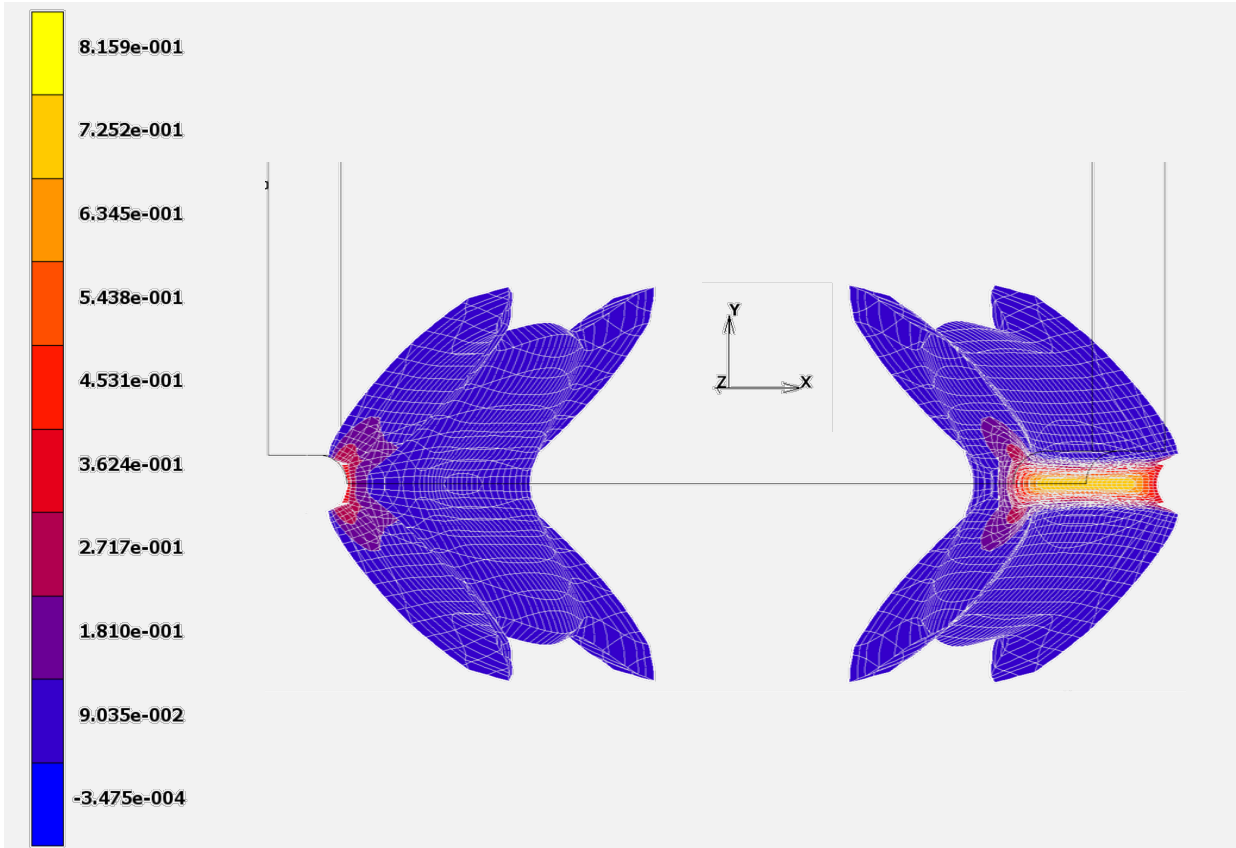


Fig. 4.20. Deformación plástica equivalente, (INC 200), de la probeta entallada B4-AA.

### 2.2.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

Analizando el comportamiento de la tensión equivalente de von Mises de la probeta B4-AA con respecto a la probeta B0-AA se observan unas ligeras diferencias que se manifiestan en una mayor zona afectada por dicha tensión en lo que al plano de entalla o sección neta de la probeta se refiere (sección transversal mínima que pasa por el fondo de las entallas).

En la Fig. 4.21 se presenta la imagen tridimensional correspondiente a las tensiones equivalentes de von Mises en el instante previo a la rotura del material, que como se puede observar es significativamente diferente a la obtenida en la probeta B0-AA (Fig. 4.12). En ella se observa cómo toda la sección del plano de rotura se encuentra con máximos valores de tensión, llegando estos a 1.53 GPa. Como se puede apreciar en la imagen, aparte de la sección de entalla, existe una gran parte de la probeta que presenta valores máximos de tensión, como lo demuestran los campos tensionales que se observan en la parte superior e inferior de la

imagen. Las zonas de menor valor de tensión equivalente de von Mises se encuentran en los vértices o esquinas (en los flancos) de las entallas.

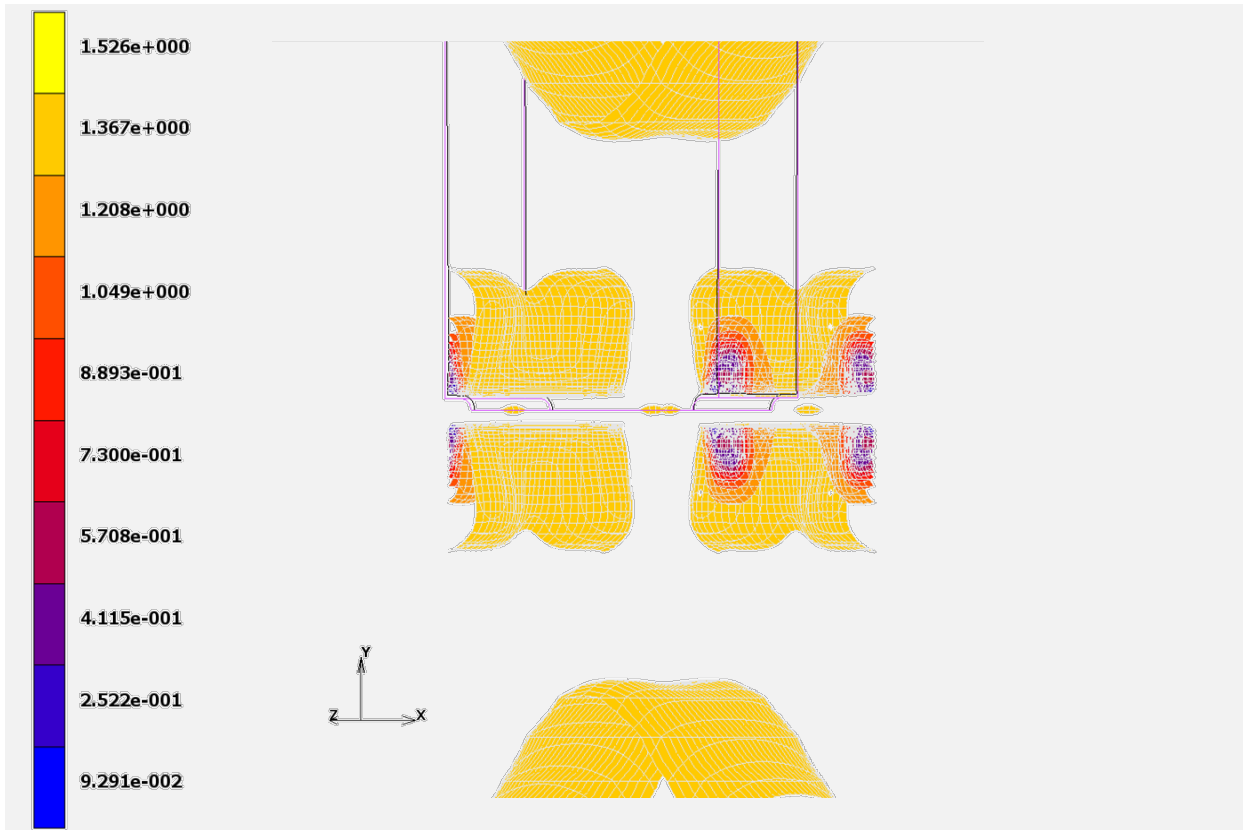


Fig. 4.21. Tensión equivalente de von Mises; instante previo a la rotura; probeta B4-AA.

### 2.2.3. Análisis de la sección de rotura

En la Fig. 4.22 se ha hecho una corrección de color sobre la fractografía MEF de la superficie de fractura de la probeta B4-AA, con el fin de que se pongan de manifiesto las trazas de las superficies con el plano de entalla. En ella se observa cómo la totalidad de la sección de rotura de la probeta presenta valores máximos (y constantes en toda ella) de la tensión equivalente o efectiva de von Mises  $\bar{\sigma}$ ; esto es indicativo de que la fractura podría iniciarse en cualquier punto de la sección de entalla de la probeta.

Las trazas de las superficies con el plano de entalla adoptan una forma semi-ovalada en la sección de entalla, no definiendo en ningún punto concreto una posible ZPF salvo, quizás, en las zonas situadas en los bordes exteriores de la probeta junto a la entalla, donde se observa una elevada concentración de trazas. Estas elevadas zonas de concentración se extienden a lo largo del plano perpendicular a la sección de rotura, lo que podría ser indicativo de que la fractura pudiese originarse en este plano.

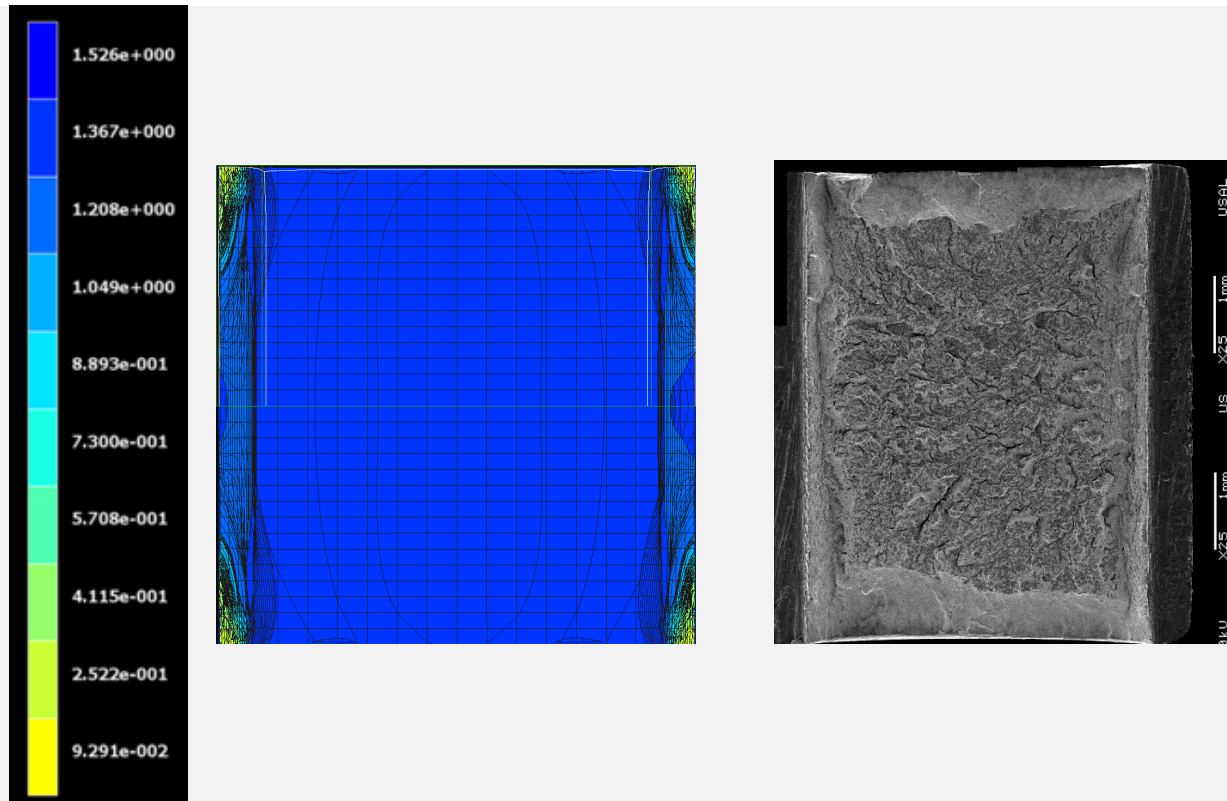


Fig. 4.22. Sección de rotura: distribución de  $\bar{\sigma}$  vs fractografía de la probeta B4-AA. Corrección de color realizada sobre la obtenida por el MEF.

#### 2.2.4. Evolución de las variables internas en el fondo de entalla

En la Fig. 4.23 se presenta la evolución del valor de la deformación plástica equivalente de las entallas izquierda y derecha para la probeta B4-AA. En la gráfica se observa que el comportamiento de ambas entallas es igual, estableciéndose en ellas un crecimiento prácticamente exponencial de la deformación plástica a medida que avanza el ensayo de tracción. Aunque de valor discreto, existe un ligero incremento (pero despreciable) de la deformación plástica en la entalla izquierda con respecto a la entalla derecha.

El comportamiento de ambas entallas con respecto a la tensión equivalente de von Mises y la triaxialidad es el mismo (Figs. 4.24 y 4.25), presentándose en todo el dominio del ensayo la misma distribución en ambas entallas. Durante los primeros instantes de carga (INC 0  $\rightarrow$  INC 40) es cuando el material experimenta el mayor incremento tensional, tal y como se pone de manifiesto en la pendiente de ambas curvas en ese intervalo. A partir aproximadamente del 30% del ensayo (0,3 en la abscisa de la Fig. 4.24) se produce una estabilización del valor de la tensión equivalente o efectiva de von Mises, la cual se mantiene hasta alcanzar el instante de rotura final de la probeta, este hecho induce su correspondiente en el factor de triaxialidad.

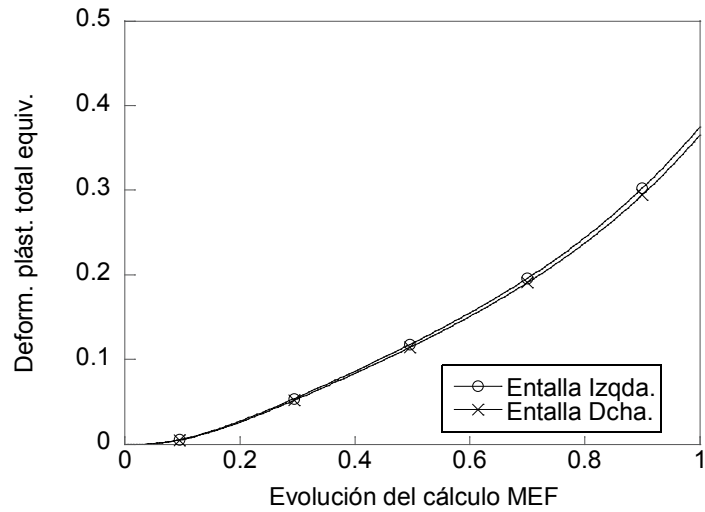


Fig. 4.23. Deformación plástica total equivalente en el fondo de las entallas, probeta B4-AA.

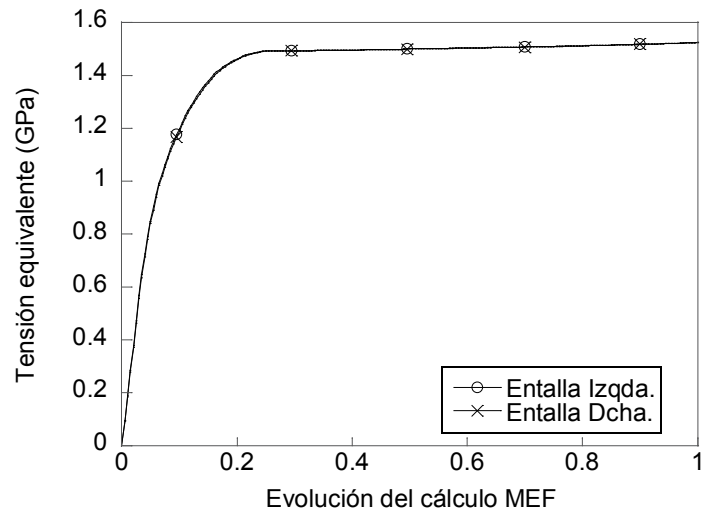


Fig. 4.24. Tensión equivalente de von Mises en el fondo de las entallas, probeta B4-AA.

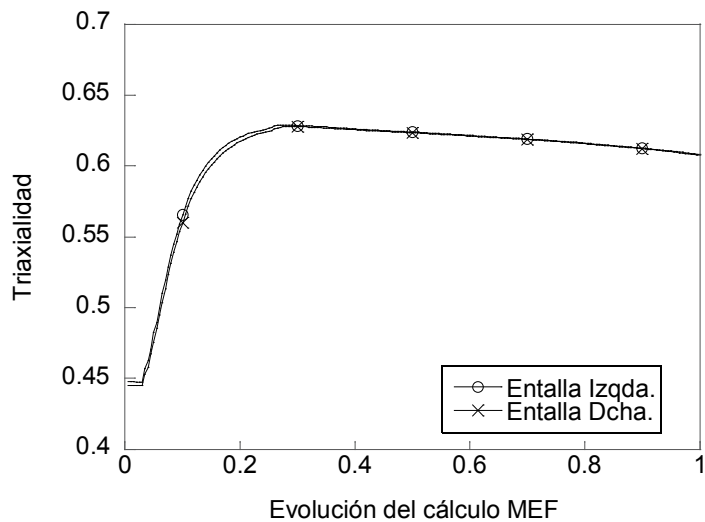


Fig. 4.25. Evolución de la triaxialidad en el fondo de las entallas, probeta B4-AA.

### 2.3. Análisis numérico de la probeta B7-AA

El diseño de malla para la probeta B7-AA se presenta en la Fig. 4.26. Se trata de una malla formada por 23275 nodos distribuidos en 20664 elementos de tipo *Hex* con 8 nodos. En la malla de esta probeta ha sido necesaria la introducción de una línea auxiliar de elementos en la entalla izquierda, como queda patente en la imagen, con el fin de diseñar exactamente ambas entallas. Las diferencias debido al mecanizado en las dimensiones de las dos entallas de la probeta se presentan en la Tabla 4.3 y han sido reflejadas en la malla correspondiente, donde se observa la existencia de una línea de elementos auxiliares con el fin de definir exactamente las entallas. Con relación a los datos del proceso de cálculo, se ha obtenido lo siguiente: ratio de singularidad:  $9.2746 \cdot 10^{-13}$ , ratio de convergencia:  $1.704 \cdot 10^{-5}$ .

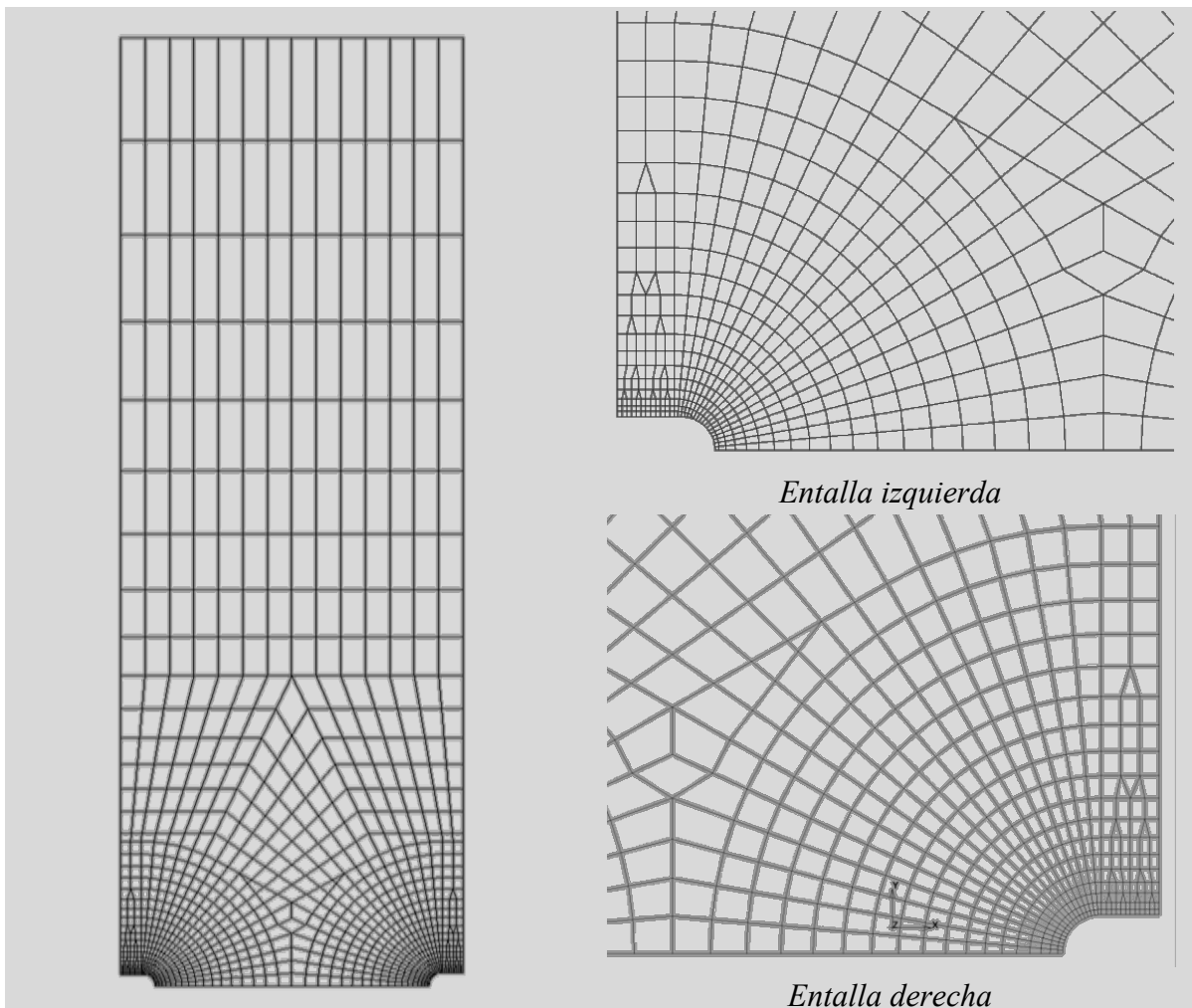


Fig. 4.26. Malla de la probeta representativa de la muestra B7-AA.

La curva carga-desplazamiento (curva  $F-u$ ) simulada por elementos finitos del acero B7 se presenta ligeramente por encima de la curva que se obtiene en el ensayo de tracción experimental (Fig. 4.27). Esta característica se ha encontrado ya en anteriores estudios realizados sobre este tipo de acero, como el que se observó en el análisis realizado también mediante el MEF para el estudio de probetas entalladas axisimétricas con simetría de revolución (AYASO, 2001).

Tabla 4.3. Dimensiones características de las entallas de la probeta B7-AA (Tómese como referencia la figura 2.3 de la presente Tesis).

Entalla	B7-AA	
Izquierda	$C_{Real} = 0.435$	$C_{MEF} = 0.435$
	$\xi_{Real} = 0.1485$	$\xi_{MEF} = 0.1485$
Derecha	$C_{Real} = 0.429$	$C_{MEF} = 0.429$
	$\xi_{Real} = 0.1735$	$\xi_{MEF} = 0.1735$

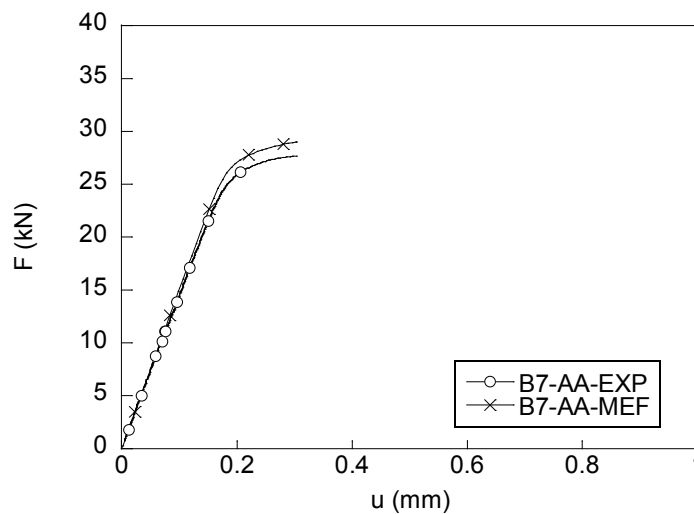


Fig. 4.27. Curva comparativa entre el ensayo de tracción en la probeta física B7-AA y la probeta simulada mediante MEF.

### 2.3.1. Deformación plástica equivalente

El comportamiento de la probeta B7-AA respecto a la deformación plástica equivalente total es semejante al encontrado en las probetas mecanizadas a partir de los aceros B0 y B4, siendo éste ligeramente más cercano a la probeta B0-AA que a la B4-AA. En los primeros instantes

de carga se observa cómo la probeta no presenta deformación plástica como consecuencia de que permanece en ella el régimen elástico, tras el cual se observa como en el caso de las probetas mecanizadas a partir de acero B0 y B4, la generación de geometrías de apariencia lobulada situadas a aproximadamente  $45^\circ$  con respecto al plano transversal que contiene a la sección mínima de la probeta (sección transversal a fondo de entalla ó sección neta). A medida que los lóbulos se aproximan a las paredes verticales de la probeta experimentan un aumento de tamaño, siendo esta característica indicativa, como en casos anteriores, del efecto de frontera o de borde que tiene lugar en esta zona.

En el transcurso del ensayo se observa un crecimiento homotético de las formas bilobuladas llegando a alcanzar, en los últimos instantes de carga previos a la rotura del material, valores que oscilan entre los  $2.605 \times 10^{-1}$  de los puntos materiales situados en el fondo de entalla hasta los  $-3.152 \times 10^{-5}$  en los puntos más alejados, tal y como se puede observar en la imagen de la Fig. 4.28 en la que se presenta la evolución de la deformación plástica en el instante previo a la rotura del material por separación total de superficies. No obstante, se observa que estos no presentan un carácter tan marcadamente extendido como el que se manifestara en el caso de la probeta B4-AA.

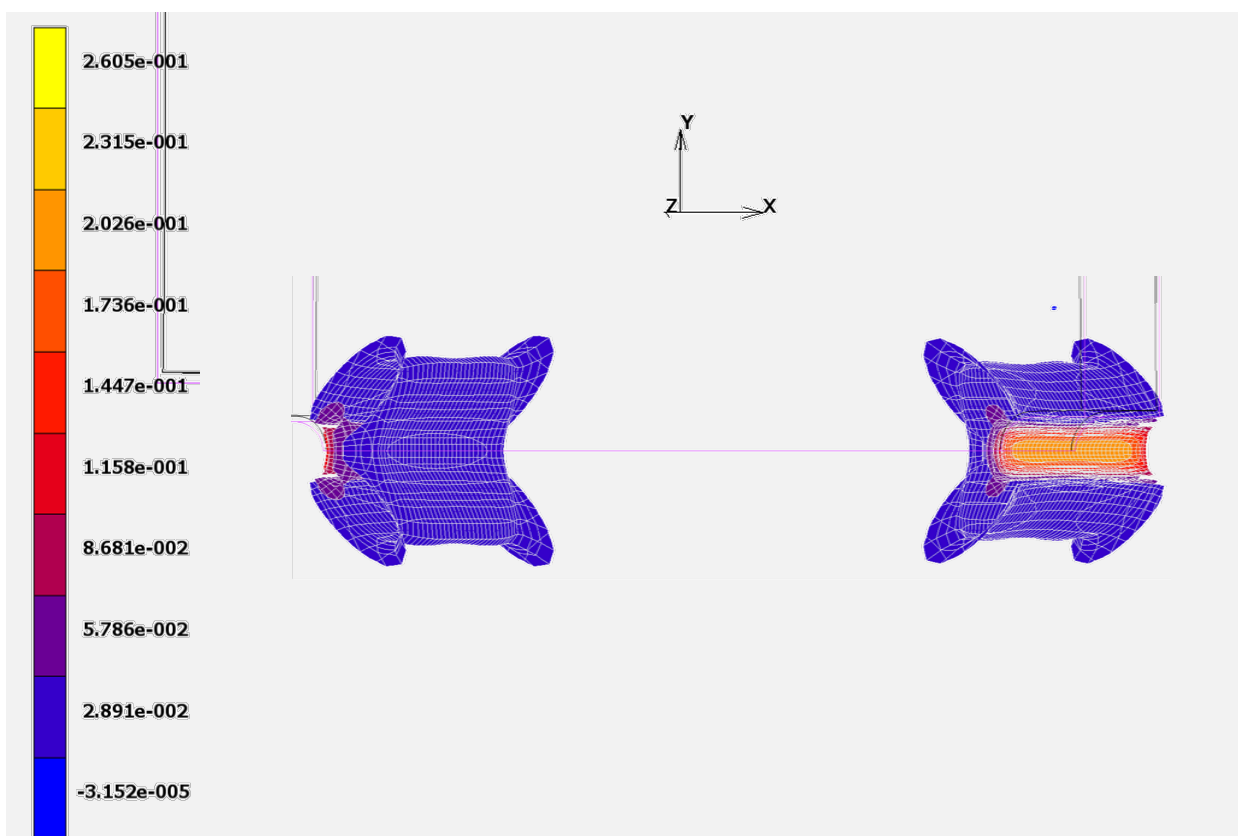


Fig. 4.28. Deformación plástica equivalente, instante previo a la fractura, probeta B7-AA.

### 2.3.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

La distribución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises que muestra la probeta B7-AA presenta una evolución semejante al que presenta la probeta mecanizada a partir del acero B0 (probeta B0-AA). Se parte de una distribución tensional de crecimiento lobular distribuido a 45° con respecto a la sección de entalla y, al igual que sucedía con la deformación plástica equivalente, a medida que avanza el ensayo se produce un crecimiento homotético de las formas, pero en este caso, los lóbulos se interceptan aproximadamente en el centro de entalla (en función de la asimetría de las entallas) fundiéndose y alzándose en sentido perpendicular (eje Y) hasta disiparse en los bordes exteriores de la probeta. En la Fig. 4.29 se recoge un encuentro característico de las superficies lobulares que ha tenido lugar en el INC 70 (sobre un total de 200) del cálculo.

En el instante previo a la rotura del material (Fig. 4.30) se aprecia cómo la mayoría de los lóbulos han adquirido los valores correspondientes a la máxima tensión y, por tanto, toda la sección de material que circunda las entallas se encuentra sometida a tensiones próximas a 1.87 GPa. En la imagen también se contempla la caída tensional que se observa en los bordes exteriores de las entallas que por tanto, se ven preservados, presentando los valores mínimos de la tensión equivalente o efectiva de von Mises.

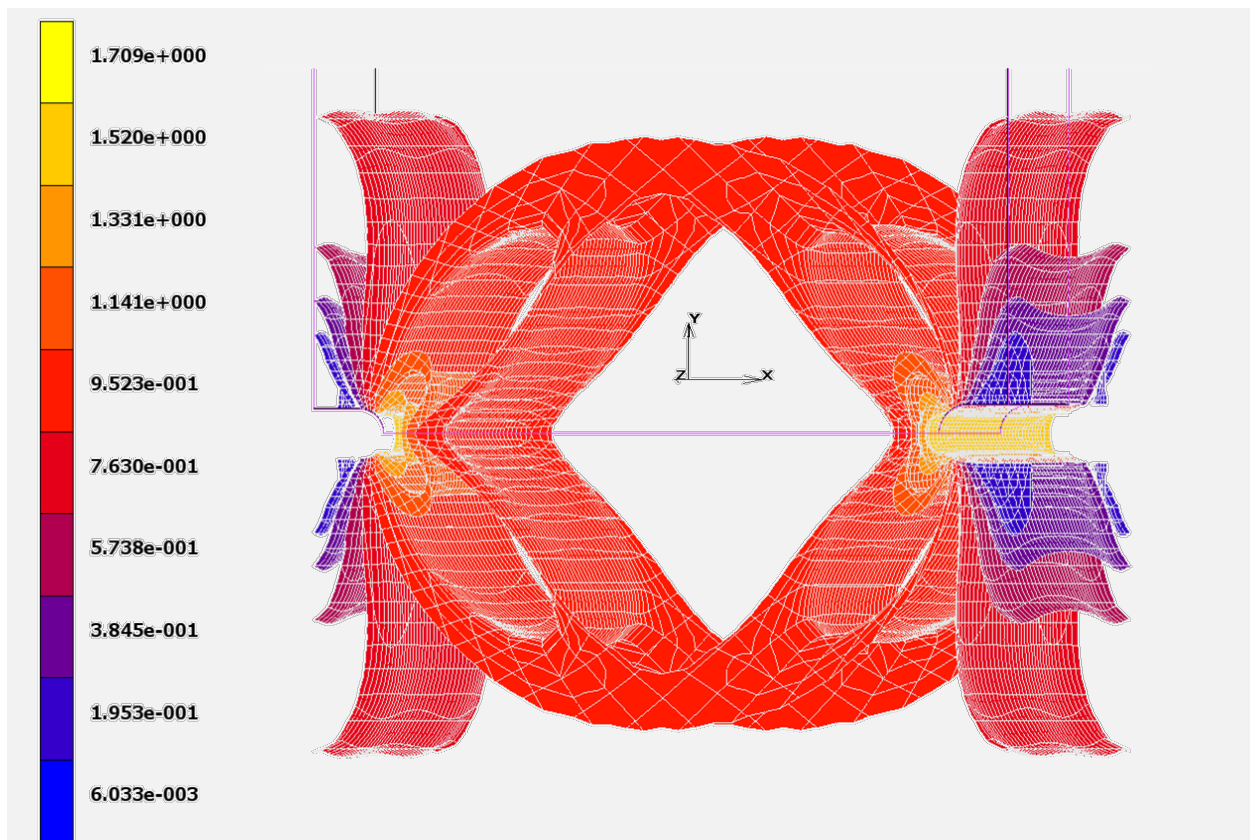


Fig. 4.29. Tensión equivalente de von Mises en el INC 70, probeta B7-AA.



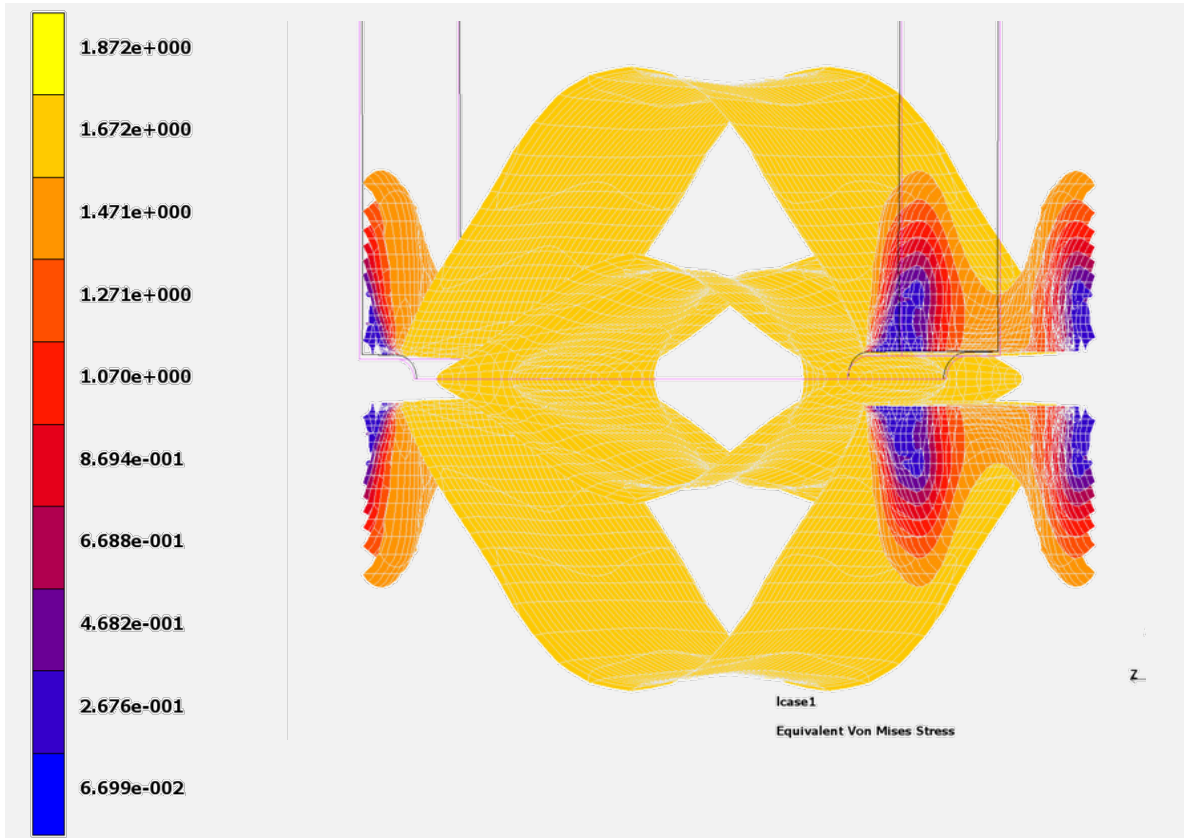


Fig. 4.30. Tensión equivalente de von Mises en el INC 200, probeta B7-AA.

### 2.3.3. Análisis de la sección de rotura

La imagen comparativa entre la sección de rotura engendrada por MEF y la obtenida en el ensayo de tracción se muestra en la Fig. 4.31 (como en el caso anterior ha sido necesaria una corrección de color con el fin de hacer visibles las isosuperficies). Como se puede observar, los valores máximos de la tensión equivalente de von Mises  $\bar{\sigma}$  se encuentran distribuidos masivamente a lo largo de toda la sección de rotura. El comportamiento de la tensión equivalente de von Mises, en la sección de rotura de la probeta, es semejante al que se obtenía en la probeta B0-AA, con la salvedad de que en la probeta prismática entallada mecanizada a partir del acero B7 (B7-AA) se acentúan los detalles, como se observa en un análisis minucioso de las trazas de las superficies de tensión constante con el plano de entalla.

Las trazas de las superficies de tensión constante con el plano de entalla generan secciones que definen unas formas geométricas que concuerdan claramente con el perfil fractográfico característico que han presentado las probetas B7-AA, con un matiz claro de separación entre las zonas de máximo gradiente de trazas (junto a la entalla) y una zona de cambio en la que se presentan distribuciones radiales a los campos tensionales que se definen en esa zona. En la fractografía ha quedado establecido que sólo una entalla ha sido decisiva en la fractura final.

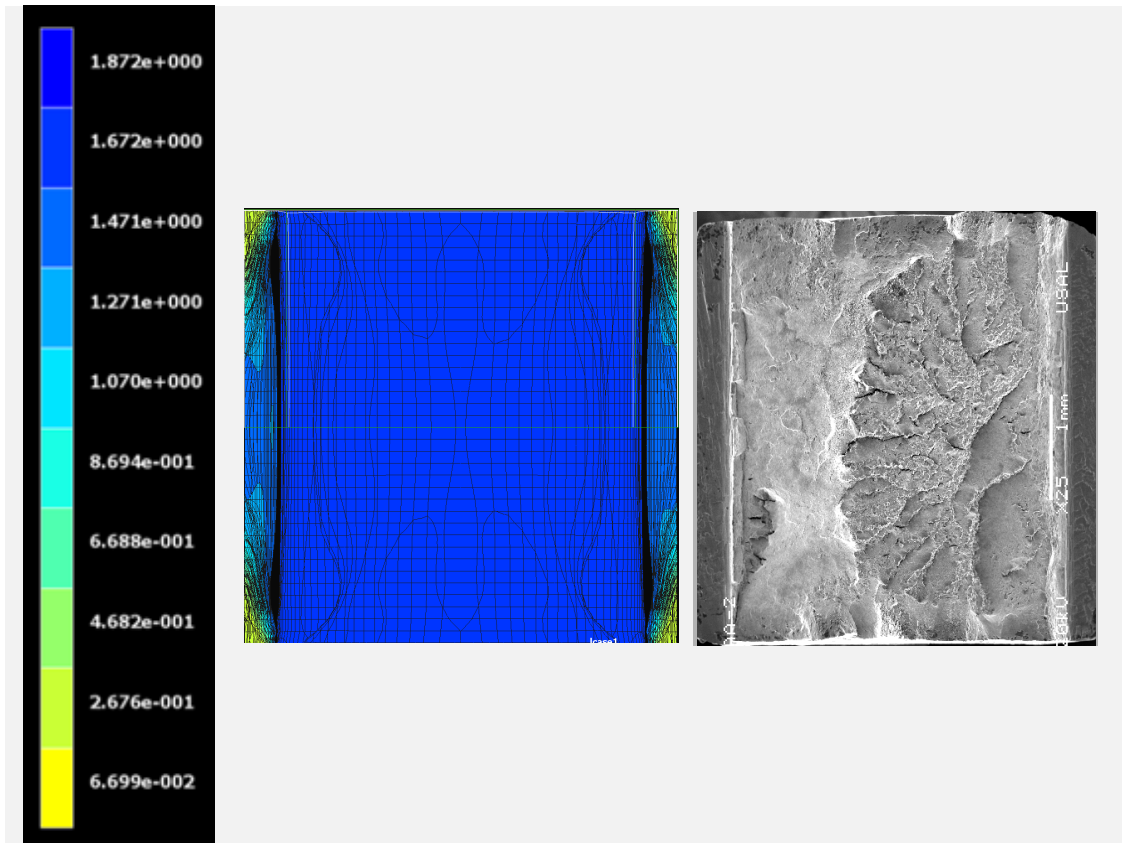


Fig. 4.31. Distribución de la tensión equivalente de von Mises (previo fractura final) vs fractografía: probeta B7-AA (Corrección de color).

#### 2.3.4. Evolución de las variables internas en el fondo de entalla.

El análisis, en el fondo de las dos entallas de la probeta B7-AA, referente a la deformación plástica equivalente presenta la curva de comportamiento que se muestra en la gráfica de la Fig. 4.32. En la figura se puede apreciar cómo ambas entallas presentan un comportamiento semejante. Hasta aproximadamente un 20% del ensayo todo el material de la probeta se encuentra en el estado elástico, puesto que no se observa deformación plástica alguna en la entalla izquierda ni en la derecha. A medida que avanza el ensayo se ve como la deformación plástica equivalente presenta una evolución creciente, pudiéndose dividir en dos tramos prácticamente lineales: el primero, que se establece entre el 20% y el 50% del ensayo, con una tasa de variación menor; y el tramo posterior en el que se observa una evolución más rápida de la deformación plástica equivalente con una pendiente más acusada. A pesar de que ambas entallas presentan un comportamiento semejante se observa un mayor valor de la deformación plástica en la entalla izquierda que en la entalla derecha, siendo estas diferencias producto de las pequeñas diferencias existentes entre ambas entallas por culpa del mecanizado (cabe recordar una vez más que dichas diferencias fueron reflejadas en la correspondiente malla de elementos finitos).

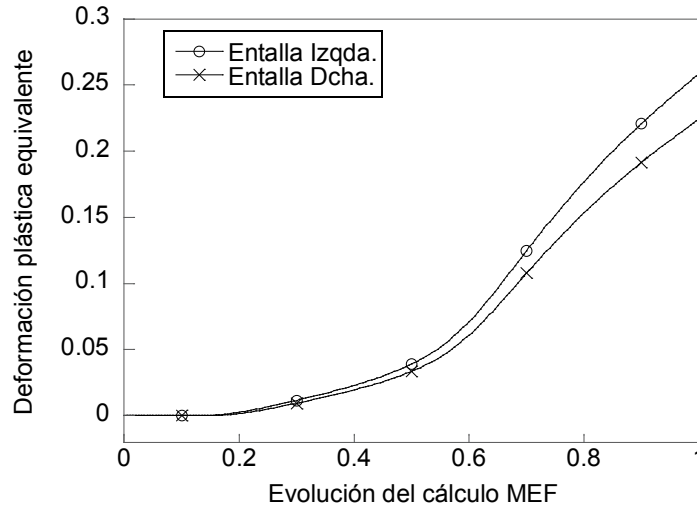


Fig. 4.32. Deformación plástica total equivalente en el fondo de entalla, probeta B7-AA.

Para visualizar el comportamiento frente a la tensión equivalente de von Mises de los nodos situados en la zona central de la entalla durante el ensayo se presenta la gráfica de la Fig. 4.33, La gráfica indica que el estado tensional es prácticamente idéntico en ambas entallas, en ellas se observa que la tensión crece de modo muy acusado durante el 20% inicial del ensayo, luego durante un 10% de ensayo presenta un comportamiento estable para luego aumentar ligeramente durante el 30% siguiente del ensayo donde alcanza un estado tensional que va a tener hasta el final del ensayo (fractura).

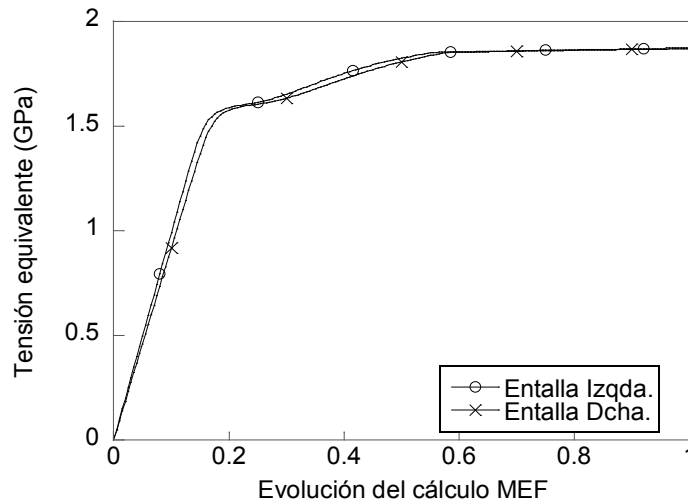


Fig. 4.33. Tensión equivalente de von Mises en el fondo de entalla para la probeta B7-AA.

Al igual que sucede con la tensión equivalente o efectiva de von Mises, el análisis de la evolución de la tensión hidrostática en ambas entallas es en esencia el mismo. Los datos obtenidos para la tensión equivalente de von Mises, no son excesivamente reveladores en cuanto a poder establecer cuál de las entallas sería la más activa (la entalla a partir de la cual

comenzará la fractura por concentrar tensiones en mayor cuantía). En principio parece que la entalla que sufre mayor nivel tensional es la situada a la izquierda, pero hacia la mitad del ensayo se observa una inversión en la tendencia y existe un ligero incremento en el estado tensional de la entalla derecha respecto a la anterior, como se refleja más claramente en la evolución de la tensión hidrostática (véase el Anexo II). Este punto de inflexión se observa que es el mismo en el cual la deformación plástica ha visto modificada su pendiente, como se comentó previamente.

El estudio de la triaxialidad tensional ( $t$ ) se refleja en la Fig. 4.34. Aunque pudiese parecer que no está vinculada con la deformación plástica la curva presenta un comportamiento semejante puesto que hasta las proximidades del 20 % del ensayo de tracción ambas entallas presentan el mismo nivel de triaxialidad y que se corresponde con una deformación plástica total equivalente nula en el proceso. Hasta el 30% del ensayo es la entalla izquierda la que presenta los mayores valores de triaxialidad, pero a partir de este punto se produce una inversión en el comportamiento que hace que sea la entalla derecha la que manifieste el mayor factor; esto tiene correspondencia con el cambio de pendiente que tiene lugar en este instante en la deformación plástica del material. Los valores próximos al 60 % presentan un nivel máximo de triaxialidad ( $t$ ), lo que se corresponde aproximadamente con el valor máximo de las tensiones hidrostática ( $\sigma$ ) y equivalente ( $\bar{\sigma}$ ) en dicho momento del ensayo bajo sollicitación de tracción. A medida que se finaliza el proceso de tracción disminuye la triaxialidad debido a que la tensión hidrostática disminuye ligeramente mientras que la tensión equivalente permanece constante.

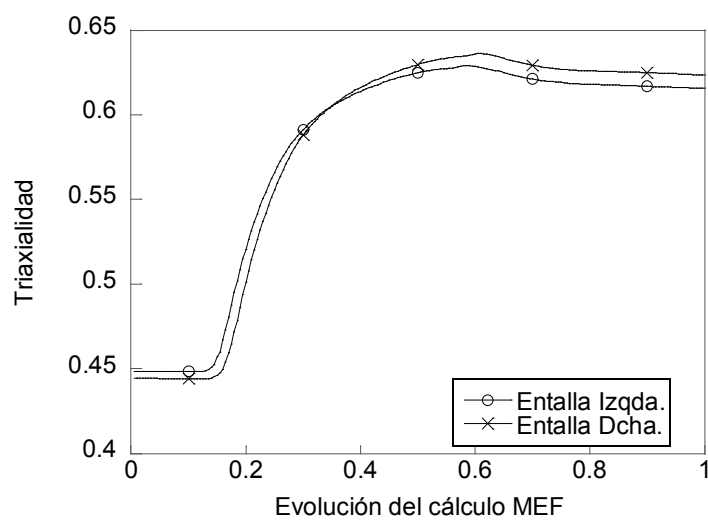


Fig. 4.34. Evolución de la triaxialidad en el punto central del fondo de entalla, probeta prismática B7-AA.

## 2.4. Análisis numérico de la probeta B0-CC

Los estudios de AYASO (2001) muestran la convergencia para una malla con una densidad de 196 elementos. Con el fin de extrapolar los resultados al análisis tridimensional ha sido necesaria la realización, para la probeta B0-CC, de una malla de 11730 elementos con un total de 13475 nodos analizados. La forma geométrica de la malla utilizada se refleja en la Fig. 4.35. Como en casos anteriores la malla diseñada obedece a un proceso de simetría en el que la única diferencia entre la parte derecha e izquierda se sitúa en la entalla, en la que se modifican los nodos para adaptarlos a la geometría particular. Las características de las entallas han permitido corregir únicamente los nodos de la frontera de la entalla izquierda. En la modelización de las entallas se produce una ligera modificación en las mismas como queda patente en la Tabla 4.4. Los datos resultantes del proceso de cálculo son los siguientes: ratio de singularidad:  $4.1873 \cdot 10^{-13}$ , ratio de convergencia: 0.0002281.

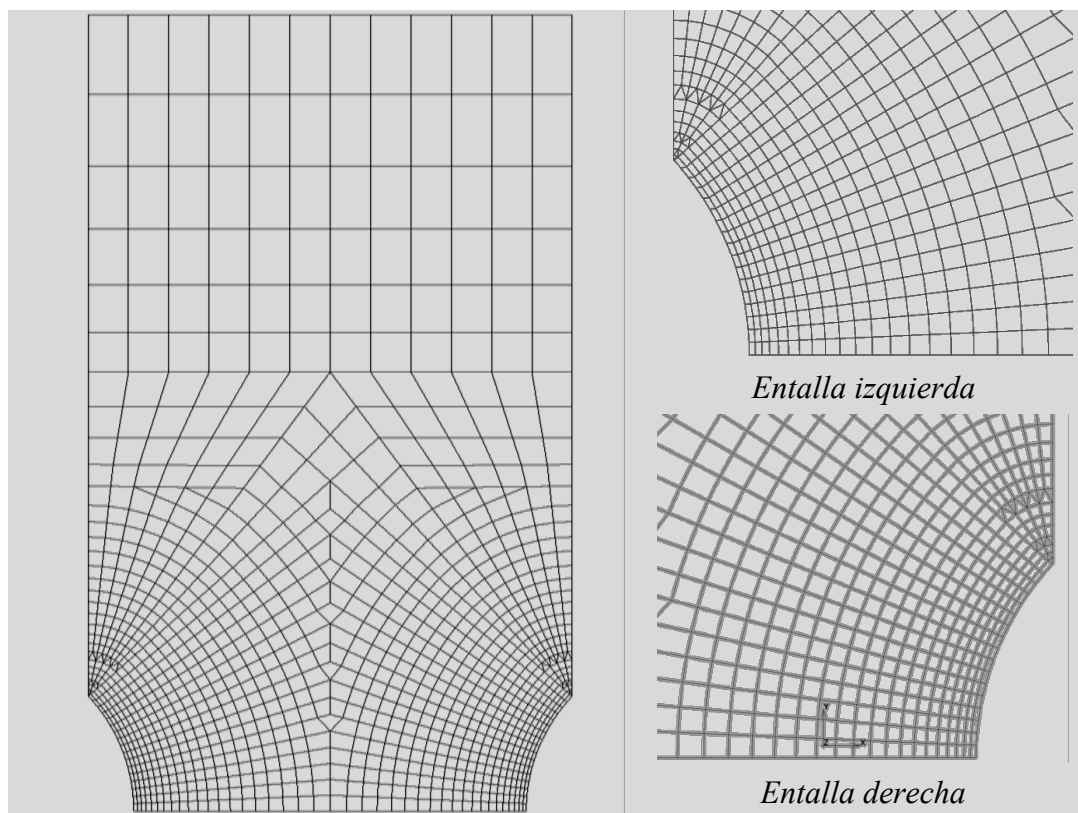


Fig. 4.35. Malla de la probeta B0-CC.

Como se puede comprobar en la gráfica de la Fig. 4.36 la malla utilizada para el cálculo tiene un comportamiento impecable, pues la curva experimental (EXP) y la numérica (NUM) son prácticamente idénticas, de modo que se produce una reproducción fiel de los resultados obtenidos en el proceso de tracción experimental, llegando incluso a reproducir exactamente el tramo de descenso de carga con aumento del desplazamiento una vez superado el punto correspondiente a la carga máxima.

Tabla 4.4. Dimensiones características (mm) de las entallas de la probeta B0-CC.

Entalla	B0-CC	
Izquierda	$C_{Real} = 0.697$	$C_{MEF} = 0.697$
	$\xi_{Real} = 1.8095$	$\xi_{MEF} = 1.80937$
Derecha	$C_{Real} = 0.704$	$C_{MEF} = 0.704$
	$\xi_{Real} = 1.8040$	$\xi_{MEF} = 1.80385$

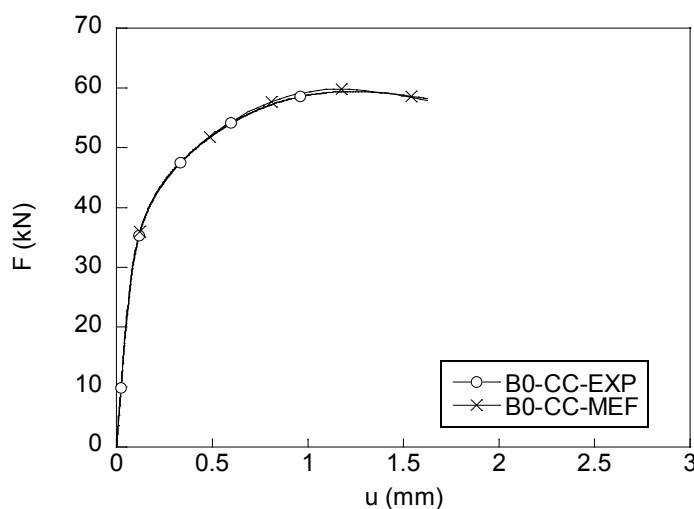


Fig. 4.36. Curva F-u experimental (EXP) y numérica (MEF) de la probeta B0-CC.

#### 2.4.1. Deformación plástica equivalente.

En la Fig. 4.37 se puede observar el comportamiento de la probeta B0-CC en cuanto a deformación plástica total equivalente se refiere, en los primeros instantes de cálculo (INC 15). En ella se marca una clara diferencia respecto la probeta B0-AA (pequeño radio, pequeña profundidad) en la cual los campos de deformación plástica equivalente se localizan en las zonas adyacentes a la entalla y presentan una forma lobular (véase la Fig. 4.8). Sin embargo, la probeta B0-CC (gran radio de curvatura, pequeña profundidad), por el contrario, muestra una *distribución global* de la deformación plástica equivalente, es decir, ésta se localiza en una zona extensa a lo largo de la sección de la probeta (Fig. 4.37). Lo que remarca el hecho de que la deformación plástica viene marcada fundamentalmente por la forma física (geometría) de la entalla que presenta la probeta.

A lo largo del ensayo de tracción mediante MEF se puede apreciar cómo la deformación plástica total equivalente aparece en los primeros instantes de cálculo siendo escasa la presencia de régimen elástico en aquellas secciones de material que se sitúan próximas a la

zona de entalla. En su aparición, los máximos valores de deformación plástica equivalente se concentran con forma de semicilindros alrededor de ambas entallas. A medida que el punto de vista se desplaza radialmente hacia el interior de la probeta, se observa cómo los campos de deformación se van atenuando hasta alcanzar la convergencia de los mismos en la zona central de la probeta. Este hecho es indicativo de que la mayor parte de la sección central de la probeta presenta el mismo valor de deformación plástica y que para el INC 15 es de un valor de  $1,882 \times 10^{-3}$ , tal y como se puede apreciar en la Fig. 4.37.

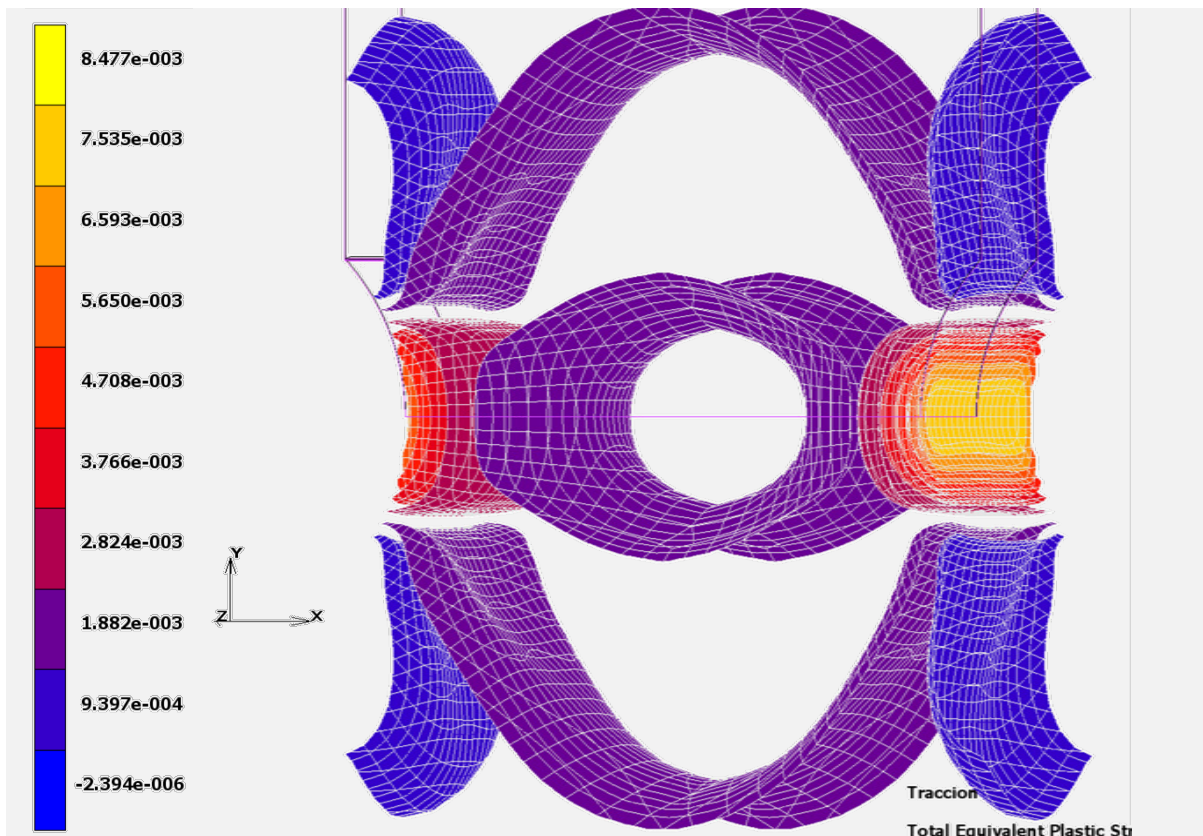


Fig. 4.37. Deformación plástica equivalente, INC 15, probeta B0-CC.

A medida que avanza el ensayo de tracción los valores de la deformación plástica aumentan de un modo progresivo y, a diferencia de lo que sucede en las probetas con entalla tipo AA, en la probeta B0-CC no se observa la existencia de un crecimiento homotético de los campos iniciales, sino que los campos de deformación plástica evolucionan de modo que en el último instante de carga presentan la configuración que aparece reflejada en la Fig. 4.38.

En la configuración previa a la rotura del material prácticamente toda la sección transversal que une las entallas (sección neta transversal) presenta los mismos valores de la deformación plástica equivalente, salvo en aquellas zonas situadas en los paredes de la probeta perpendiculares a la entalla, en las que se pueden observar la aparición de "semielipsoides" que denotan una menor cuantía de la deformación plástica equivalente que el resto de la zona.

Esta superficie geométrica de menor valor deformacional es una característica propia de las probetas prismáticas y es debida al efecto de borde que suponen las paredes de la probeta prismática en las que no existe la presencia de entalla. Los valores máximos de deformación plástica se localizan durante los instantes previos a la rotura y presentan una cuantía de 0.3279 siendo estos muy próximos a los encontrados en la probeta B0-AA de 0.28.

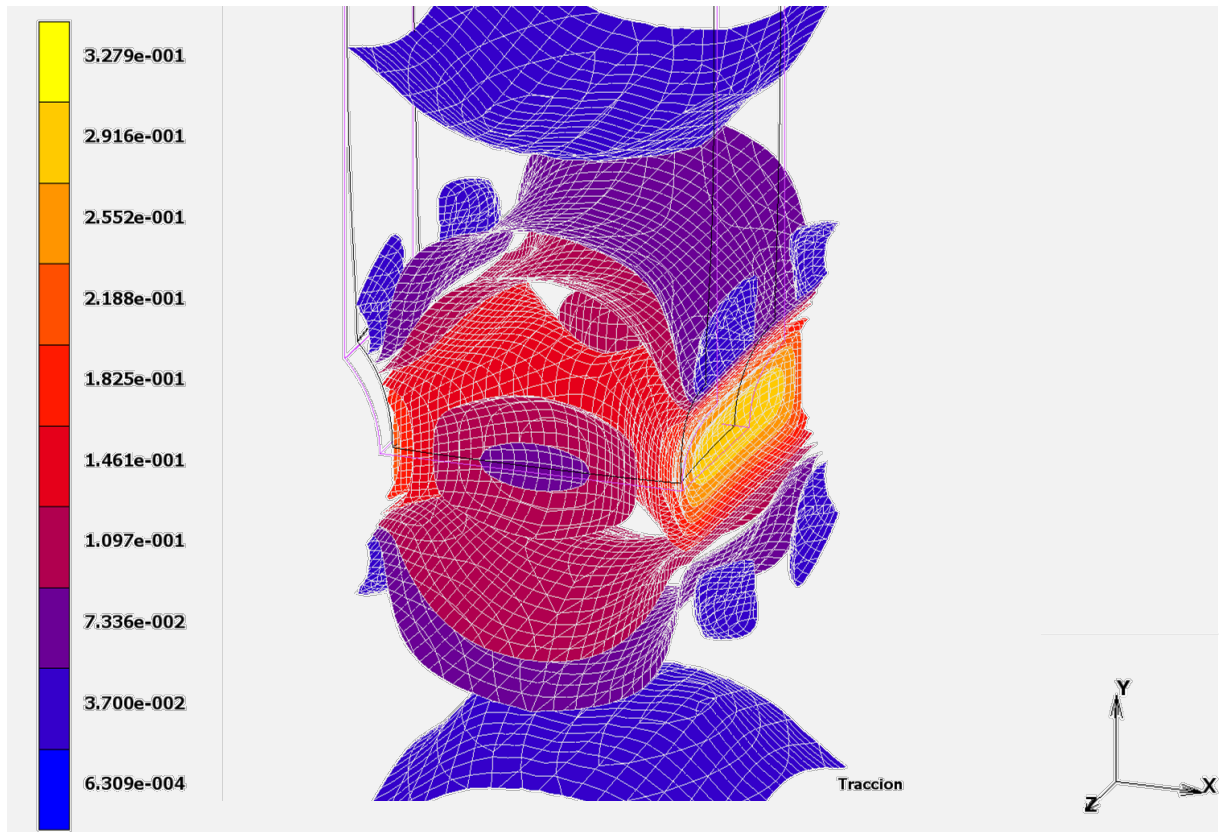


Fig. 4.38. Deformación plástica equivalente: instante previo a la fractura final (B0-CC).

#### 2.4.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

Al igual que lo que sucede con los campos de deformación plástica total, la tensión efectiva de von Mises presenta una marcada diferencia respecto de la probeta B0 con entalla tipo AA. En la distribución de las superficies equi-tensionales obtenidas para la probeta B0-CC se puede observar (Figs. 4.39 y 4.40) cómo la máxima tensión se presenta en la sección de la entalla y se distribuye en forma radial hacia la zona central de la probeta donde se presenta la confluencia de ambas superficies. En la Fig. 4.39 se presentan las superficies equi-tensionales referentes al INC 15 (primeros instantes de tracción); en ella prácticamente toda la sección de la probeta exhibe un elevado estado tensional con valores próximos a los 0.9 GPa en el fondo de entalla y a los 0.8 GPa en la zona central. En el instante previo a la fractura final (Fig. 4.40) se presenta una extensión masiva de los valores máximos próximos a los 1.5 GPa.



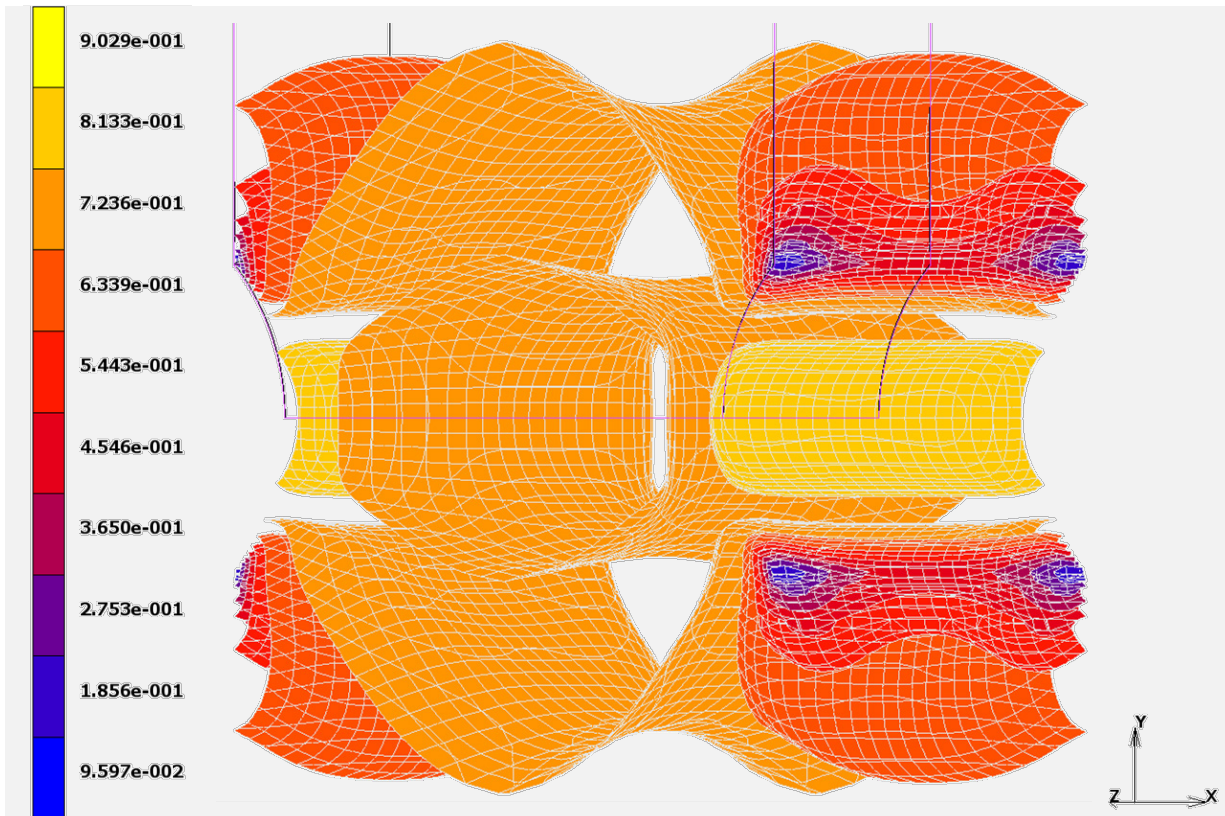


Fig. 4.39. Tensión equivalente de von Mises, INC 15 del cálculo, probeta B0-CC.

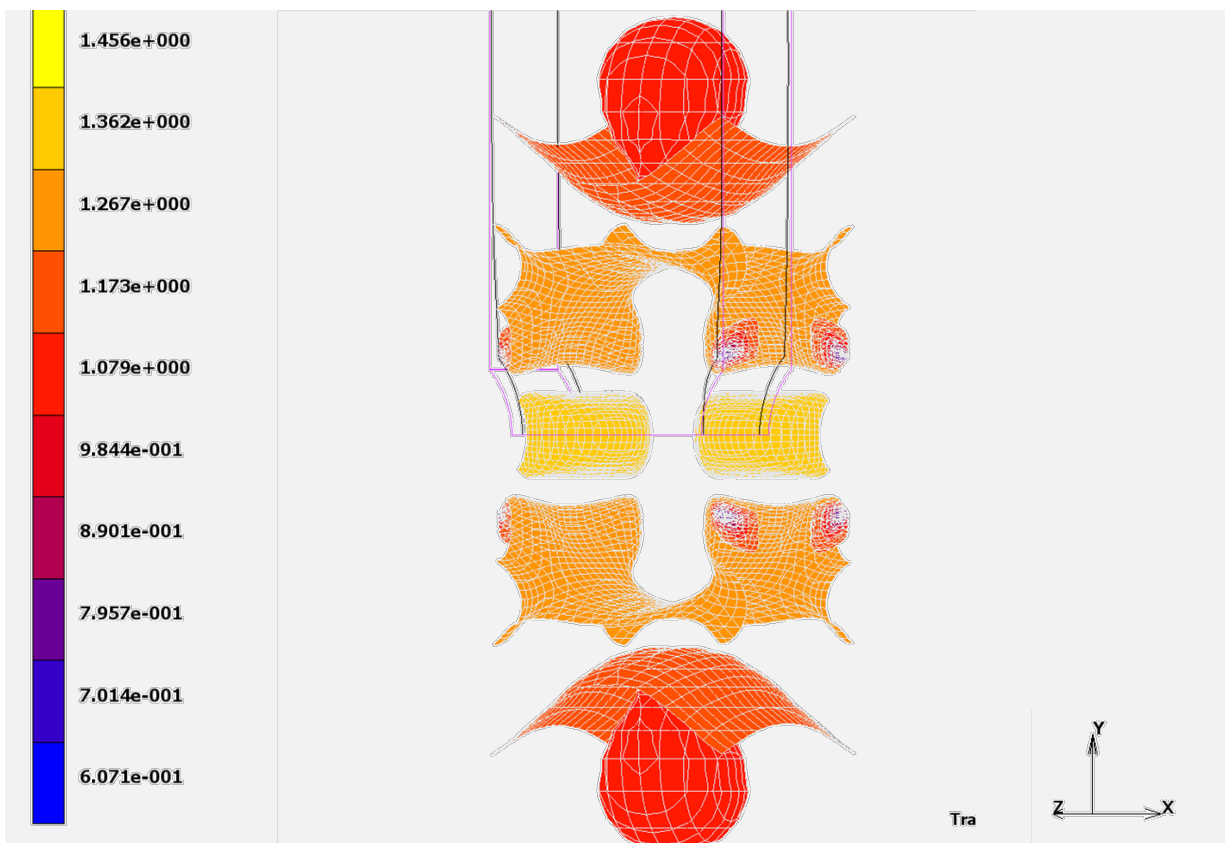


Fig. 4.40. Tensión equivalente de von Mises, instante previo a la rotura, probeta B0-CC.

### 2.4.3. Análisis de la sección de rotura

La observación de la tensión equivalente de von Mises en la sección de entalla, y en el instante previo a la rotura de la probeta B0-CC, indica la presencia de una situación completamente diferente a la que se presentaba en las probetas con entalla tipo AA. En la probeta B0-CC (Fig. 4.41) la zona de máxima tensión se localiza en la zona central de la entalla en forma de *media luna* que afecta a todo la longitud de la entalla, y con un máximo situado en la zona central de la misma, mientras que en el caso de las probetas con entalla tipo AA las zonas más afectadas se concentran, más o menos, a 1/3 de la pared transversal.

Comparando los resultados MEF con la fractografía real de la probeta ensayada se observa una gran correspondencia como se aprecia en la Fig. 4.41. En ella se observa cómo la ZPF se presenta en el punto en el cual se muestran los valores máximos de la tensión equivalente de von Mises. A la vista de los datos aportados por los cálculos mediante el MEF se observa una mayor afectación dimensional, aunque ligera, de la zona situada en la entalla derecha que en la zona próxima a la entalla izquierda, por lo que se podría pensar que sería la entalla situada a la derecha la que probablemente iniciaría el proceso de fractura en el caso de presentar ambas unas condiciones semejantes.

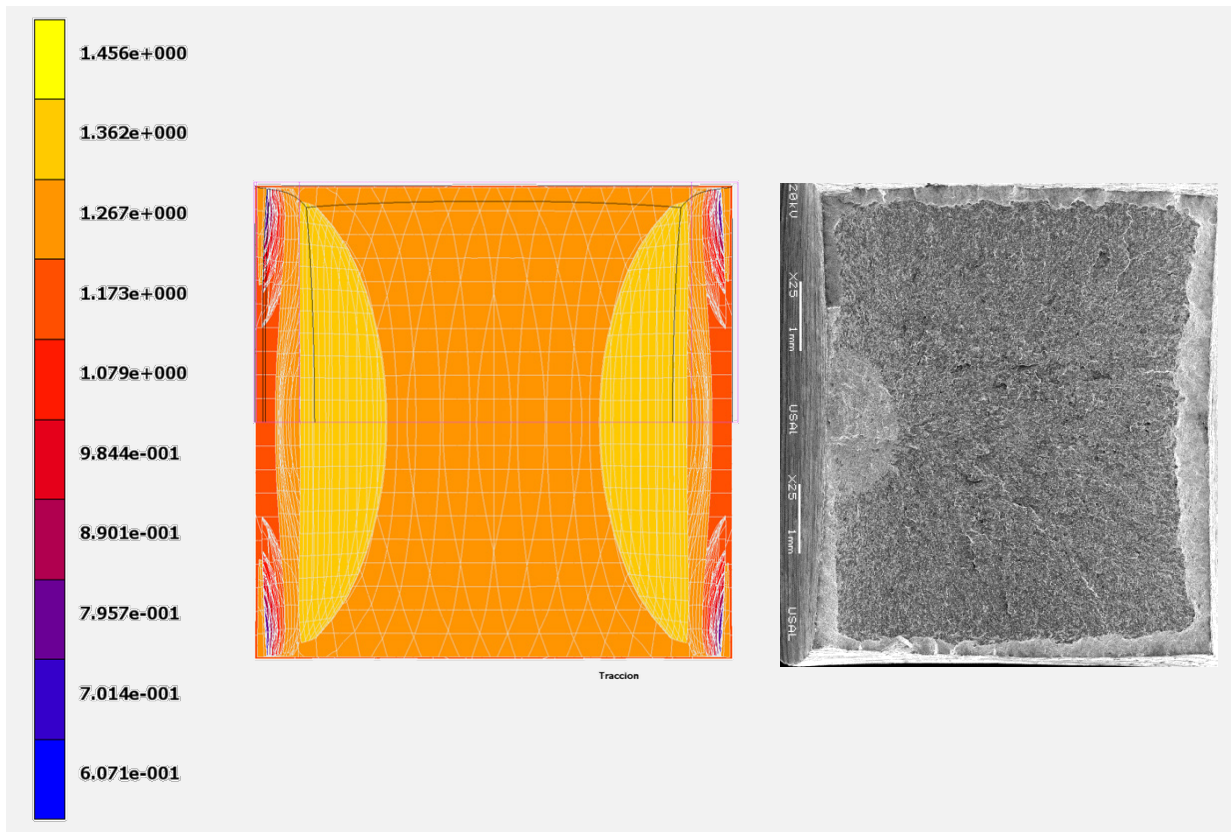


Fig. 4.41. Distribución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises en la sección neta de la probeta B0-CC y su relación con la superficie de fractura que presenta.

#### 2.4.4. Evolución de las variables internas en el fondo de entalla

Del análisis de la evolución de los parámetros en los fondos de entalla (nodo central en el fondo de entalla) a lo largo de todo el ensayo bajo sollicitación de tracción se deriva que el comportamiento en ambas entallas es en esencia el mismo. Se establecen unas diferencias manifiestamente insignificantes entre las entallas izquierda y derecha en cuanto a la deformación plástica total se refiere, siendo ligeramente mayor la concentración de deformación en la entalla derecha que en la entalla izquierda (Fig. 4.42).

En cuanto a los valores de la tensión equivalente de von Mises (Fig. 4.43) se observa que en un aumento lineal de elevada pendiente en los primeros instantes del ensayo para luego estabilizarse en el tramo en intermedios. A medida que el ensayo llega a su fin se vuelve a acentuar la pendiente.

A nivel *morfológico* el factor de triaxialidad exhibe un comportamiento diferente al de la tensión equivalente de von Mises. Se observa (Fig. 4.44) que en los primeros instantes de ensayo el factor de triaxialidad aumenta rápidamente alcanzando su valor máximo (aproximadamente cuando ha transcurrido el 10% inicial de la totalidad del ensayo). A partir de este punto se aprecia un ligero descenso que conduce a un sutil estancamiento para, a partir de la mitad del ensayo, disminuir progresivamente hasta un valor de 0.42. Aunque en principio pudiesen parecer unos cambios muy marcados se puede observar que el rango oscila entre los valores de 0.48 y 0.39.

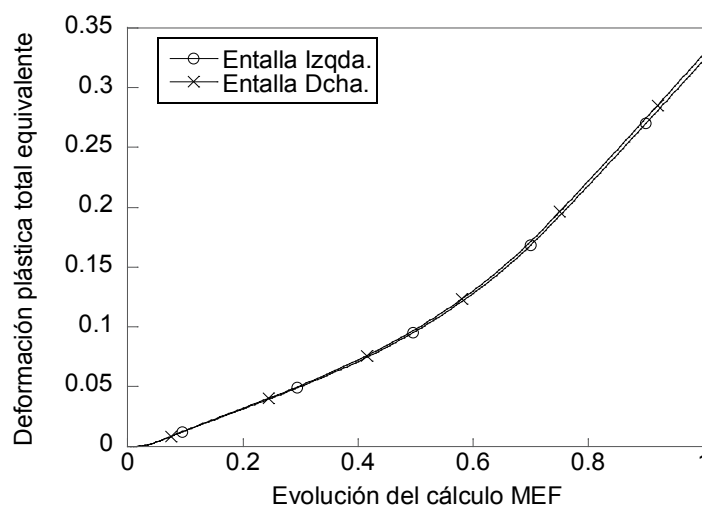


Fig. 4.42. Evolución de la deformación plástica total equivalente en el fondo de entalla: probeta B0-CC.

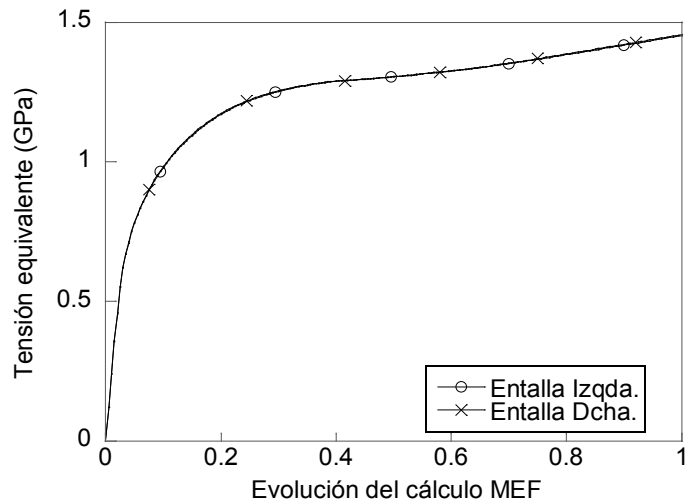


Fig. 4.43. Tensión equivalente de von Mises en el fondo de entalla: probeta B0-CC.

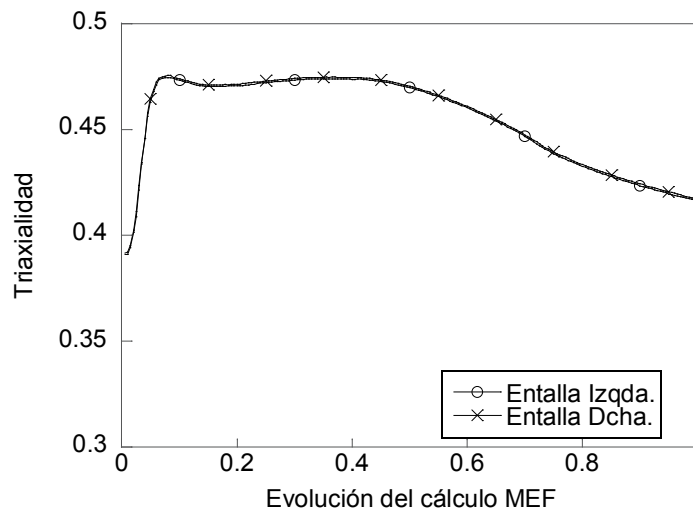


Fig. 4.44. Evolución de la triaxialidad en el fondo de entalla: probeta B0-CC.

## 2.5. Análisis numérico de la muestra B4-CC

La malla utilizada para el cálculo numérico de la probeta prismática B4-CC mantiene los mismos criterios de diseño utilizada para las previas. Se han utilizado 18579 nodos distribuidos en 16370 elementos (Fig. 4.45). En la Tabla 4.5 se recogen los valores de los datos relativos a las dimensiones reales y simuladas de las entallas, en este caso ha sido necesario añadir en la entalla de la izquierda una serie de nodos auxiliares y corregir el nodo superior para adaptarlo a la geometría.

La curva  $F-u$  experimental (EXP) y numérica (MEF) se presentan en la Fig. 4.46; en ella se aprecia la calidad de la representación obtenida. Los datos del proceso de cálculo obtenidos son: ratio de singularidad:  $6.3398 \cdot 10^{-13}$ , ratio de convergencia: 0.0006997.

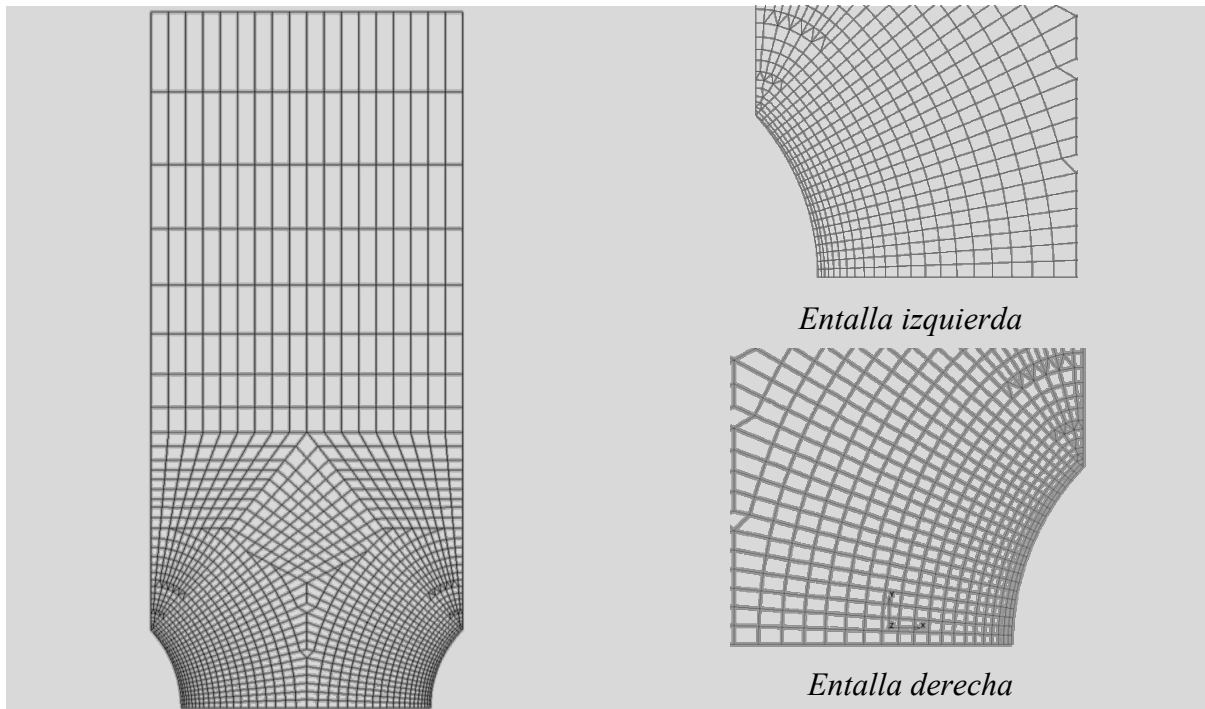


Fig. 4.45. Diseño de la malla utilizada para el cálculo MEF de la probeta B4-CC.

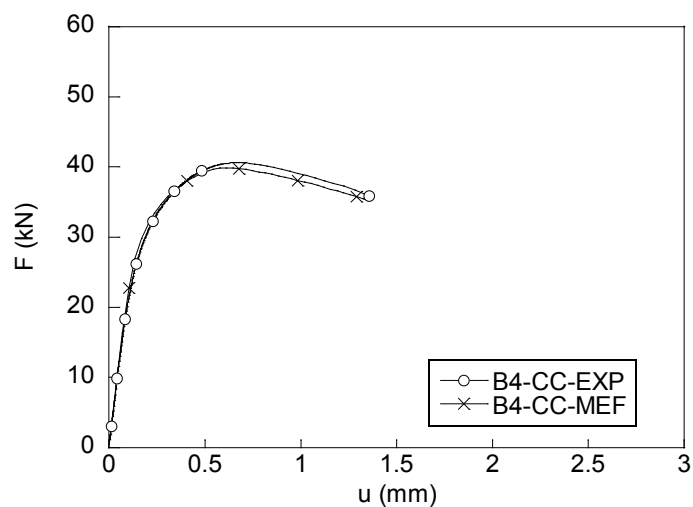


Fig. 4.46. Gráfica comparativa de los ensayos de la probeta B4-CC y B4-CC-MEF.

Tabla 4.5. Dimensiones características (mm) de las entallas de la probeta B4-CC.

Entalla	B4-CC	
Izquierda	$C_{Real} = 0.537$	$C_{MEF} = 0.537$
	$\zeta_{Real} = 1.391$	$\zeta_{MEF} = 1.39101$
	$R = 2.070$	$R = 2.070$
Derecha	$C_{Real} = 0.569$	$C_{MEF} = 0.569$
	$\zeta_{Real} = 1.403$	$\zeta_{MEF} = 1.40299$
	$R = 2.014$	$R = 2.014$

2.5.1. Deformación plástica equivalente

La deformación plástica equivalente total de la probeta B4-CC en el instante previo a la rotura de la probeta se presenta en la Fig. 4.47. La distribución muestra durante el ensayo de tracción un comportamiento semejante al encontrado en la probeta B0-CC, de ahí que no se realicen más consideraciones. La diferencia fundamental se manifiesta en los valores máximos observados ya que en el caso del acero B4 la deformación máxima es de 0.56 mientras que en el caso del acero B0 el valor máximo es de 0.32; se observa, por tanto, una acentuación del estado de deformación. El análisis visual de las superficies muestra claramente la asimetría existente entre las entallas izquierda y derecha como consecuencia de pequeñas diferencias en el mecanizado de las dos entallas existentes.

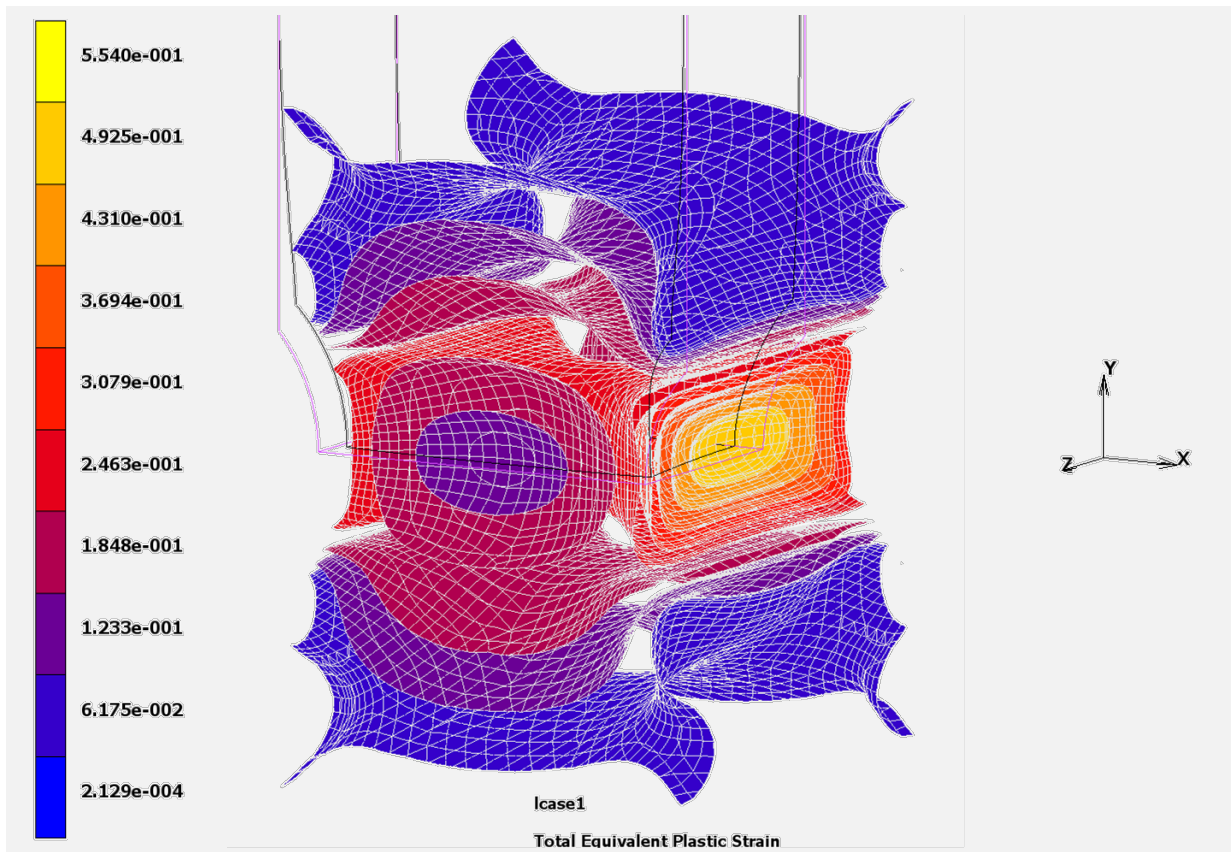


Fig. 4.47. Deformación plástica equivalente, probeta B4-CC; instante previo a la fractura.

2.5.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

Del mismo modo que sucedía con la probeta B0-CC, la probeta B4-CC presenta una tensión equivalente o efectiva de von Mises extendida a toda la sección de la misma (Fig. 4.48), lo que quiere decir que toda la sección de rotura de la probeta se encuentra afectada del máximo valor tensional en el instante previo a la rotura del material. Los valores de la tensión

equivalente oscilan entre los 1.54 GPa en la sección de entalla y los 0.73 GPa en las partes más alejadas del plano de entalla.

La Fig. 4.48 muestra las iso-superficies correspondientes al último instante de carga, en ella se observa, lo mismo que en el caso de la probeta B0-CC, la presencia de dos núcleos internos preservados, con valores de tensión de 0.97 GPa, situados en la parte superior e inferior de la probeta. Así mismo, también se pueden apreciar cuatro zonas internas que se corresponden con los vértices de las entallas y en las que se presentan la característica relajación tensional, como se comprueba en la gradación tensional que está teniendo lugar en ellos, que oscila entre 1.5 GPa en las zonas internas y 0.7 GPa en los puntos más extremos.

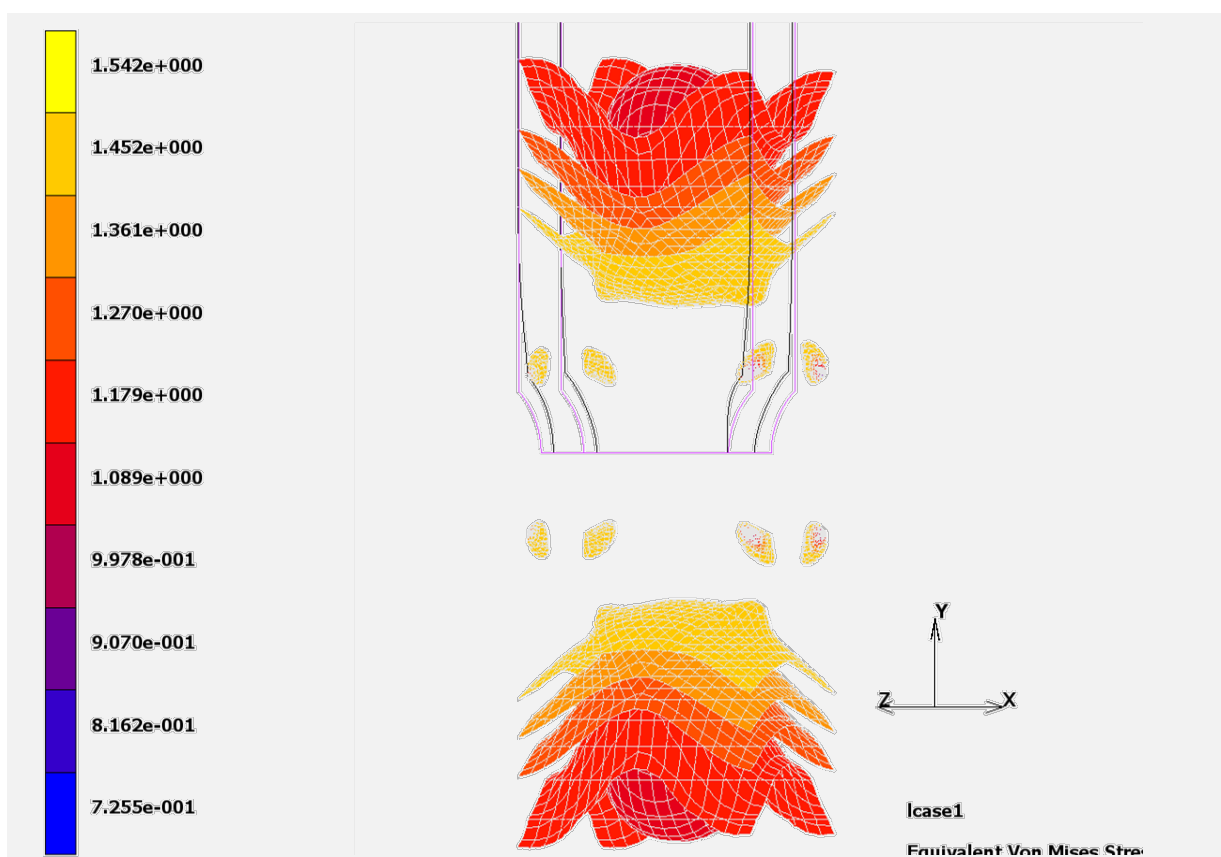


Fig. 4.48. Tensión equivalente de von Mises en el instante de rotura en la probeta B4-CC.

### 2.5.3. Análisis de la sección de rotura

En la Fig. 4.49 se muestra, mediante corrección de color, la distribución de la tensión equivalente de von Mises en el instante correspondiente a la fractura final de la probeta B4-CC, y la superficie de fractura de la probeta experimental. Como se puede observar, existen dos focos principales con máxima concentración de trazas, correspondientes a la entalla izquierda y derecha, ambos con una curvatura diferente siendo más acusada ésta en la entalla

derecha (según la imagen) lo que es indicativo de la variación en el campo tensional que está teniendo lugar en esta zona del material. Además, si se observan en detalle, se pueden ver cómo las distribuciones de tensiones se conforman en diferentes planos lo que sería indicativo de que la fractura podría presentarse a lo largo de varios planos simultáneamente.

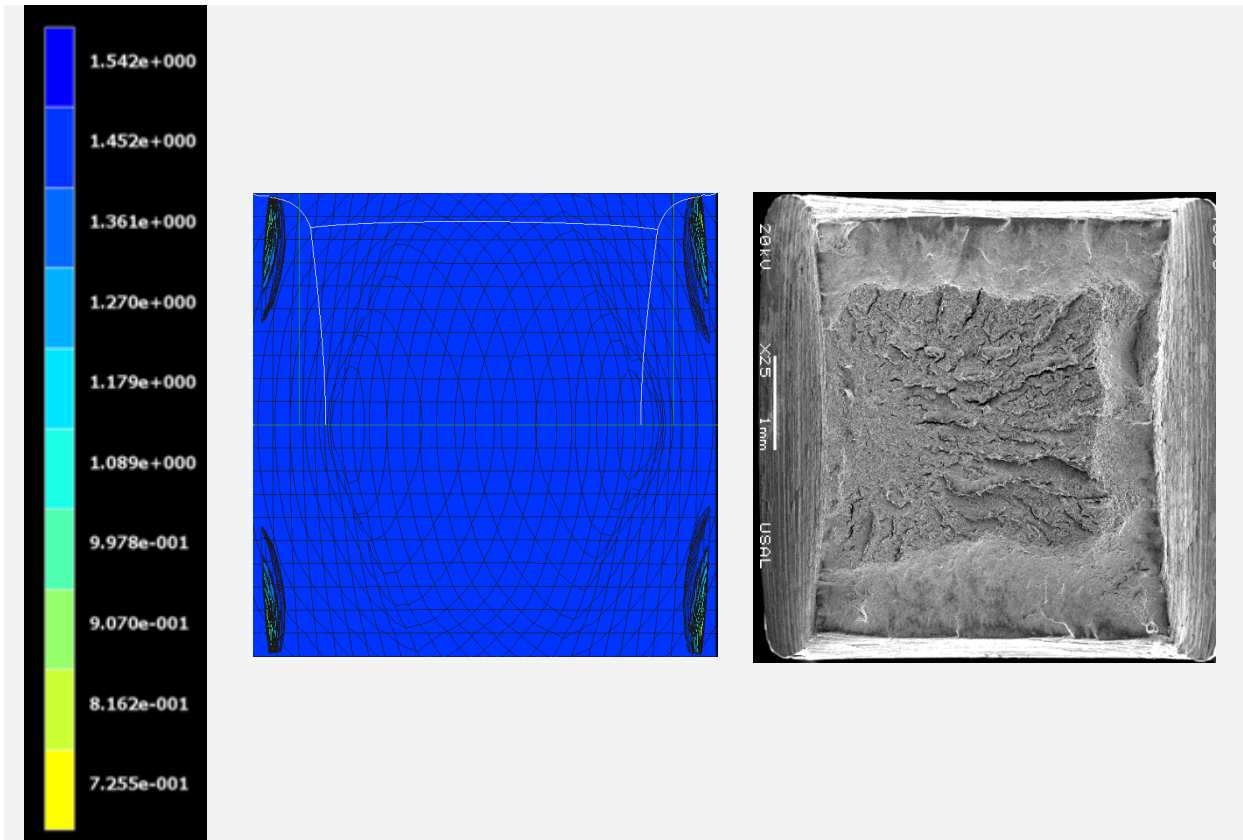


Fig. 4.49. Tensión equivalente en la sección neta de la probeta B4-CC: corrección de color.

#### 2.5.4. Evolución de las variables internas en el fondo de entalla

La evolución de las principales variables en los fondos de entalla durante el proceso de tracción en la probeta B4-CC, se presentan en el grupo de Figs. 4.50 a 4.52. En la Fig. 4.50 se presenta la evolución de la deformación plástica en los nodos centrales situados en los fondos de ambas entallas, izquierda y derecha, de la probeta B4-CC. En ella se puede observar cómo ambas entallas presentan un comportamiento semejante; no obstante, a lo largo del ensayo, se observa un incremento de la deformación plástica en la entalla derecha respecto la izquierda. La mayor diferencia se acusa en el instante previo a la rotura del material donde se pasa de un valor de  $\epsilon_p = 0.55$  en la entalla izquierda a  $\epsilon_p = 0.5$  en la derecha. A pesar de las diferencias observadas en la deformación plástica, la evolución de la tensión equivalente de von Mises (a lo largo del ensayo de tracción) es en ambas entallas prácticamente idéntico, como queda



reflejado en la imagen de la Fig. 4.51, con un crecimiento muy acentuado en los primeros instantes de carga y una estabilización posterior hasta alcanzar la finalización del ensayo.

El factor de triaxialidad representado en la Fig. 4.52 muestra como el comportamiento de ambas entallas es ligeramente desigual. Las pequeñas diferencias se deben a la ligera discrepancia observada en la tensión equivalente de von Mises que se ve incrementada con la observada en la tensión hidrostática (ver Anexo II). El factor de triaxialidad es morfológicamente igual entre ambas entallas; con un crecimiento muy rápido, durante los primeros instantes, que se modera tras la aparición de un pequeño rellano, hasta alcanzar el factor de triaxialidad máximo próximo a 0.45. Este valor máximo se mantiene durante el 20% del ensayo y luego decrece progresivamente hasta alcanzar al finalizar el ensayo un valor de 0.4.

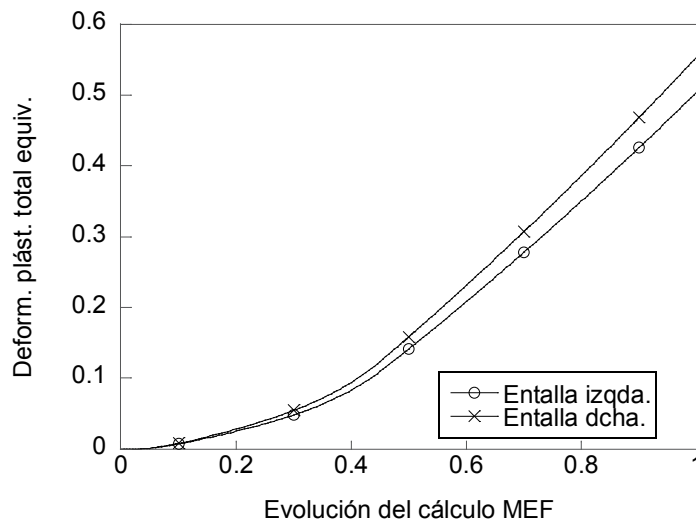


Fig. 4.50. Deformación plástica equivalente en el fondo de entalla: probeta B4-CC.

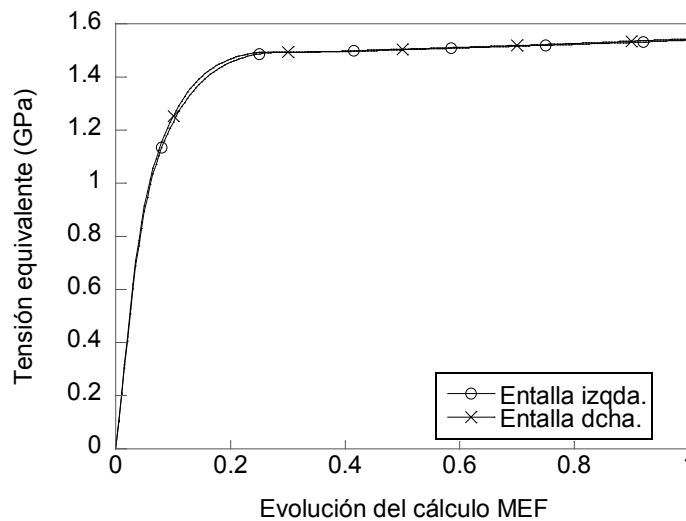


Fig. 4.51. Tensión equivalente de von Mises en el fondo de entalla: probeta B4-CC.

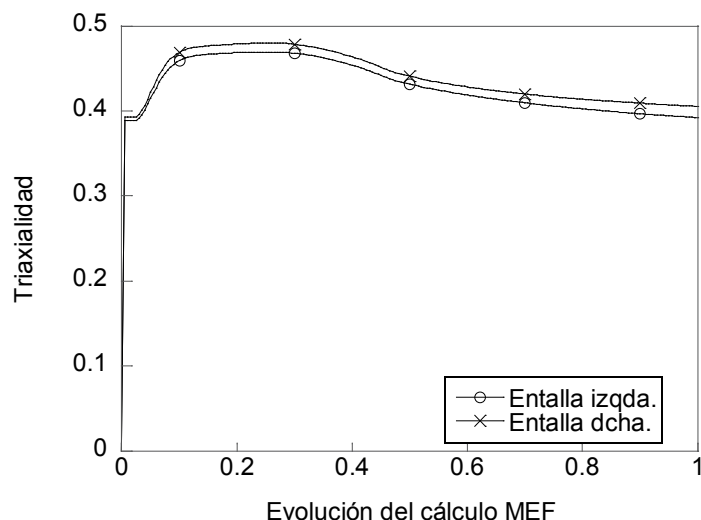


Fig. 4.52. Evolución de la triaxialidad en el fondo de entalla, probeta B4-CC.

## 2.6. Análisis numérico de la muestra B7-CC

Los criterios de diseño establecidos en las mallas precedentes se mantienen para la probeta B7-CC. La malla para el acero B7-CC presenta 17480 elementos distribuidos en 20009 nodos, lo que la hace la malla más densa utilizada hasta el momento, cómo refleja la Fig. 4.53. Las dimensiones de las entallas se ven modificadas en el proceso de modelización, de modo que las dimensiones reales y las diseñadas se presentan en la Tabla 4.6. Para la realización de la malla ha sido necesaria la introducción de una línea de elementos auxiliares en la entalla derecha de la probeta. Los datos resultantes del proceso de cálculo indican: ratio de singularidad:  $7.5075 \cdot 10^{-13}$ , ratio de convergencia:  $7.364 \cdot 10^{-5}$

Tabla 4.6. Dimensiones (mm) características de las entallas de la probeta B7-CC (considérese la figura 2.3 del capítulo 2 de la presente Tesis).

Entalla	B7-CC	
<b>Izquierda</b>	$C_{Real} = 0.465$	$C_{MEF} = 0.465$
	$\xi_{Real} = 1.100$	$\xi_{MEF} = 1.10017$
	$R = 1.534$	$R = 1.534$
<b>Derecha</b>	$C_{Real} = 0.439$	$C_{MEF} = 0.439$
	$\xi_{Real} = 1.0945$	$\xi_{MEF} = 1.09455$
	$R = 1.584$	$R = 1.584$

En la Fig. 4.54 se muestra las curvas carga-desplazamiento para la probeta B7-CC obtenidas gracias al ensayo experimental (EXP) y al cálculo numérico por el MEF. En ella se aprecia como ambas curvas muestran la misma respuesta mecánica, síntoma inequívoco de que el

cálculo numérico es correcto y que los resultados obtenidos de las variables internas son fieles representaciones de lo que ocurre en el interior de la probeta.

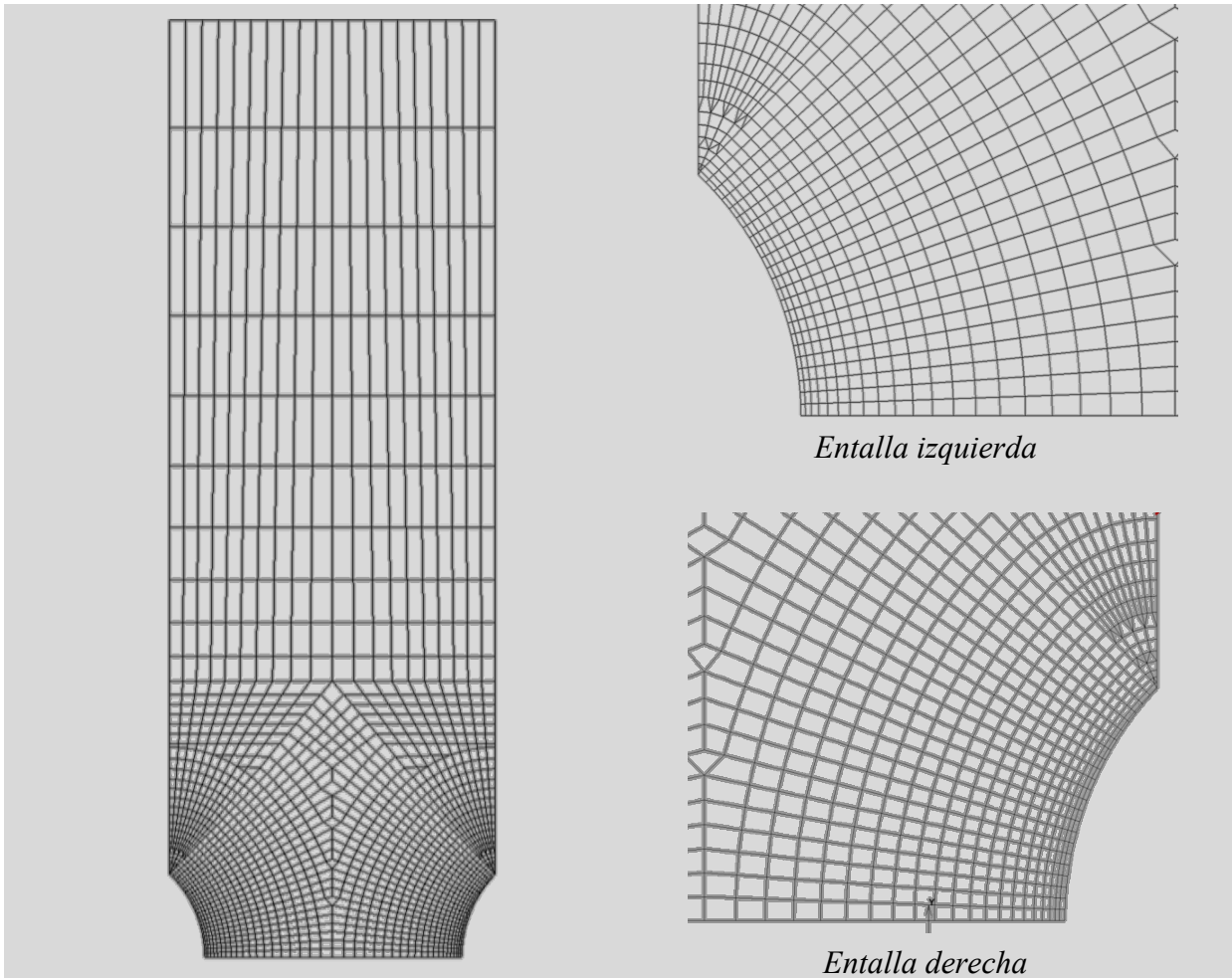


Fig. 4.53. Diseño de la malla utilizada para el cálculo MEF de la probeta B7-CC.

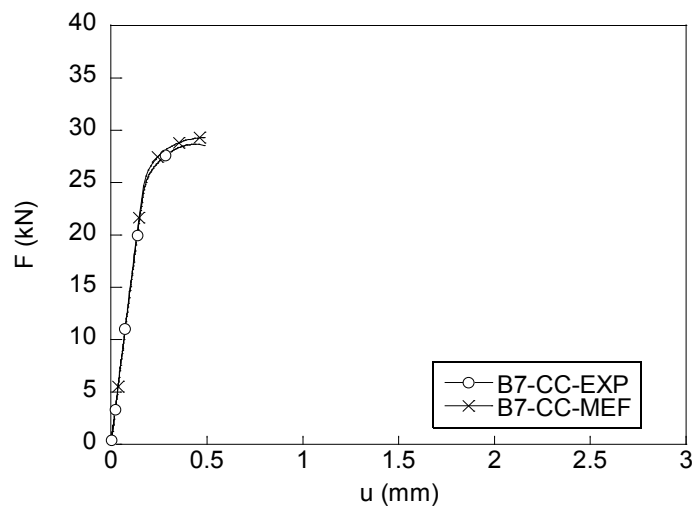


Fig. 4.54. Comparativa de las curvas  $F-u$  experimental y numérica, probeta B7-CC.

### 2.6.1. Deformación plástica equivalente

El comportamiento de la probeta B7-CC referente a la deformación plástica equivalente se refiere (Fig. 4.55) es semejante al que se establece en los aceros B0 y B4 con el mismo tipo de entalla. Las localizaciones de los valores máximos de deformación plástica equivalente se sitúan en el centro de la entalla, mostrando una distribución semicilíndrica en torno a la misma. Los valores de la deformación plástica equivalente se atenúan en puntos próximos a los bordes de la probeta, así como hacia el interior de la sección neta. En la zona central de la probeta se observa cómo concurren aquellas iso-superficies que parten de las zonas de entalla y que se distribuyen en dirección transversal a la misma. En este punto se observa una caída sustancial en el valor de la deformación, pasando de un valor de 0.16 en el centro de entalla a un valor de 0.05 en la zona central de la probeta.

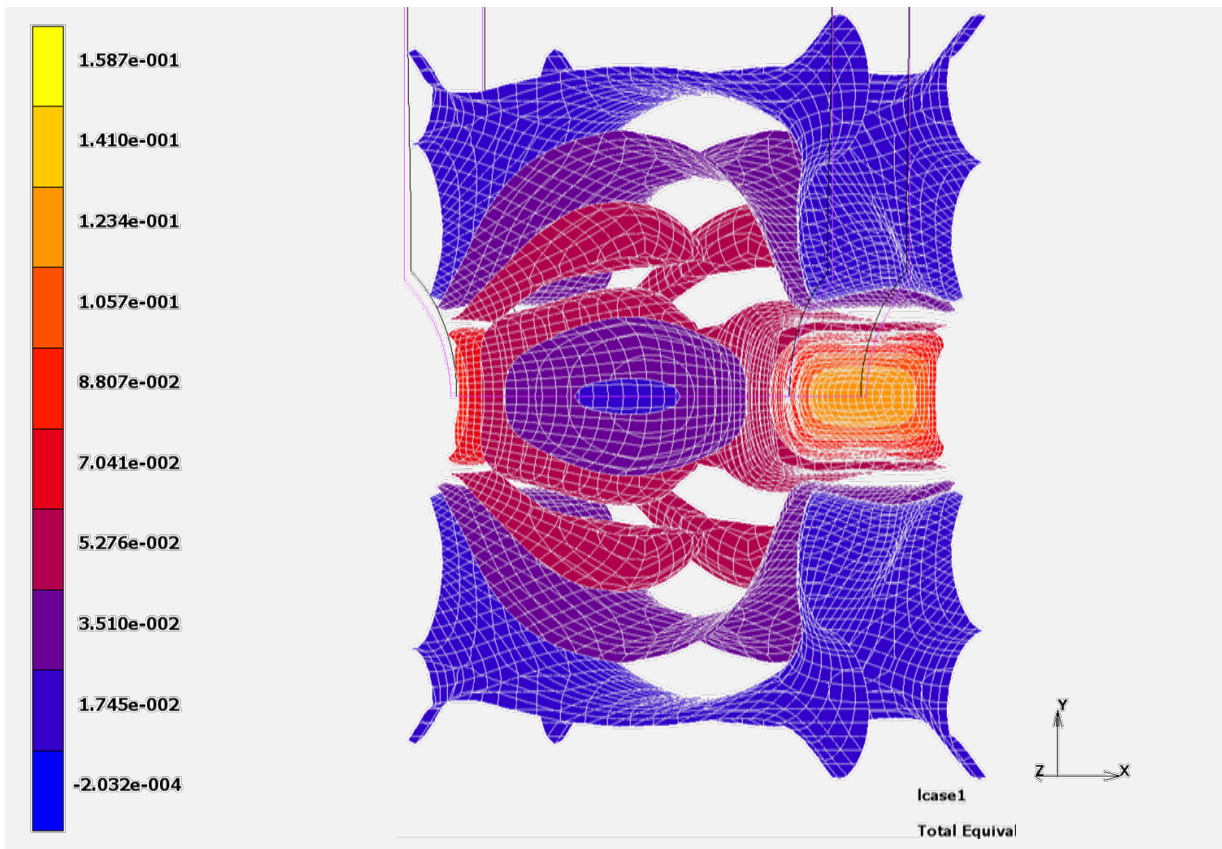


Fig. 4.55. Deformación plástica equivalente en el instante previo a la rotura. B7-CC.

### 2.6.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

La imagen que el programa de elementos finitos proporciona, en el último instante de carga previo a la rotura de la probeta B7-CC, indica que la tensión equivalente de von Mises se distribuye homogéneamente a lo largo de todo el plano de entalla tal y como se puede

observar en la imagen tridimensional de la Fig. 4.56. Se percibe que los valores máximos no sólo se dan en el plano de entalla sino que se dan a lo largo de una superficie extensa de la probeta, con valores máximos próximos a los 1.86 GPa.

En la imagen representada en la Fig. 4.56 también se pueden apreciar ocho zonas (dos de ellas ocultas) con escaso valor tensional (0.2 GPa), las cuales se corresponden con los ocho vértices o esquinas de las entallas. También es observable la diferencia existente entre la entalla izquierda y derecha, fundamentalmente en las superficies de tensión constante superior e inferior que delimitan la zona central de la probeta en la que se sitúan los valores máximos de la tensión equivalente o efectiva de von Mises.

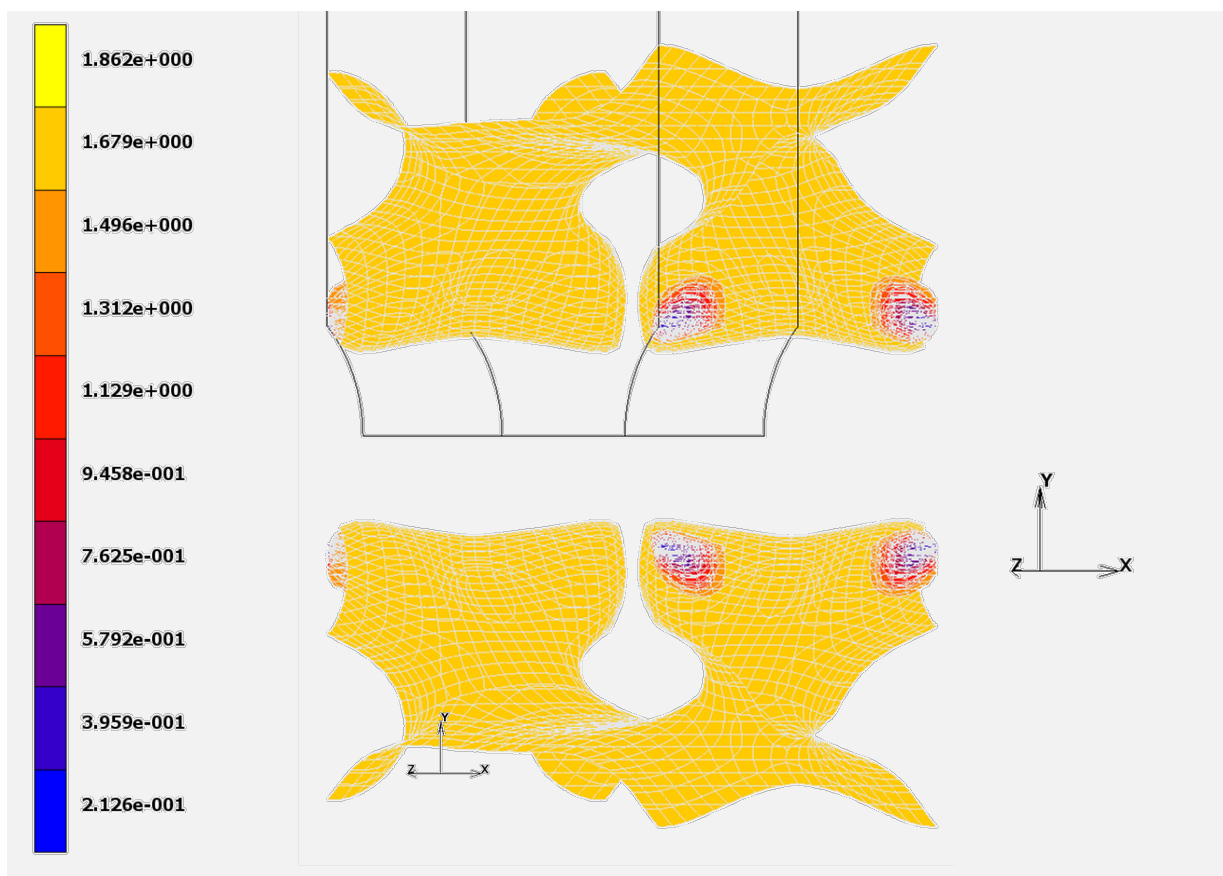


Fig. 4.56. Distribución de la tensión equivalente de von Mises, probeta B7-CC, en el instante previo a la fractura final.

### 2.6.3. Análisis de la sección de rotura

El análisis de la superficie de fractura realizado mediante el MEF indica que toda la sección neta de la probeta B7-CC muestra los valores máximos de la tensión equivalente ( $\bar{\sigma}$ ) en el instante previo a la rotura del material, como se puede ver mediante la corrección de color realizada sobre la imagen original aportada por el análisis numérico (Fig. 4.57); en la figura se

revela como aquellas zonas en las que se encuentran las mayores concentraciones de trazas, son indicativas de la mayor actividad de la zona y por tanto existe una probabilidad superior para que se dé el comienzo del proceso de fractura en ellas. Esto se ajusta exactamente con la fractografía del ensayo real, tanto en la zona correspondiente a la ZPF como en la sección del material situado en la entalla opuesta.

Aunque en principio las entallas son muy parecidas, la imagen revela que, aunque semejantes, las trazas que se observan en las zonas de entalla presentan claras diferencias que se manifiestan tanto en la curvatura como en la distribución de las mismas. Esta diferencia entre ellas, podría ser indicativa de cuál sería la entalla en la que se podría iniciar la detonación de la fractura final por separación de superficies. Las zonas de concentraciones de trazas se encuentran distribuidas en dos planos, el plano de entalla y el plano que une ambos flancos de entalla. Esto presenta una correspondencia directa con la fractografía real de la zona, que indica como la fractura se ha salido claramente del plano de entalla dando lugar a una rotura marcadamente anisótropa.

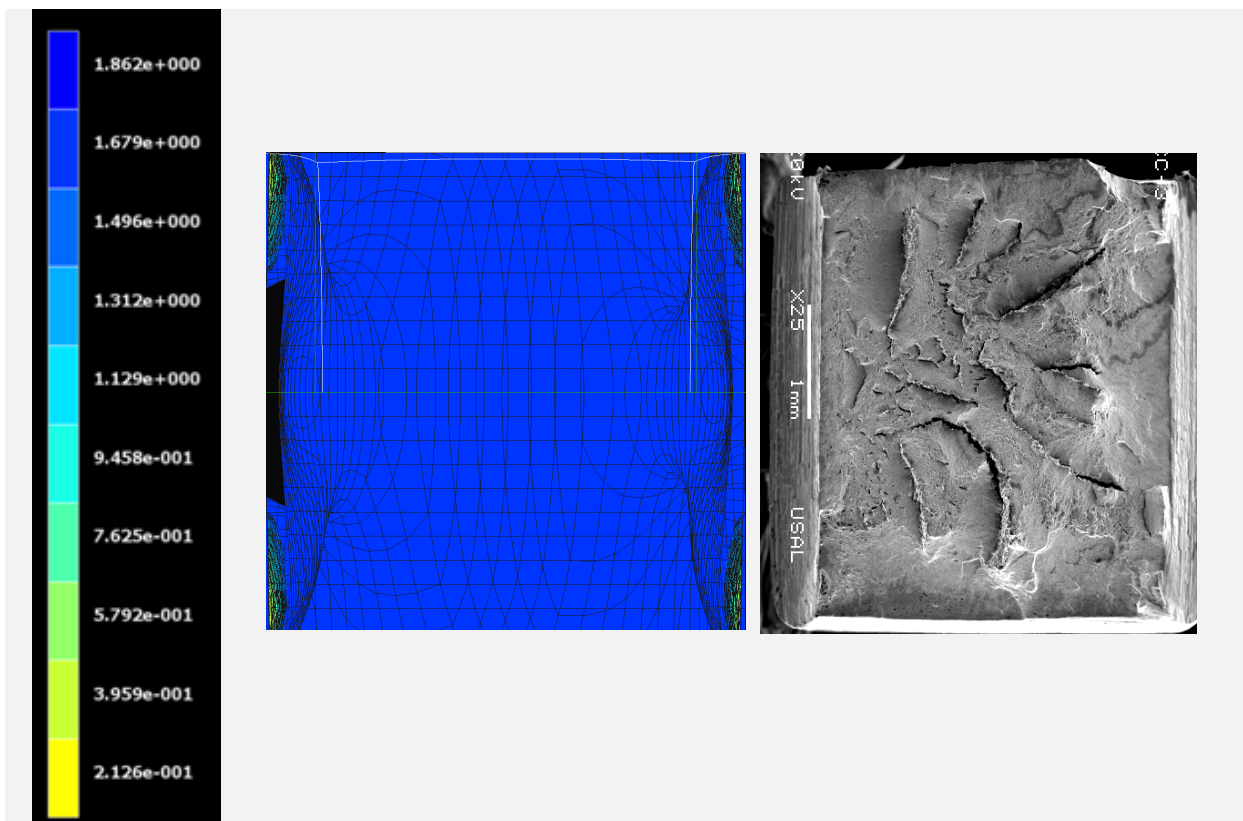


Fig. 4.57. Distribución de  $\bar{\sigma}$  y superficie de fractura de la probeta B7-CC; realizada por medio de una corrección de color sobre la original.

#### 2.6.4. Evolución de las variables internas en el fondo de entalla

En este punto se va a representar la evolución de las variables internas a lo largo del ensayo virtual correspondiente a la sollicitación de tracción, focalizando la atención en el nodo central existente en el fondo de entalla.

El análisis de la deformación plástica equivalente en el fondo de las entallas indica que ambas presentan un comportamiento semejante aunque diferenciado, apreciándose un incremento en la deformación plástica de la entalla izquierda respecto a la derecha (Fig. 4.58). En ambas entallas se observa que la deformación plástica equivalente comienza a partir del 20% inicial del ensayo bajo sollicitación de tracción, lo que indica que hasta entonces toda la probeta se encuentra en régimen elástico ( $\bar{\sigma} < \sigma_y$ ) puesto que es en el fondo de entalla donde se localizan los valores máximos de deformación plástica, como ya se hizo patente en apartados anteriores. A partir del 20% de la duración del ensayo el material empieza a experimentar una ligerísima deformación plástica que se va a acusar notablemente con un cambio en el valor de la pendiente a partir del 30% del ensayo.

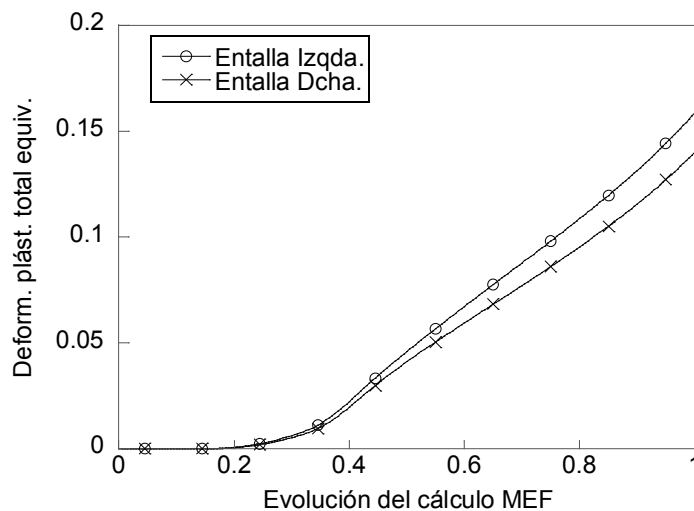


Fig. 4.58. Deformación plástica total equivalente de los nodos situados en el fondo de entalla de la probeta B7-CC.

El comportamiento de los fondos de entalla frente a la tensión equivalente de von Mises (véase la Fig. 4.59) es prácticamente indiscernible entre ambas. En ellas se observa cómo durante el 20% inicial del ensayo el material presenta un comportamiento lineal, lo cual es compatible con la deformación plástica nula encontrada en este segmento ( $\bar{\sigma} < \sigma_y \Rightarrow$  dominio elástico). Entre el 20 y el 30% del ensayo el valor tensional se estabiliza en valores próximos

a 1.6 GPa. A partir del 30% del ensayo experimenta un claro incremento de  $\bar{\sigma}$  hasta alcanzar 1.8 GPa, valor en el cuál se mantiene hasta la finalización del ensayo.

El valor la tensión hidrostática (ver Anexo II) es muy similar en ambos fondos de entalla, siendo ligeramente superior en la entalla izquierda. Esta ligera discrepancia en la tensión hidrostática lleva asociado un efecto de gradación sobre los valores de la triaxialidad, donde se observa como en todo momento del ensayo la entalla izquierda presenta un valor más elevado de la triaxialidad que la entalla derecha (Fig. 4.60).

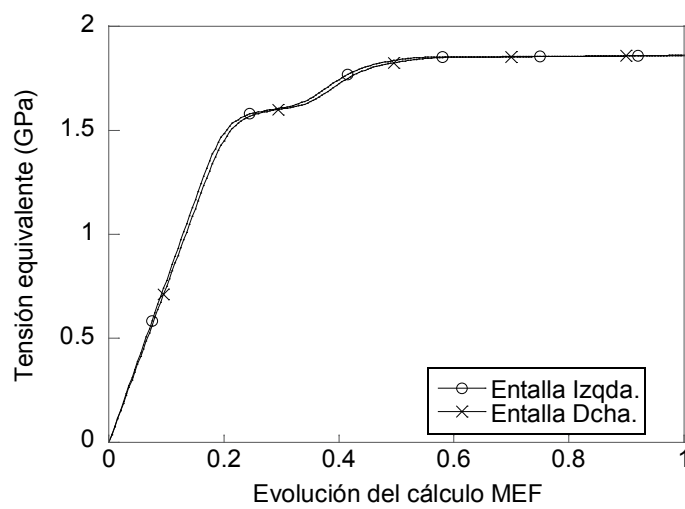


Fig. 4.59. Tensión equivalente de von Mises: fondo de entalla, probeta B7-CC.

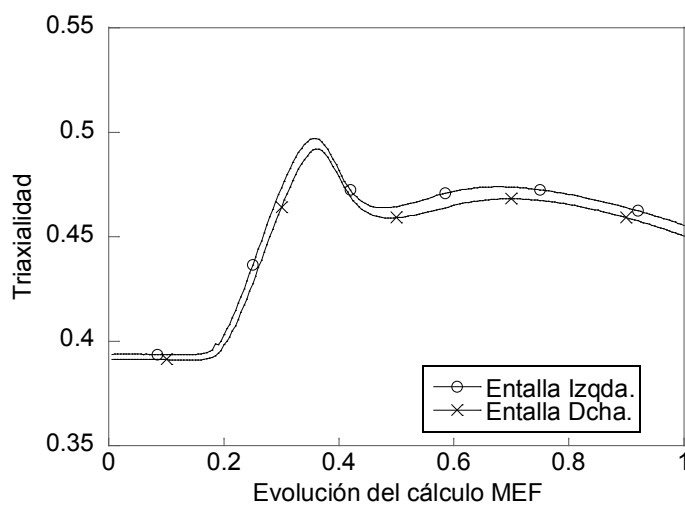


Fig. 4.60. Evolución de la triaxialidad tracción: fondo de entalla, probeta B7-CC.



### 3. SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS BAJO SOLICITACIÓN DE FLEXIÓN POR CUATRO PUNTOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Para la simulación por elementos finitos del ensayo de flexión por cuatro puntos sobre probetas entalladas tipo PA y PC se ha hecho necesario aumentar considerablemente el número de elementos, así como el tiempo de cálculo en el que se desarrolla el ensayo, todo ello debido a las características del ensayo de flexión.

El ensayo de flexión es un ensayo enormemente agresivo que conlleva elevadas deformaciones plásticas; éstas se localizan fundamentalmente en la sección de la entalla y conllevan asociadas un retorcimiento de la sección. En la mayoría de los ensayos el pegamento, que sirve de adherencia entre el extensómetro y la probeta, no ha sido capaz de soportar las deformaciones subyacentes y se ha desprendido. Esta característica ha marcado el desarrollo del capítulo y ha hecho necesaria, en la mayor parte de los casos, la toma de desplazamientos mediante el puente o cruceta de la máquina de ensayo. De este hecho se deriva que para establecer la concordancia entre los resultados experimentales y numéricos se presenten las gráficas en las que se establece la fuerza que se ejerce sobre el actuador  $F$  frente al desplazamiento  $u_p$  del puente o cruceta actuadora de la máquina de ensayo.

La forma en que el programa de cálculo mediante el MEF establece la fuerza que se ejerce sobre el rodillo superior se hace a partir de los nodos que lleva asociados; de este modo cuando en el proceso de flexión virtual se establece un cambio de nodo, la gráfica que proporciona el programa de cálculo presenta unos picos característicos. Para evitar la aparición de estos se puede recurrir a un mallado más denso en esa zona o a realizar el ensayo en un mayor número de pasos; esto no implica que el pico desaparezca pero sí se produce una atenuación en el valor del mismo. Con el fin de evitar en mayor medida la presencia de picos, se ha optado por un mallado bastante denso en la zona del rodillo; esto ha sido suficiente en el caso de probetas con entalla tipo A; sin embargo, las altas deformaciones que presenta la entalla tipo C han obligado a aumentar el número de pasos de cálculo al doble del utilizado en los ensayos de las probetas con entalla tipo A. Si los valores donde se encontraba la rotura en la entalla hasta este momento se presentan en el instante de cálculo 200, para las probetas con entallas tipo C se van a presentar en el instante 400.

Para el estudio del comportamiento de las probetas a flexión se han diseñado varias mallas, todas ellas con idénticos resultados experimentales. Aunque las mallas diseñadas son diferentes en cuanto a su diseño, todas ellas presentan unas características muy similares: tienen una mayor definición en la zona de la entalla y en la región de contacto de los rodillos. Tras la definición de las varias mallas realizadas, y todas ellas ejecutadas, se ha visto que se

necesita una gran densidad de mallado en la zona de la entalla, puesto que si no los elementos se distorsionan en exceso y el programa no procede con el cálculo. Por tratarse de un estudio en el que no se cuenta con valores previos para determinar la convergencia de la solución (como era el caso del ensayo de tracción), se ha hecho necesario el estudio de varios tipos de malla. Fueron analizados básicamente dos tipos de mallado un mallado que se podría denominar *rectangular* y un mallado tipo *tela de araña*, denominado así por la similitud que se observa con ésta. Se comprobó que, aún presentando el mallado rectangular mayor número de elementos, eran las mallas tipo tela de araña las que recogían mejor la información sobre el proceso de cálculo. Estas últimas presentan un diseño específico que presentan sustanciales ventajas respecto las de matriz rectangular, ya que con menor número de elementos definen perfectamente la curva de comportamiento con las restricciones impuestas; factor este determinante para el cálculo debido a las limitaciones informáticas.

La presencia de simetría en la probeta hace que para el desarrollo del ensayo sólo sea necesario el diseño de un cuarto de probeta, aunque, en la presentación de resultados, se presenta la probeta completa. La característica del ensayo de flexión hace que sea necesaria la modelización de dos cilindros, el cilindro superior sobre el que se aplique la carga y el cilindro inferior que sirve de soporte de la probeta (Fig. 4.61). El cilindro superior como encargado de suministrar la carga de ensayo es necesario que se desplace según las condiciones del problema. El cilindro inferior con única función de soporte, tiene impedido su movimiento en cualquier dirección.

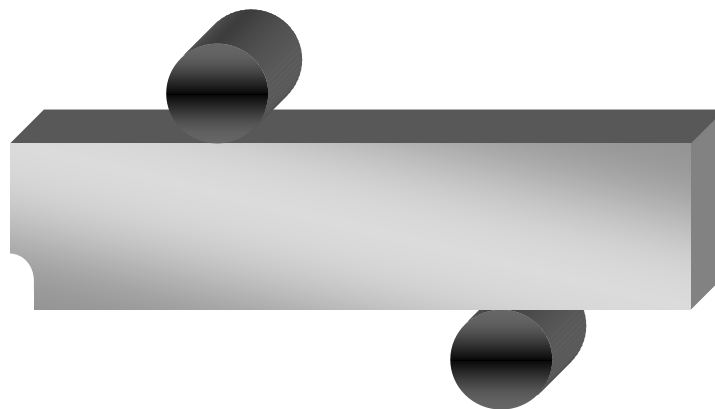


Fig. 4.61. Modelización del ensayo de flexión por cuatro puntos (1/4 de probeta).

En cuanto a las curvas de comportamiento de los distintos aceros que se van a analizar, únicamente se indica que al tratarse de los mismos aceros que los que se han ensayado mediante solicitaciones de tracción no se hace necesaria la presentación de las curvas de comportamiento de los materiales analizados (curvas tensión–deformación plástica) puesto que son las mismas que las empleadas anteriormente.

### 3.1. Análisis numérico de la muestra B0-A

En la Fig. 4.62 se muestra la malla utilizada para el análisis de la probeta B0-A-MEF. Presenta un conjunto de 28237 nodos distribuidos en 24840 elementos de tipo HEX de 8 nodos por elemento. Con relación a los datos del proceso de cálculo se ha obtenido: ratio de singularidad: 0.073227, ratio de convergencia: 0.009874. Los detalles de verificación de la geometría de la entalla se presentan en la Tabla 4.7. En la gráfica de la Fig. 4.63 se presenta la evaluación de la curva de carga-desplazamiento del puente (curva  $F-u_p$ ), obtenida mediante el MEF frente a la experimental (EXP). Tal y como se puede apreciar, la curva numérica MEF presenta un comportamiento excelente tanto en cuanto a la forma como a los valores de carga. La mayor discrepancia es debida a algún tipo de error en la medida experimental del desplazamiento del puente, lo que ha provocado un pequeño pico que no se observa en la numérica.

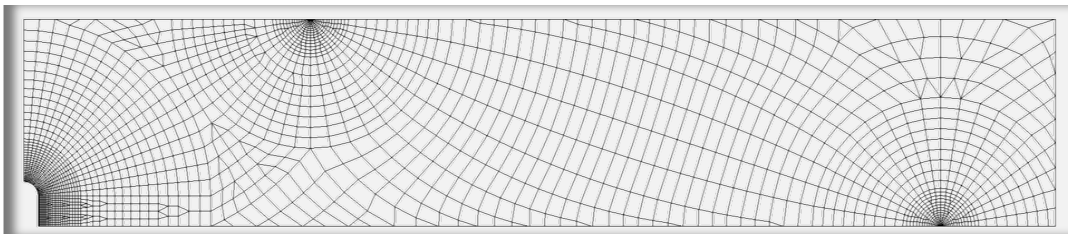


Fig. 4.62. Malla realizada para la probeta B0-A.

Tabla 4.7. Dimensiones características (mm) de la entalla de la probeta B0-A.

PROBETA	B0-A	
Entalla	$C_{Real} = 1.944$	$C_{MEF} = 1.944$
	$2\xi_{Real} = 1.241$	$2\xi_{MEF} = 1.241$

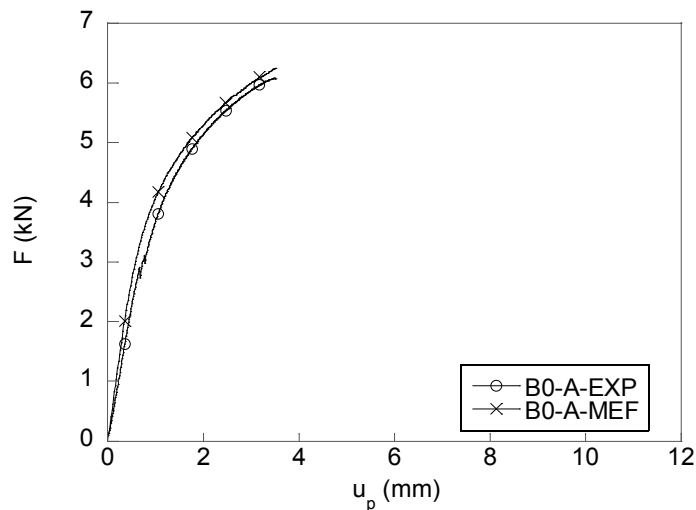


Fig. 4.63. Curva  $F-u_p$  experimental (EXP) vs simulación numérica (MEF); probeta B0-A.

### 3.1.1. Deformación plástica equivalente

En la evolución de la deformación plástica equivalente se observa cómo desde los primeros instantes de carga (de la simulación MEF), comienzan a aparecer indicios de la misma en el fondo de la entalla, si bien ésta no es altamente significativa. A medida que avanza el ensayo, existe un crecimiento muy lento y progresivo de la deformación plástica equivalente en torno a la entalla; aunque no es hasta el INC 100 cuando se empieza a vislumbrar la forma geométrica definitiva, que recuerda a una cúpula que recubre buena parte del perfil del fondo de entalla (Fig. 4.64). Una vez que se manifiesta la forma cupular definitiva en torno a la entalla, se observa un crecimiento progresivo de la misma a medida que avanza el proceso de flexión. Este crecimiento de la forma se mantiene hasta alcanzar en el instante previo a la rotura del material los valores máximos de deformación plástica equivalente (Fig. 4.65), que oscilan entre los  $-0.016$  de las zonas más alejadas de la entalla hasta los  $+0.54$  del material situado en el fondo de entalla.

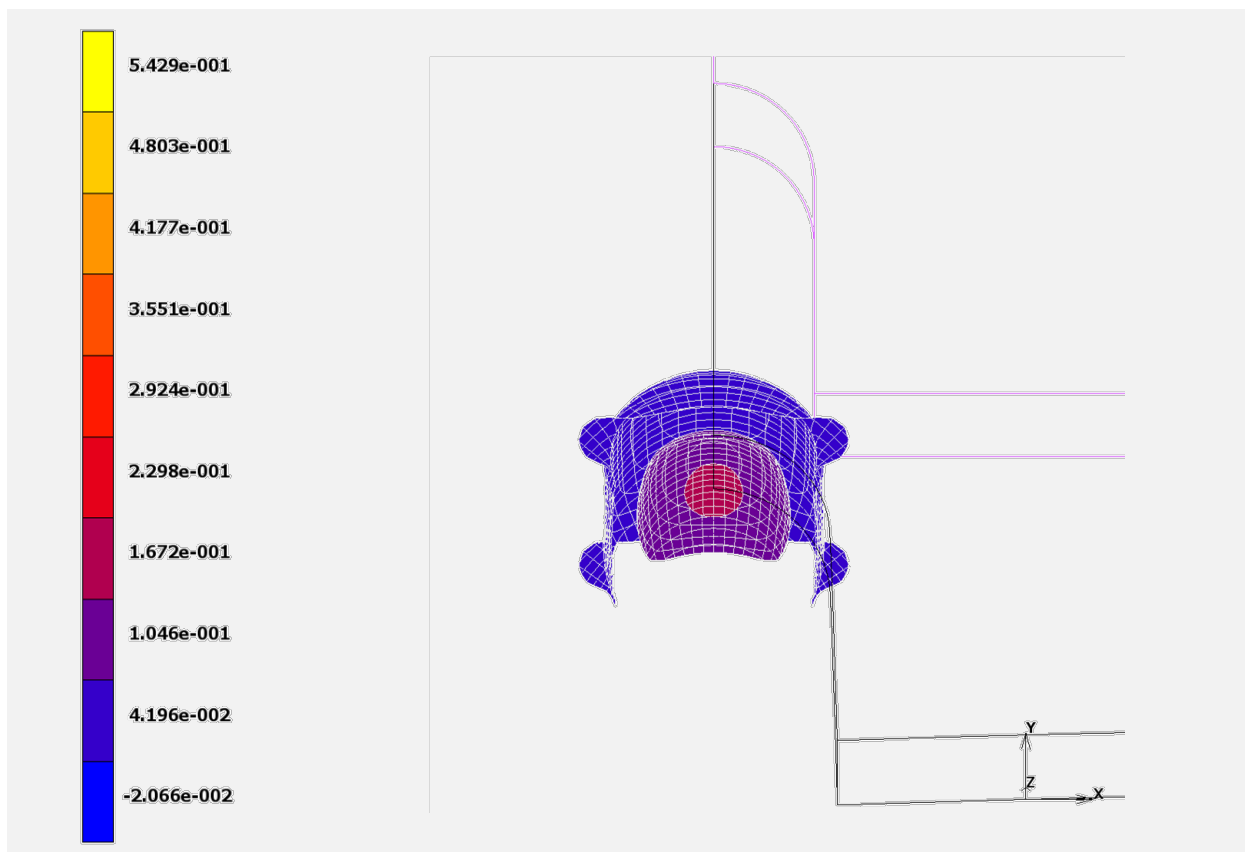


Fig. 4.64. Deformación plástica equivalente; mitad del ensayo de flexión; probeta B0-A.

A medida que las iso-superficies de deformación plástica equivalente se acercan al borde de la probeta se observa un cambio en la curvatura de la misma, consecuencia directa del efecto de borde. La curvatura se aprecia diferente en función de la zona considerada; mientras que en

los flancos de la zona que bordea la entalla se curvan hacia el exterior, en la zona profunda de la entalla se observan dos cambios de curvatura: el primero hacia el interior (y por tanto en dirección al fondo de entalla) y el segundo hacia el exterior de la probeta, generando una superficie característica, que se detalla en el isométrico de la Fig. 4.65.

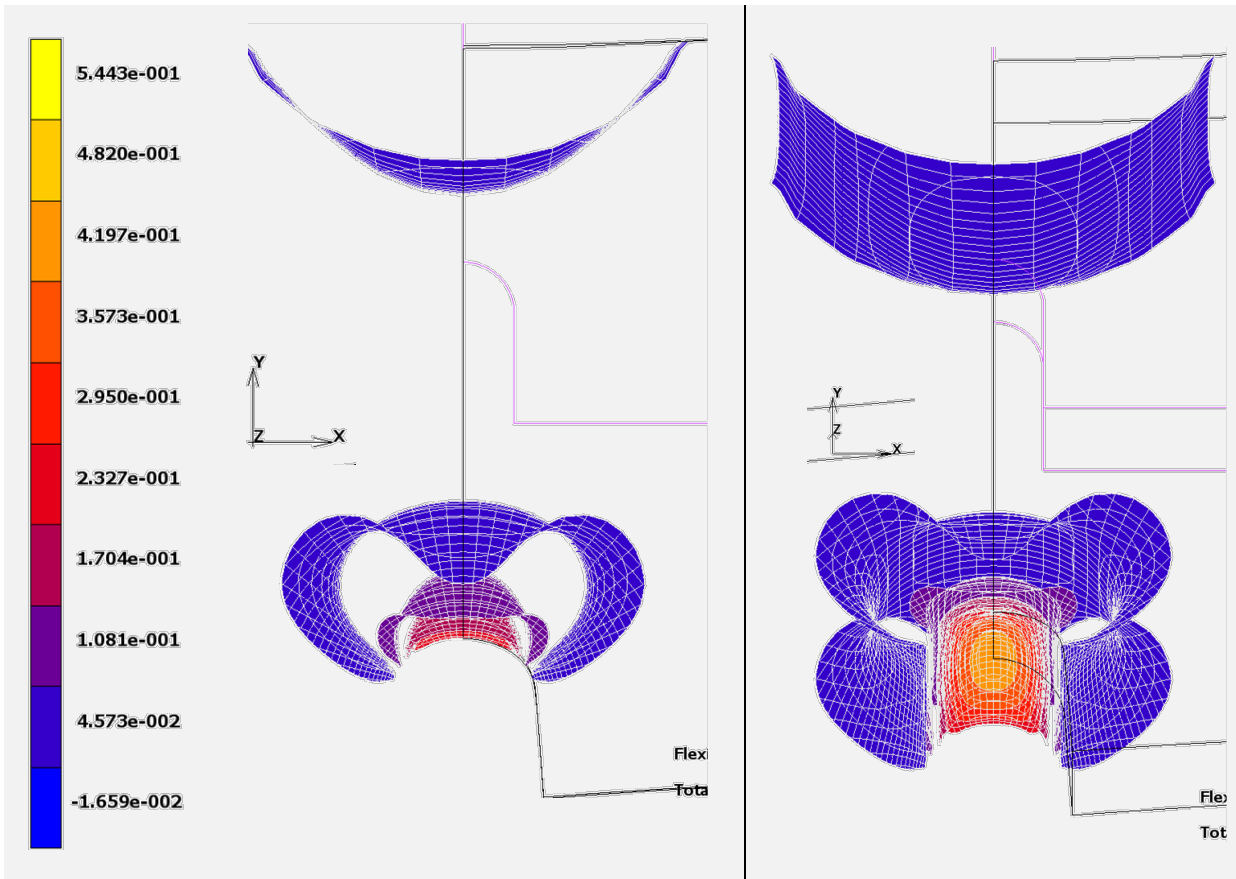


Fig. 4.65. Deformación plástica equivalente, en el instante previo a la rotura de la probeta B0-A, solicitada a flexión.

### 3.1.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

La evolución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises recuerda la de la deformación plástica equivalente. Se puede observar en la imagen de la Fig. 4.66 cómo los valores máximos de la tensión en los primeros instantes de cálculo (INC 20) se localizan en el fondo de entalla, presentando una forma geométrica cupular semejante a la deformación plástica equivalente. A medida que las superficies se acercan al borde de la probeta se observa el cambio de curvatura en las mismas, consecuencia directa del efecto de borde. En la parte superior de la probeta se observa la aparición de tensiones (0.4 GPa) que se distribuyen de un modo plano a lo largo de la probeta, surgiendo valores mucho menores que los que se presentan en el fondo de entalla. A medida que avanza el ensayo de flexión por cuatro puntos la distribución de las tensiones aumenta en complejidad, situándose los valores más relevantes

en las zonas próximas a la entalla; no obstante, se pueden observar picos de tensión, con distribución en espiral, en la zona de ataque de los rodillos.

Los valores máximos de la tensión equivalente de von Mises se distribuyen a lo largo de la sección neta (fondo de entallas) y se encuentran distribuidos en dos focos principales: el primer foco se encuentra situado en el fondo de entalla y es el que soporta los valores máximos; el segundo foco se encuentra situado en el borde opuesto de la entalla y en él se presentan valores muy próximos a los valores máximos encontrados en el fondo de entalla. Los campos equi-tensionales en las zonas más alejadas de la entalla no se mantienen planos, como se puede observar en la Fig. 4.67 y, aunque el valor de la tensión equivalente de von Mises es bajo, no se podría hablar de una fibra o plano neutro, ya que la tensión presenta un valor medio de 0.36 GPa.

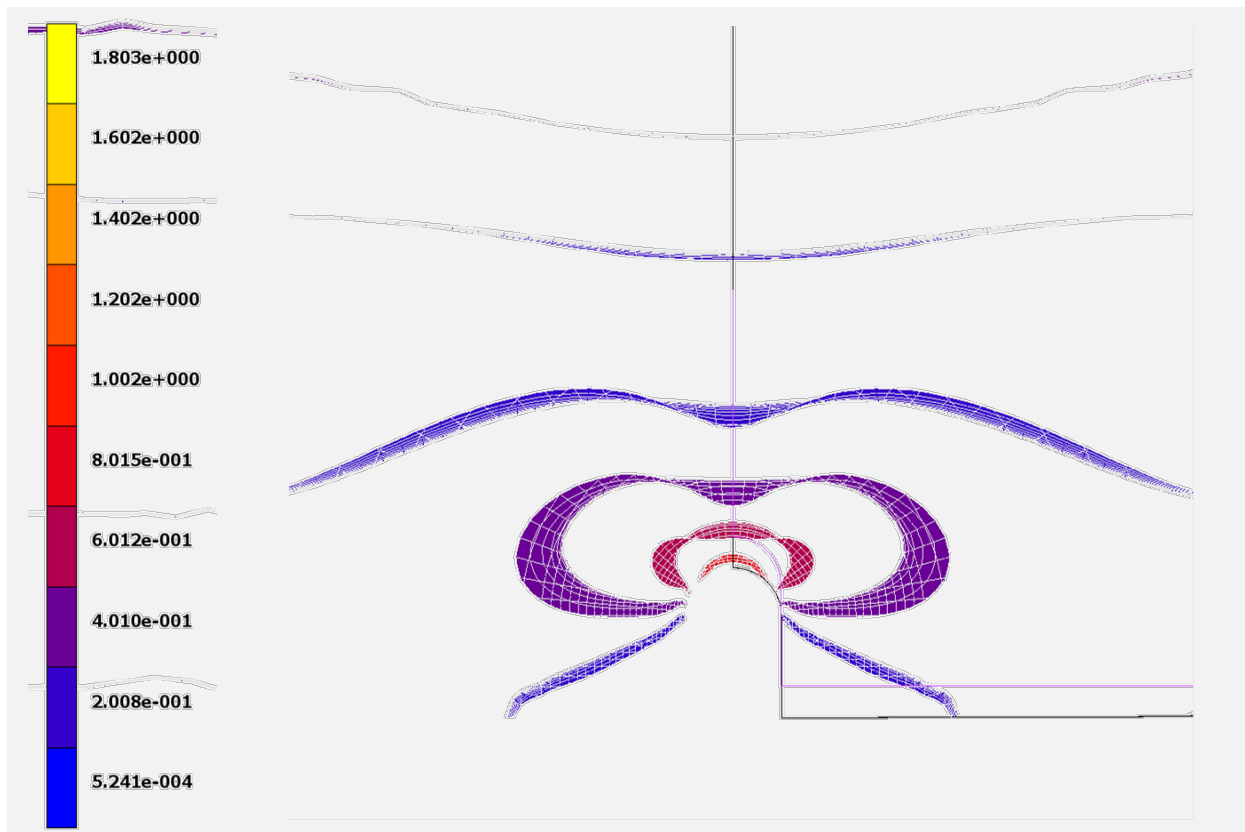


Fig. 4.66. Tensión equivalente de von Mises, INC 20 del cálculo; probeta B0-A.

En la Fig. 4.67 se presenta una ampliación de las vistas frontal e isométrica del material que se encuentra circundante a la entalla. En ella se observa claramente la alta concentración de tensiones que tiene lugar en la zona, con valores máximos en el centro de entalla que se van atenuando a medida que el punto de vista se aleja del centro de entalla. La forma geométrica de la distribución también se observa cambiante, partiendo de una forma que se podría aproximar a la elíptica en la zona central y que se va abriendo progresivamente hacia la

frontera de la probeta, evolucionando hacia una curva intermedia entre la *Cardioide* y el *Caracol de Pascal*. Los valores máximos de tensión oscilan entre los 1.13 GPa y los 1.60 GPa en el fondo de entalla.

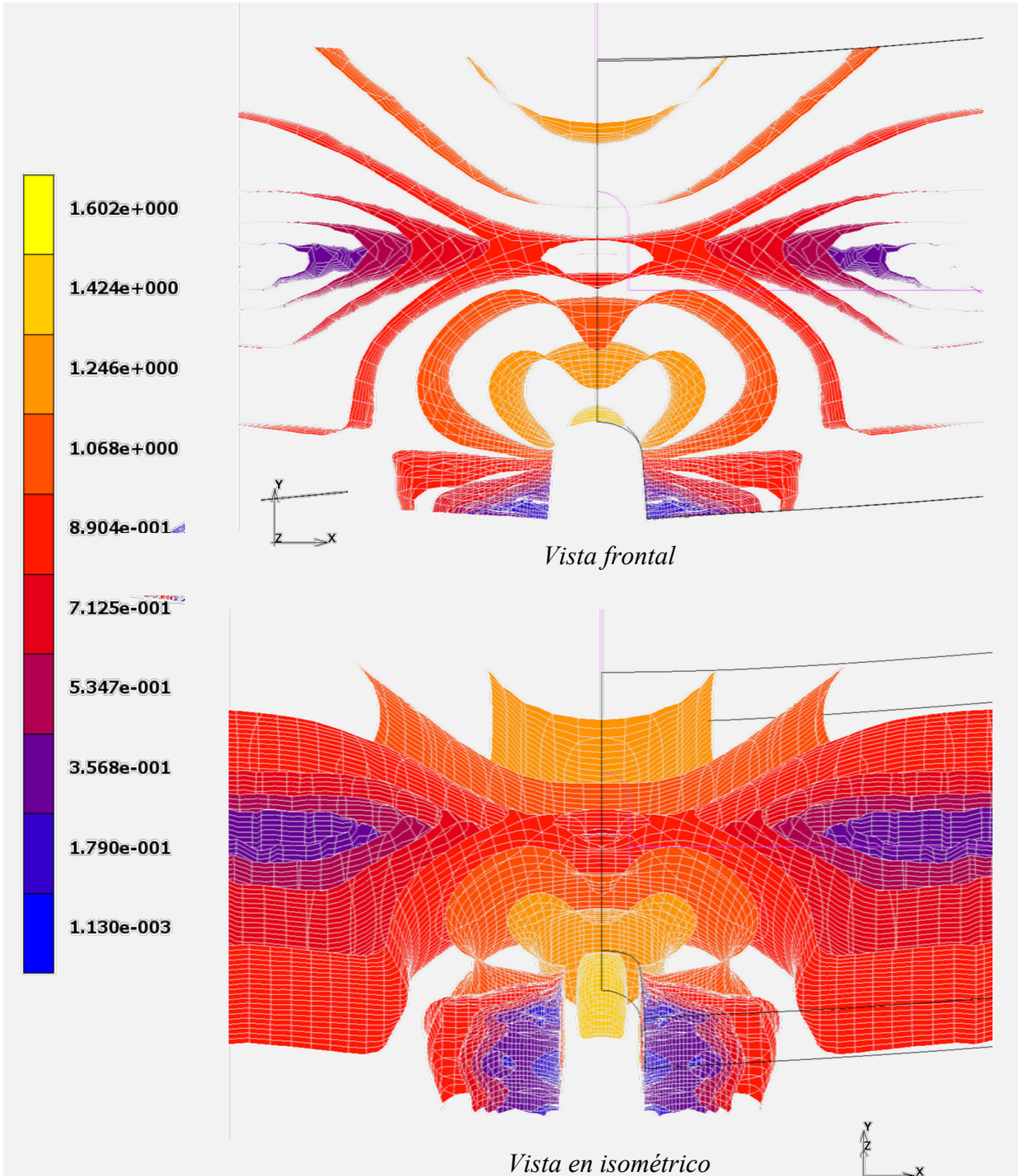


Fig. 4.67. Tensión equivalente de von Mises en el último instante de flexión previo a la rotura del material, probeta B0-A.

### 3.1.3. Análisis de la sección de rotura

La distribución de la tensión equivalente de von Mises en la sección de rotura de la probeta en el instante previo a la fractura del material junto con la fractografía de la zona se presentan en la Fig. 4.68. Como se puede observar, es fácilmente identificable la ZPF, la cual aparece en color amarillo y se corresponde fielmente con la imagen que presenta la fractografía de la zona. Los niveles mayores de tensión se presentan en la zona adyacente a la entalla, con valores próximos a los 1.6 GPa. Es notable la presencia de elevadas tensiones en la sección superior de la probeta, con valores muy próximos a los que se describen en la ZPF (1.42 GPa). La elevada complejidad de la distribución de los campos tensionales a lo largo de la sección, puesta de manifiesto en los encuentros de las superficies de tensión constante, es reveladora puesto que es indicativa de que la fractura presentará un carácter marcadamente anisótropo.

En la zona central de la probeta se muestra una franja, en color rojo, en la que se observa un elevado número de trazas lo cual se debe a que el material en esta zona experimenta un descenso brusco en el valor de la tensión. Esta franja se corresponde fielmente con la fractografía de la zona donde se observa un cambio sustancial en la misma y que en algún caso particular aparece acentuada mediante una fisura longitudinal a su través.

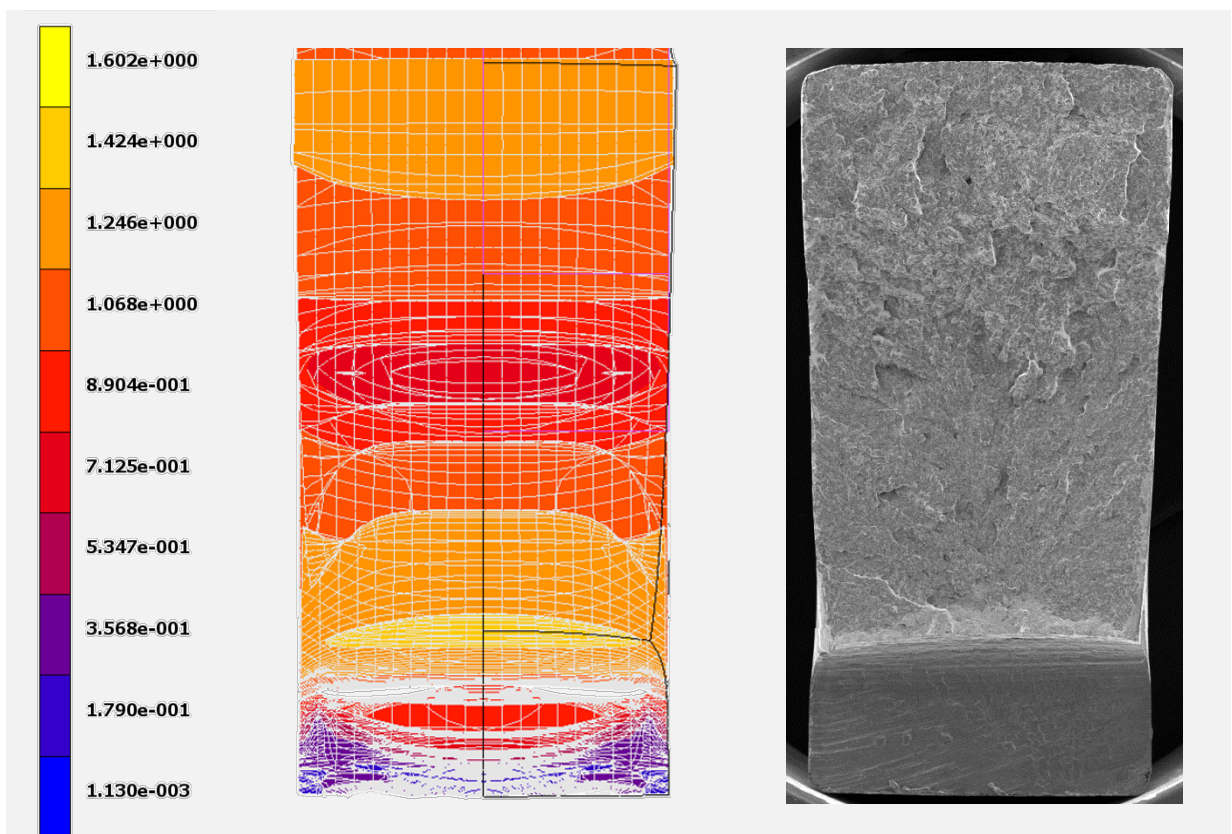


Fig. 4.68. Imagen comparativa entre los campos de tensiones equivalente de von Mises de la probeta B0-A en el instante previo a la rotura del material y la fractografía real de la misma.



### 3.2. Análisis numérico de la muestra B4-A

La malla elegida para la muestra B4-A (Fig. 4.69) presenta un total de 30910 nodos distribuidos a lo largo de 27910 elementos de tipo HEX con 8 nodos por elemento. En la Tabla 4.8 se presentan las dimensiones características de la entalla.

La comparación entre la curva MEF y la curva experimental se presenta en la Fig. 4.70; el comportamiento es bastante bueno, situándose la curva numérica sobre la alcanzada experimentalmente. En cuanto a los datos resultantes del proceso de cálculo, se ha obtenido un ratio de singularidad de 0.066024 y un ratio de convergencia de 0.0008426.

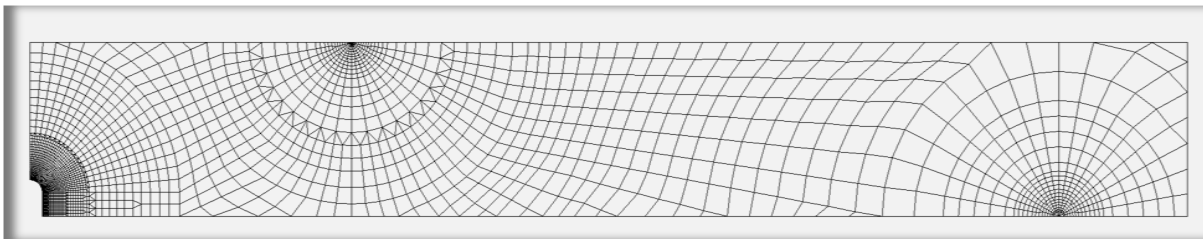


Fig. 4.69. Malla realizada para la probeta B4-A.

Tabla 4.8. Dimensiones características (mm) de la entalla de la probeta B4-A.

PROBETA	B4-A	
Entalla	$C_{Real} = 1.411$	$C_{MEF} = 1.411$
	$2\xi_{Real} = 0.947$	$2\xi_{MEF} = 0.947$

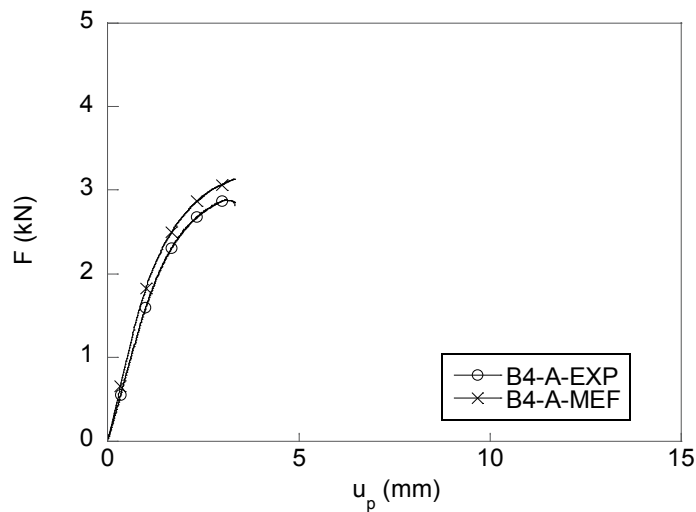


Fig. 4.70. Curva  $F-u_p$  experimental (EXP) vs simulación numérica (MEF); probeta B4-A.

### 3.2.1. Deformación plástica equivalente

La deformación plástica equivalente presenta, como en el caso de la probeta B0-A, una distribución de superficies de deformación constante en forma de cúpulas que circundan las zonas del material próximas al fondo de entalla. La zona más afectada por la deformación plástica equivalente se encuentra en los puntos que constituyen el perfil del fondo de entalla, en los cuales se presentan valores de 0.436, lo que supone un ligero decremento respecto los 0.54 observados en la probeta B0-A.

La imagen correspondiente a la deformación plástica equivalente en el instante previo a la rotura del material se refleja en la Fig. 4.71. En ella se observa la variabilidad en los valores de la deformación plástica en el fondo de entalla, la cual exhibe un elevado conjunto de superficies en torno a la zona profunda de la entalla. También se aprecia el cambio de curvatura de las superficies de deformación constante, consecuencia del efecto de borde que se produce cuando éstas alcanzan los márgenes exteriores de la probeta.

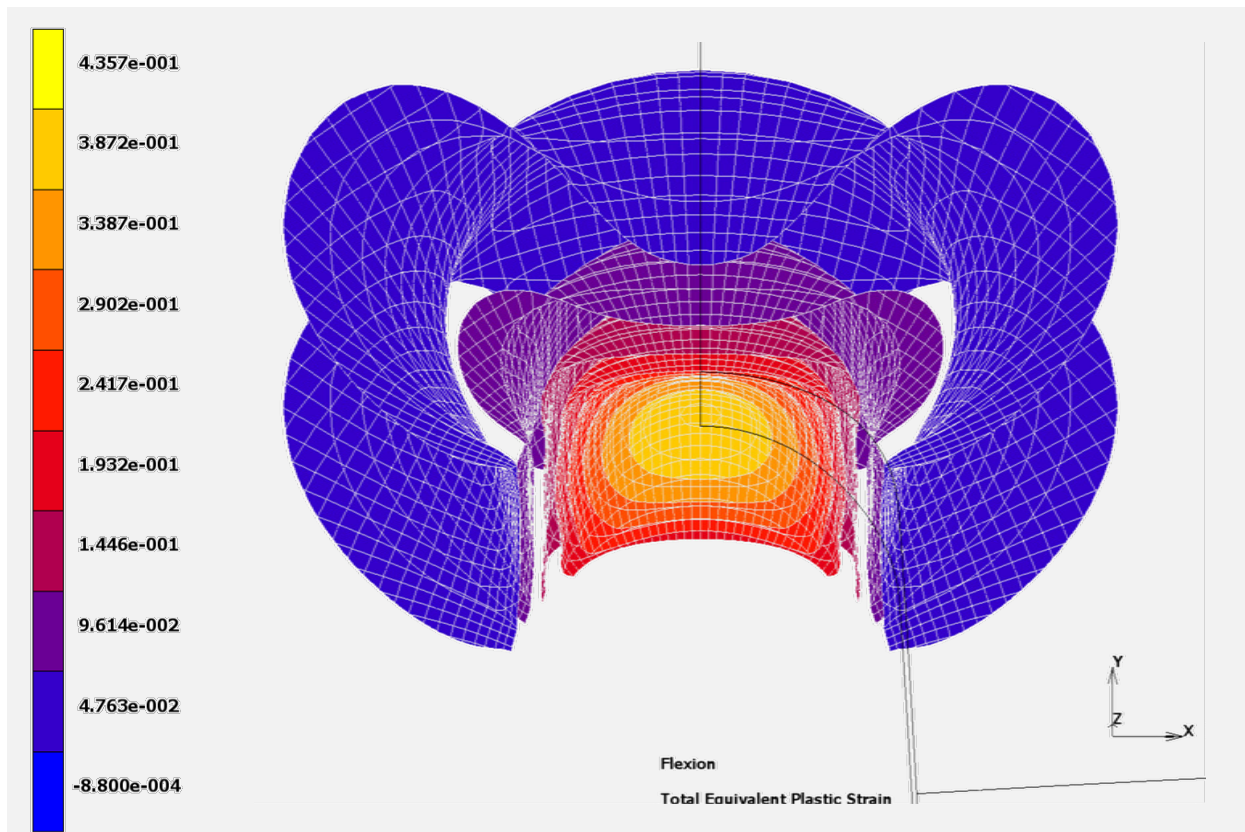


Fig. 4.71. Deformación plástica total equivalente en el instante previo a la rotura final por separación de superficies, probeta B4-A.

### 3.2.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

En cuanto a la tensión equivalente o efectiva de von Mises se refiere se puede comprobar, en la distribución de la misma mostrada en la Fig. 4.72, que su comportamiento es semejante al que se presenta para el acero B0 (probeta B0-A). Los valores máximos se concentran en el centro de entalla y se encuentran en el orden de 1.53 GPa, lo que supone un ligero descenso sobre los 1.6 GPa que presentaba la probeta B0-A.

El volumen de extensión de la zona de máximas tensiones es muy superior al que mostraba la probeta B0-A, presentándose prácticamente en toda la sección de rotura valores máximos de la tensión equivalente o efectiva de von Mises, siendo la excepción la zona central de la sección de rotura donde las tensiones experimentan un ligero descenso, hasta alcanzar aproximadamente los 1.2 GPa. Teniendo en cuenta un criterio de plastificación tipo von Mises ( $\bar{\sigma} > \sigma_y \Rightarrow$  dominio plástico), y conociendo además el valor del límite elástico del acero B4 ( $\sigma_y = 1.02$  GPa), se puede observar fácilmente la extensión de la probeta que se encuentra bajo el dominio plástico ( $\bar{\sigma} \geq 1.02$  GPa).

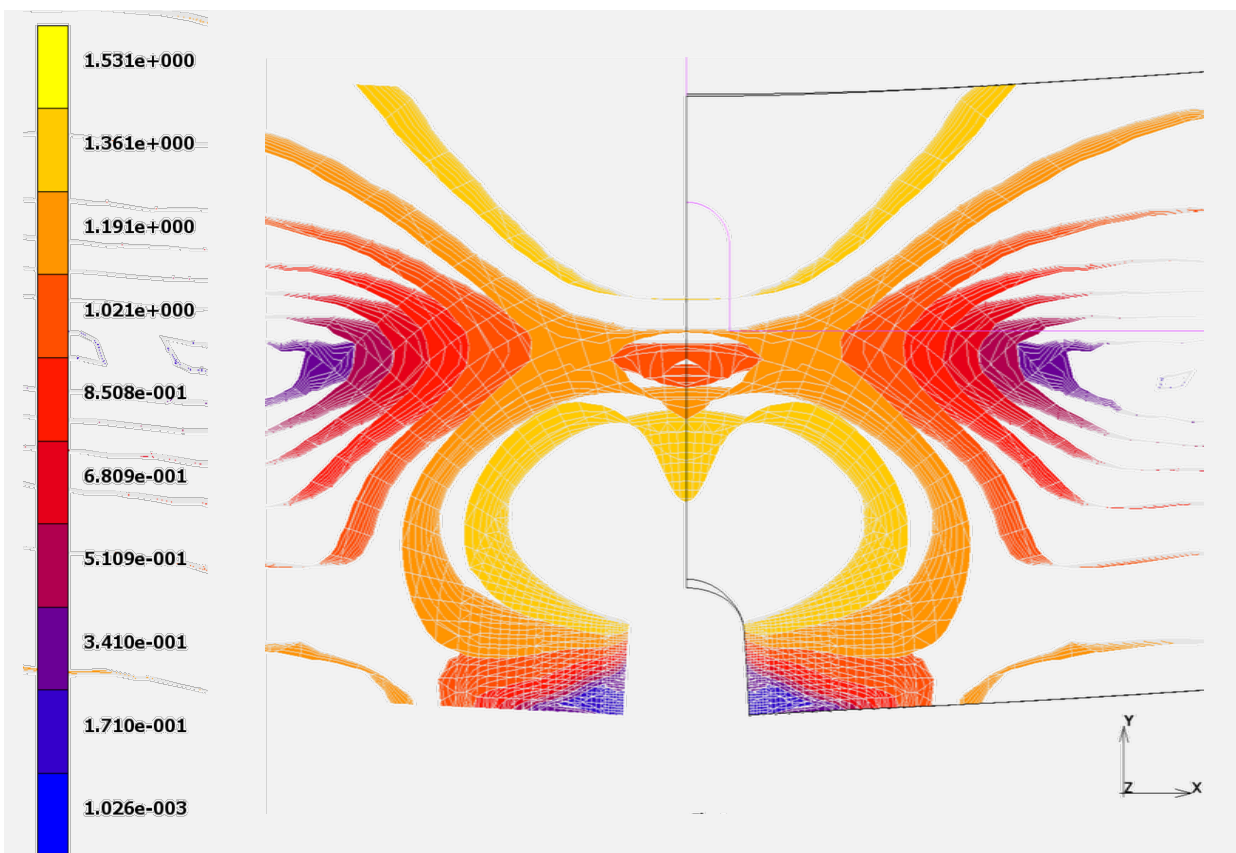


Fig. 4.72. Tensión equivalente o efectiva de von Mises en el instante previo a la rotura final; probeta B4-A.

### 3.2.3. Análisis de la sección de rotura

Como se puede deducir de la imagen presentada en la Fig. 4.73 aportada por elementos finitos a través de una corrección de color (al igual que se ha venido realizando en casos anteriores), la práctica totalidad de la sección de rotura, de la probeta B4-AA, presenta valores máximos de la tensión equivalente de von Mises (1.5 GPa), salvo en la zona central donde se observa una franja de menor cuantía tensiona (0.6 GPa). Si bien es cierto que se puede observar un elevado número de iso-superficies en dicha franja, lo que es indicativo de la variabilidad tensional que está sufriendo el material circundante.

La ZPF numérica se sitúa en la zona de entalla y se enmarca en una forma muy semejante a la ZPF real de la probeta B4-A. Aparece formada por una elevada concentración de iso-superficies de elevado valor tensional con una concavidad muy marcada dirigida hacia el interior de la probeta. Ésta es mucho más acusada que la observada ya en la probeta B0-A y será un indicio de lo que se podría esperar para la probeta B7-A.

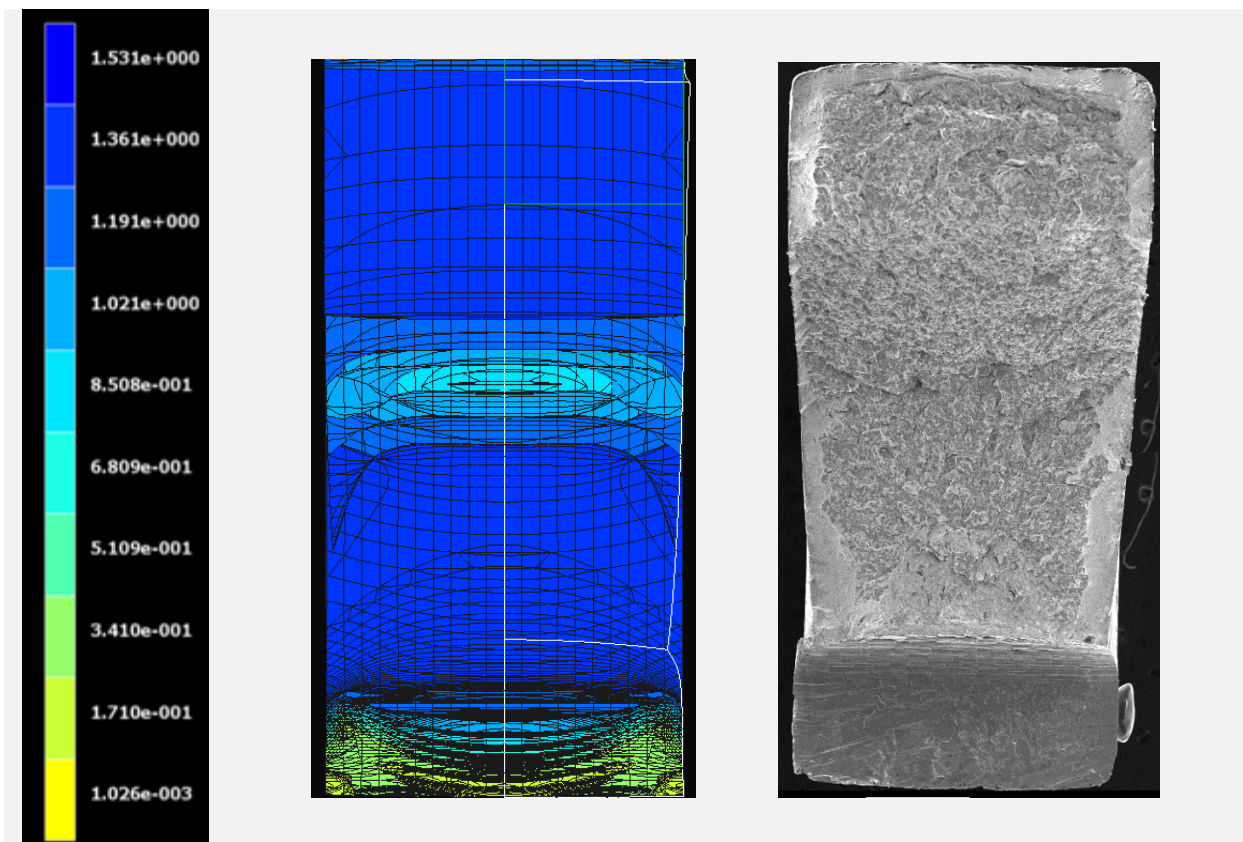


Fig. 4.73. Sección de rotura de la probeta B4-A-MEF (Corrección de color).

### 3.3. Análisis numérico de la muestra B7-A

En la Fig. 4.74 se representa la malla utilizada para el análisis numérico mediante MEF de la probeta B7-A. Se trata de una malla tipo *tela de araña*, con una alta densidad de mallado en la sección de entalla y en los puntos de ataque del rodillo. Presenta un total de 34875 nodos en 30544 elementos de tipo HEX de 8 nodos por elemento. En la Tabla 4.9 se presentan los datos dimensionales de la entalla generada para la simulación mediante MEF; se puede deducir de la misma que la única diferencia observable entre las entallas reales y las diseñadas se observa en el milímetro de diferencia que se establece entre ambas en la dimensión correspondiente al flanco de entalla. La curva  $F-u_p$  obtenida mediante el MEF es semejante a la obtenida experimentalmente, tal y como se puede apreciar en la Fig. 4.75, si bien se mantiene ligeramente por encima de ella.

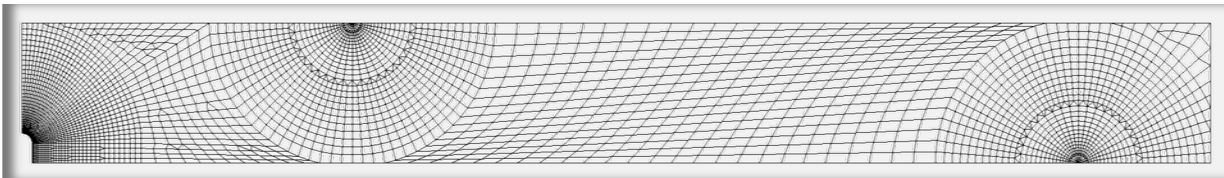


Fig. 4.74. Malla para el análisis de la probeta B7-A.

Tabla 4.9. Dimensiones características (mm) de la entalla de la probeta B7-A.

PROBETA	B0-A	
Entalla	$C_{Real} = 1.114$	$C_{MEF} = 1.114$
	$2\xi_{Real} = 0.754$	$2\xi_{MEF} = 0.753$

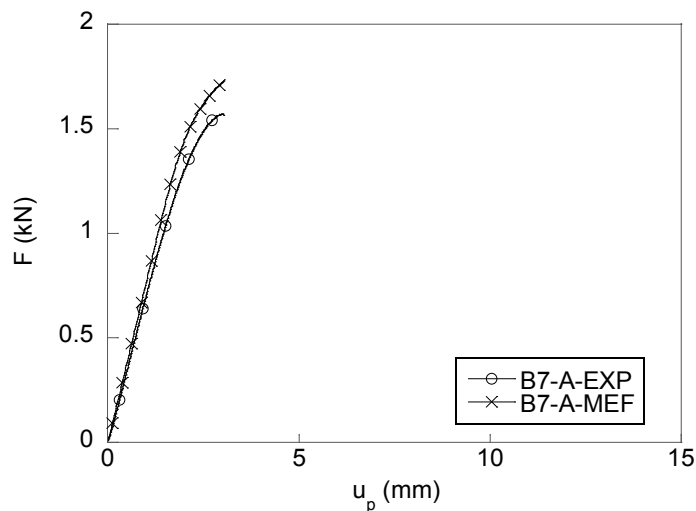


Fig. 4.75. Curva  $F-u_p$  experimental (EXP) vs simulación numérica (MEF); probeta B7-A.

### 3.3.1. Deformación plástica equivalente

En la Fig. 4.76 se presenta la distribución de superficies correspondientes a la deformación plástica equivalente de la zona de entalla, para la probeta B7-A, en el instante previo a la rotura final de la misma. Como se puede comprobar en la imagen, la probeta B7-A mantiene la misma distribución de la deformación plástica que la que se puso de manifiesto en las probetas con entalla tipo A (pequeño radio de curvatura y pequeña profundidad) mecanizadas a partir del alambroón inicial (probeta B0-A) y del acero correspondiente al cuarto paso de trefilado (probeta B4-A).

Los valores de la deformación plástica equivalente experimentan, para la probeta B7-A, una disminución substancial respecto a la observada en las probetas B0-A y B4-A; pasando de valores de 0.54 (probeta B0-A) y 0.43 (probeta B4-A) a 0.30 para la probeta B7-A, lo que supone una caída del 45% respecto a la probeta B0-A y del 30% respecto a la probeta B4-A. Lo observado es indicativo de que, a medida que aumenta el grado de trefilado del material que configura la probeta base, los valores máximos que se presentan en la deformación plástica equivalente (en el fondo de entalla) van siendo cada vez más discretos.

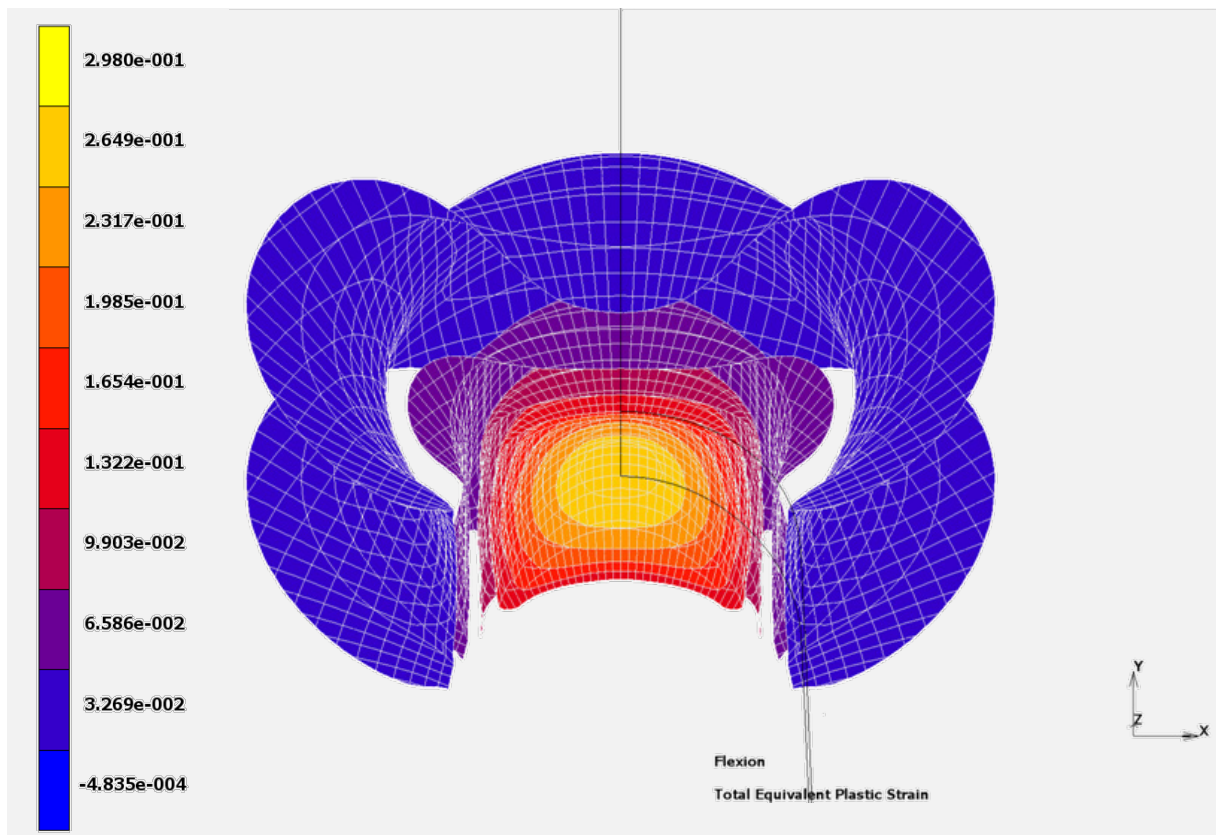


Fig. 4.76. Deformación plástica equivalente; instante previo a la rotura final; probeta B4-A.

### 3.3.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

Los valores de la tensión equivalente o efectiva de von Mises obtenidos en la simulación del ensayo de flexión por cuatro puntos mediante MEF para la probeta B7-A son ligeramente mayores a los obtenidos, mostrados en apartados anteriores, para las probetas B0-A y B4-A. Aunque la distribución de las tensiones es en esencia la misma, se puede observar cómo los valores máximos de tensión se encuentran tanto en la mitad superior como en la mitad inferior de la sección de la entalla (se cumple que  $\bar{\sigma} > \sigma_y \Rightarrow$  dominio plástico en ambas zonas) pasando por la zona central donde se observa una ligera disminución de los mismos, tal y como se puede ver en el mapa de contorno de tensiones mostrado en la Fig. 4.77.

A medida que el punto de vista se aleja de la zona del material que circunda la entalla, se aprecia una relajación de la tensión equivalente de von Mises, así como un cambio en la geometría de la distribución, dando paso a superficies que adquieren una forma geométrica marcadamente plana, salvo en aquellas zonas que se encuentran ya próximas a los rodillos, donde se observa cómo los valores de la tensión equivalente o efectiva de von Mises se vuelven a acentuar, fruto del encuentro de estos con las tensiones que ejercen los rodillos superiores e inferiores.

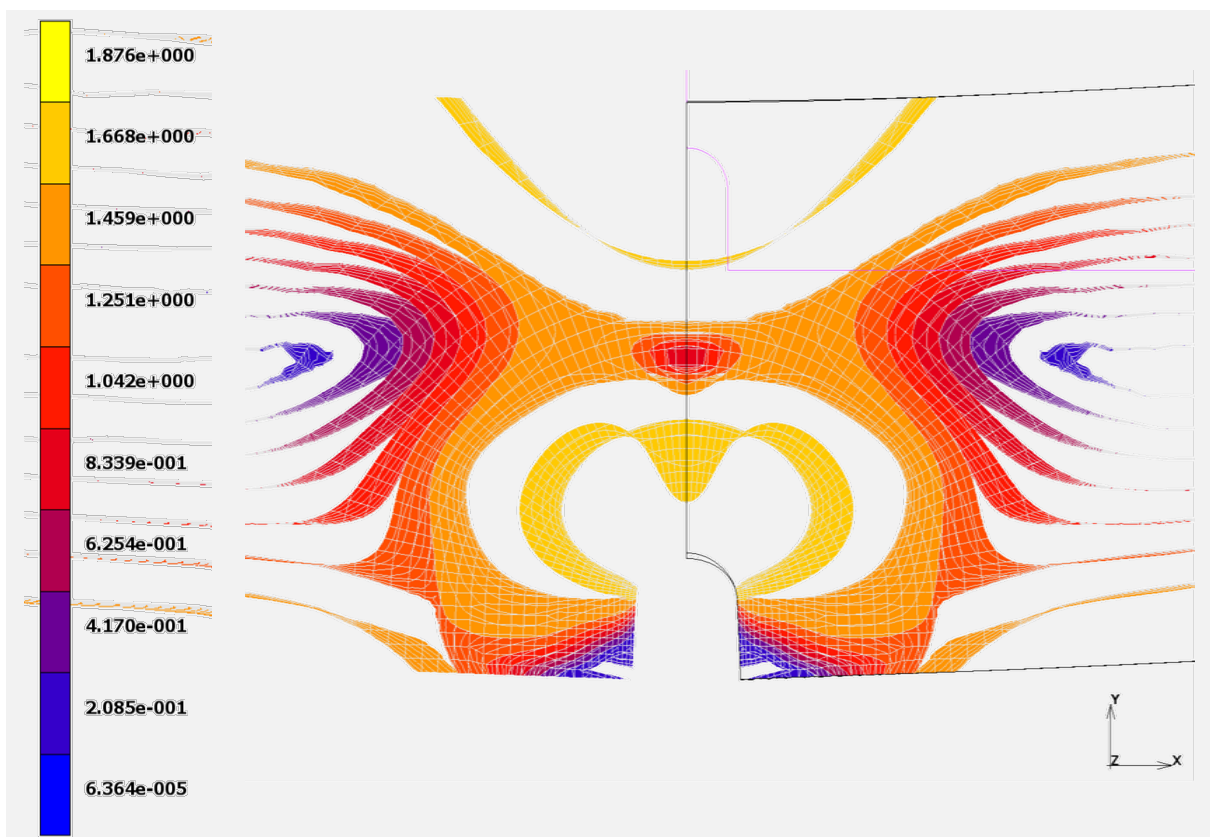


Fig. 4.77. Tensión equivalente o efectiva de von Mises, instante previo a la rotura final por separación de superficies, de la probeta B7-A.

### 3.3.3. Análisis de la sección de rotura

En la Fig. 4.78 (realizada a través de una corrección de color) se muestra la distribución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises en la sección neta de la probeta B7-A durante el momento correspondiente a la inminente fractura final, acompañada además de la fractografía de la superficie de fractura de la probeta real. En la figura se observa cómo los campos de tensiones equivalentes de von Mises presentan dos zonas amplias de actuación con valores máximos de tensión; la primera de ellas situada sobre la entalla con un ancho superior a un tercio de la probeta y la segunda zona situada en el lado opuesto de la entalla. En principio, sería complicado establecer donde se podría encontrar la ZPF; no obstante, la alta concentración de iso-superficies en la zona adyacente a la entalla indicaría la predisposición de esta zona para su situación. Esta característica coincide con la imagen fractográfica de las probetas de acero B7 con entalla tipo A (B7-A), donde se observa que la ZPF coincide notablemente con la imagen que proporciona el análisis numérico.

En la zona central de la sección de rotura se observa una marcada franja correspondiente a las trazas de superficie que indican una caída en la tensión equivalente de von Mises. Esta franja tiene una correspondencia directa con la fractografía de la zona en la que se puede apreciar esa misma franja con un ligero color más oscuro.

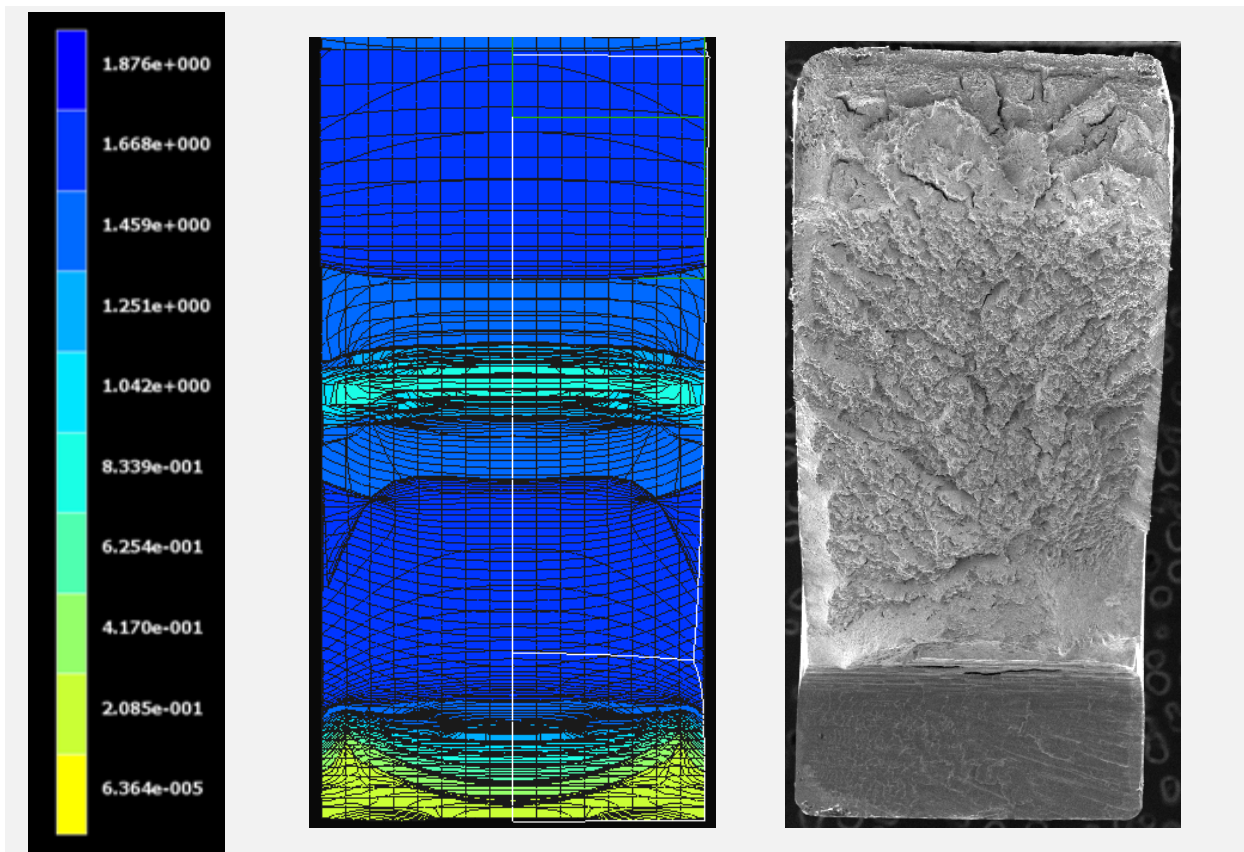


Fig. 4.78. Simulación por MEF (izquierda) y fractografía de la misma (derecha) B7-AA.



### 3.4. Secciones de fractura de las probetas prismáticas entalladas tipo PA

La Fig. 4.79 presenta un conjunto de imágenes de la sección de fractura, en el instante previo a la rotura del material, de las tres probetas con entalla tipo A analizadas en este epígrafe (probetas B0-A, B4-A y B7-A). En ella se muestra cómo los tres aceros presentan un mismo patrón de comportamiento en cuanto a los campos de tensión se refiere (tensión equivalente o efectiva de von Mises). Se puede ver cómo, a medida que aumenta el grado de trefilado del acero, se produce un incremento de la concavidad de las trazas de las superficies que definen el nivel de tensión en la zona de la entalla, centrando en todos los casos la ZPF en el punto medio de la entalla.

A medida que se analizan probetas con un grado de trefilado más elevado, el material presenta una distribución de tensiones ligeramente más compleja, acentuándose los gradientes tensionales, indicativos de la variación tensional que está teniendo lugar a lo largo de la sección de entalla y que puede ser, en parte, responsable del comportamiento anisótropo en fractura que muestra el material (tanto mayor cuanto mayor es el grado de trefilado original de la probeta).

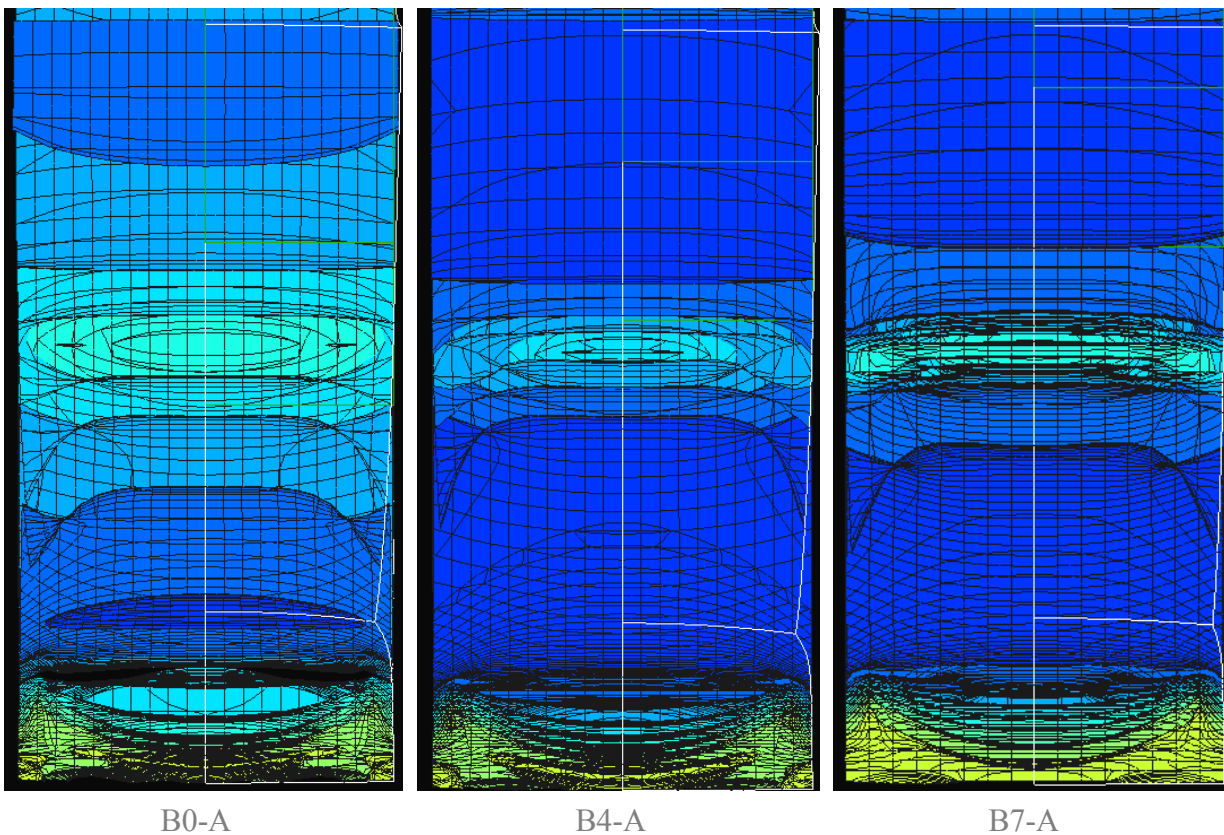


Fig. 4.79. Comparativa de las tres secciones netas de rotura. Probetas B0-A, B4-A y B7-A.

### 3.5. Análisis numérico de la muestra B0-C

En la Fig. 4.80 se presenta en detalle el mallado que se ha llevado a cabo para la realización del ensayo virtual mediante MEF. Como se puede observar es un mallado de elevada densidad con un análisis de 42192 nodos distribuidos en 36792 elementos tipo HEX de 8 nodos por elemento. Se hace necesario en el estudio de las probetas tipo PC incrementar el número de elementos, así como el número de nodos. Este incremento en el número de elementos se debe a que las probetas PC toleran un desplazamiento superior del puente, lo que induce elevadas deformaciones plásticas que se han de tener en cuenta para que el procedimiento numérico sea correcto y fiel reflejo del ensayo experimental.

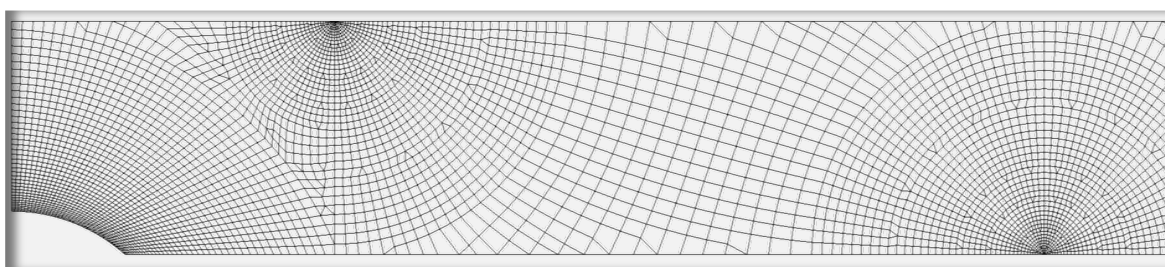


Fig. 4.80. Malla para el análisis de la probeta B0-C.

En la Tabla 4.10 se presentan los datos relativos al diseño de la malla respecto los valores medidos en el laboratorio; en ella se aprecia una concordancia fiel entre las dimensiones de la probeta virtual y las dimensiones reales medidas en el laboratorio.

Tabla 4.10. Dimensiones características (mm) de las entallas de la probeta B0-C.

PROBETA	B0-C	
Entalla	$C_{\text{Real}} = 1.670$	$C_{\text{MEF}} = 1.67$
	$2\xi_{\text{Real}} = 8.780$	$2\xi_{\text{MEF}} = 8.78$

Para el análisis de la probeta B0-C ha sido necesario generar un mallado muy denso, tanto en la zona de la entalla como en la zona de ataque del rodillo superior y del rodillo (apoyo) inferior. El proceso que utiliza programa de cálculo (Marc®) para establecer la fuerza realizada sobre el rodillo implica el análisis de los nodos que lleva emparejados. El problema se produce cuando existe un cambio de nodo debido al desplazamiento de la probeta; esto se manifiesta en la representación gráfica del análisis en forma de picos. En la gráfica de la Fig. 4.81 se muestra la curva  $F-u_p$  (experimental y numérica); en la curva MEF se pueden apreciar los pequeños picos debido al cambio de nodo de referencia. Este problema se acentúa en este tipo de entalla C y no en la de tipo A debido a que las probetas con entalla tipo C soportan

mayor deformación antes de rotura, lo que implica que el rodillo avanza más. Para este tipo de ensayo ha sido necesario disminuir la velocidad, tomando para ello 400 incrementos de cálculo. Los datos resultantes del proceso de cálculo han sido: ratio de singularidad: 0.12863, ratio de convergencia: 0.01688.

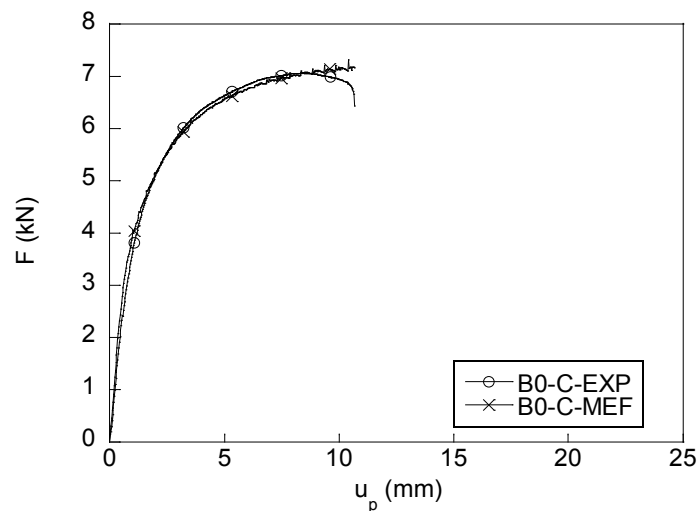


Fig. 4.81. Comparación de la curva carga–desplazamiento: experimental y numérica.

### 3.5.1. Deformación plástica equivalente

En la imagen de la Fig. 4.82 se presenta la deformación plástica equivalente en los primeros instantes de sollicitación del ensayo de flexión por cuatro puntos. Como se puede apreciar, la deformación plástica equivalente se localiza tanto en la parte superior de la probeta como en el fondo de entalla que posee. El valor de la deformación plástica equivalente es muy similar en ambas zonas, pero existe una marcada diferencia en cuanto a la extensión de la misma, que como se puede apreciar en la imagen es mayor en la zona superior de la probeta que en el fondo de su entalla. A medida que avanza el ensayo mecánico (su simulación mediante MEF), esta diferencia se ve mermada, y en el instante previo a la rotura del material se observa la distribución que se refleja en la imagen de la Fig. 4.83.

La distribución de la deformación plástica total equivalente presenta una forma bastante similar a la probeta B0-A en cuanto a la concentración de las deformaciones plásticas totales, en la zona central de la entalla, se refiere. Sin embargo, a diferencia de la probeta B0-A, las deformaciones se conforman en modo similar a una lámina curvada ligeramente con una aparente cuasi-simetría respecto al plano neutro; donde se manifiesta la menor incidencia del efecto de borde en la probeta B0-C que el que se observó en la probeta B0-A.

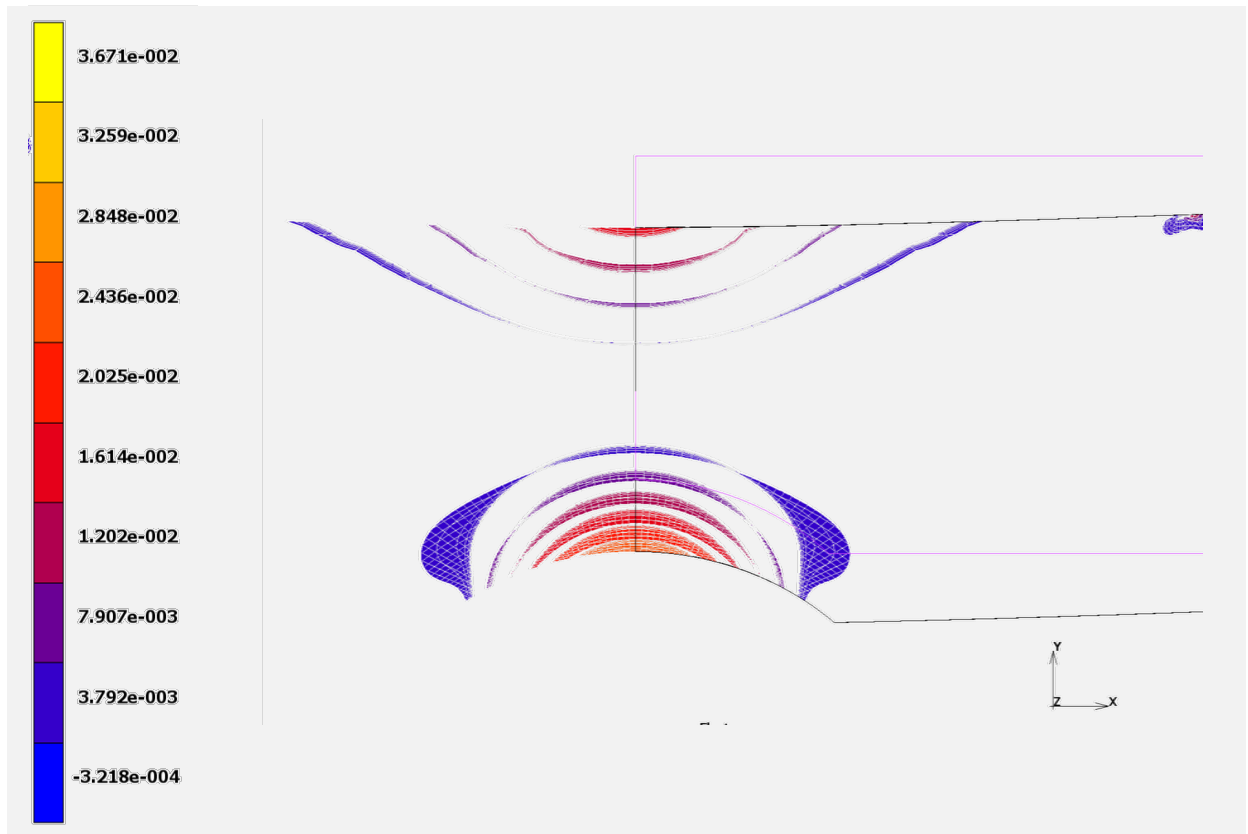


Fig. 4.82. Deformación plástica en el INC 50 de cálculo en la probeta B0-C.

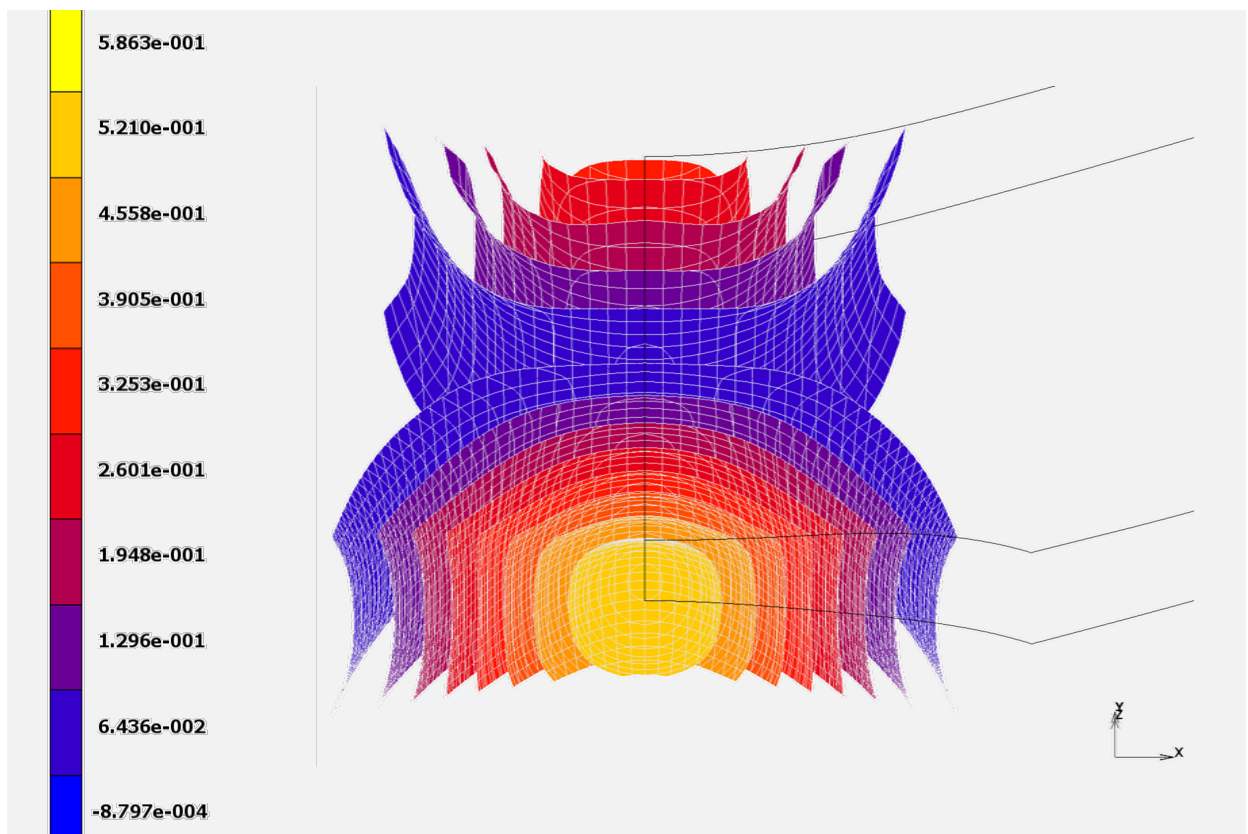


Fig. 4.83. Deformación plástica equivalente, instante previo a la rotura: probeta B0-C.

### 3.5.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

La tensión equivalente de von Mises viene marcada por una cuasi-simetría, como se ha indicado anteriormente, respecto al plano neutro; por lo tanto se establecen dos zonas de elevado estado tensional: la primera se aprecia en el fondo de entalla y la segunda en la parte superior de la probeta, pasando entre ambas por la zona central de la probeta en la que se observa una caída notable en el valor de la tensión.

La distribución en los primeros instantes de sollicitación se muestra en la gráfica de la Fig. 4.84; en ella se puede apreciar cómo las bandas de tensión constante se van curvando a medida que el punto de vista se aproxima a la sección neta (fondo de entalla) de la probeta y adoptan la máxima curvatura en el fondo de entalla. A medida que avanza el ensayo de flexión se observa que los campos tensionales se van concentrando en torno a la sección de la entalla. La marcada deformación que está sufriendo la probeta en su parte superior, a lo largo del ensayo, hace que las tensiones en esta zona se eleven rápidamente y que gráficamente se presenten como un núcleo de gran curvatura en la zona superior de la sección, como queda patente en la Fig. 4.85, en la que se representa la distribución de la tensión equivalente en el instante previo a producirse la fractura final por separación total de superficies.

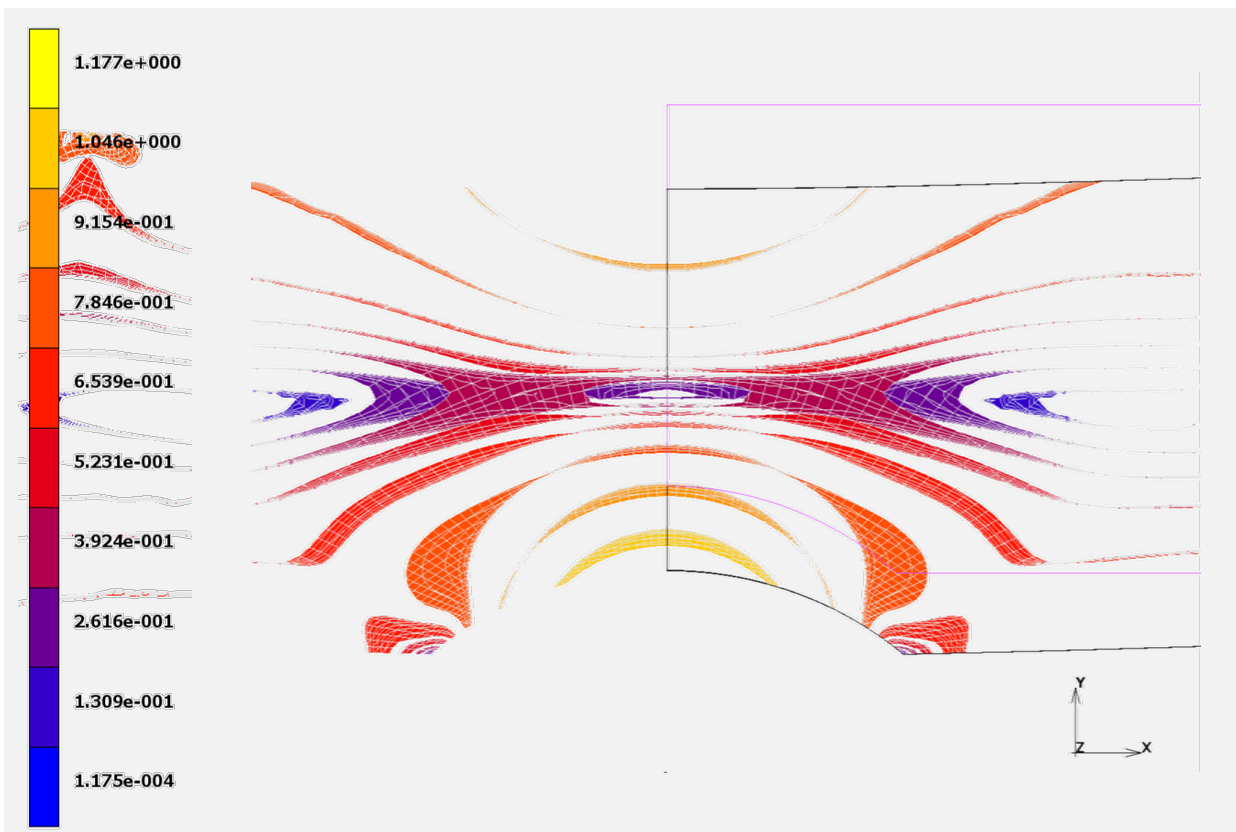


Fig. 4.84. Tensión equivalente de von Mises, primeros instantes de ensayo: probeta B0-C.

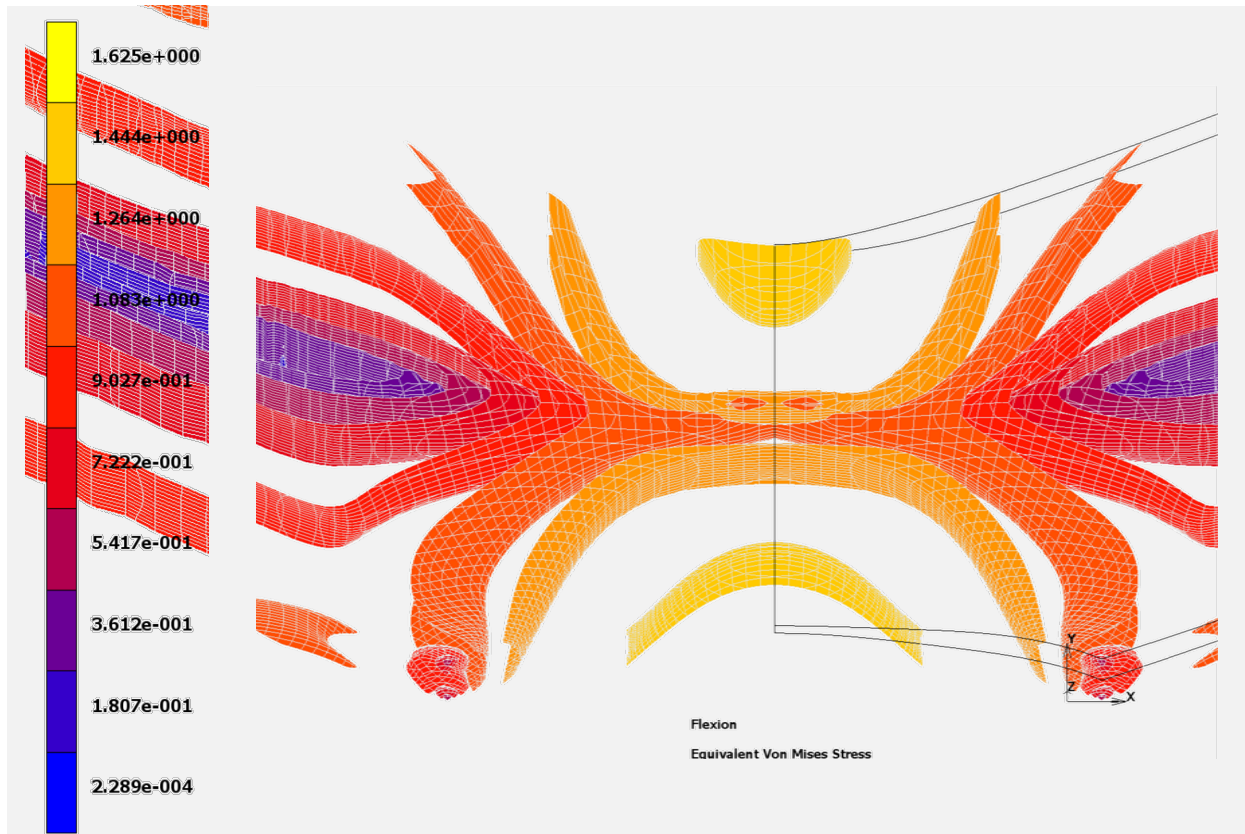


Fig. 4.85. Tensión equivalente de von Mises, instante previo a la fractura; probeta B0-C.

### 3.5.3. Análisis de la sección de rotura

En la Fig. 4.86 se presentan las imágenes correspondientes a la sección de rotura de la probeta establecida por el análisis numérico y la fractografía real de la zona. Con el fin de establecer la concordancia existente entre ambas se hace necesario realizar un giro espacial de la probeta, para compensar el nivel de deformación que experimentan las probetas PC reales. Para realizar la correlación se ha elegido la sección de rotura de la probeta real que mejor disposición presentase, con el fin de evitar en lo posible el trabajo mental que supone el giro espacial. Para evaluar correctamente la presente probeta B0-C, por tanto, es necesario realizar un giro en la sección de modo que la probeta real gire hacia el observador. En este estado se puede apreciar como los valores máximos de tensión equivalente de von Mises se presentan en la mitad inferior de la probeta (junto a la entalla), donde se observa claramente en la fractografía la ZPF; no obstante, el análisis numérico indica otra zona de elevada concentración de tensión equivalente de von Mises, la cual se dispone en el extremo superior de la probeta y que, como se concluyó en el análisis fractográfico, se corresponde con una zona en la que concurre una elevada concentración de huecos que denotan en la fractografía una zona característica más clara.

La existencia de una fisura longitudinal, extendida a lo largo del ancho medio de la probeta, concuerda claramente con la zona central de la misma, en la que el análisis numérico establece una caída substancial en el nivel tensional, y que en la imagen aparece reseñada de un marcado color naranja. Se trata de una zona en la que existe una gran variación en el valor de la tensión, como denotan la cantidad de superficies que se reflejan en ella.

Como ya se ha venido observando en los análisis anteriores de la sección de rotura, parece que se puede establecer una previsión de cómo van a distribuirse los arcos radiales que se dibujan en la ZI, como consecuencia del proceso de fractura; y es que existe una relación directa entre los gradientes de las trazas de superficie de tensión constante con el plano de entalla y la dirección de los arcos radiales, de modo que los arcos radiales avanzan por aquellas zonas de material en las que se observa la mayor variación tensional y que por tanto, en plano, manifiestan una clara apariencia perpendicular a las trazas de superficie (de tensión equivalente de von Mises) con el plano de entalla.

La variación entre los valores máximos y mínimos de tensión equivalente de von Mises se acusa de un modo notable a lo largo de la sección; pasando de 1.6 GPa en el fondo de entalla a 1 GPa en la sección central de la probeta, tras la cual la tensión aumenta hasta alcanzar en la sección superior valores muy próximos a los del fondo de entalla.

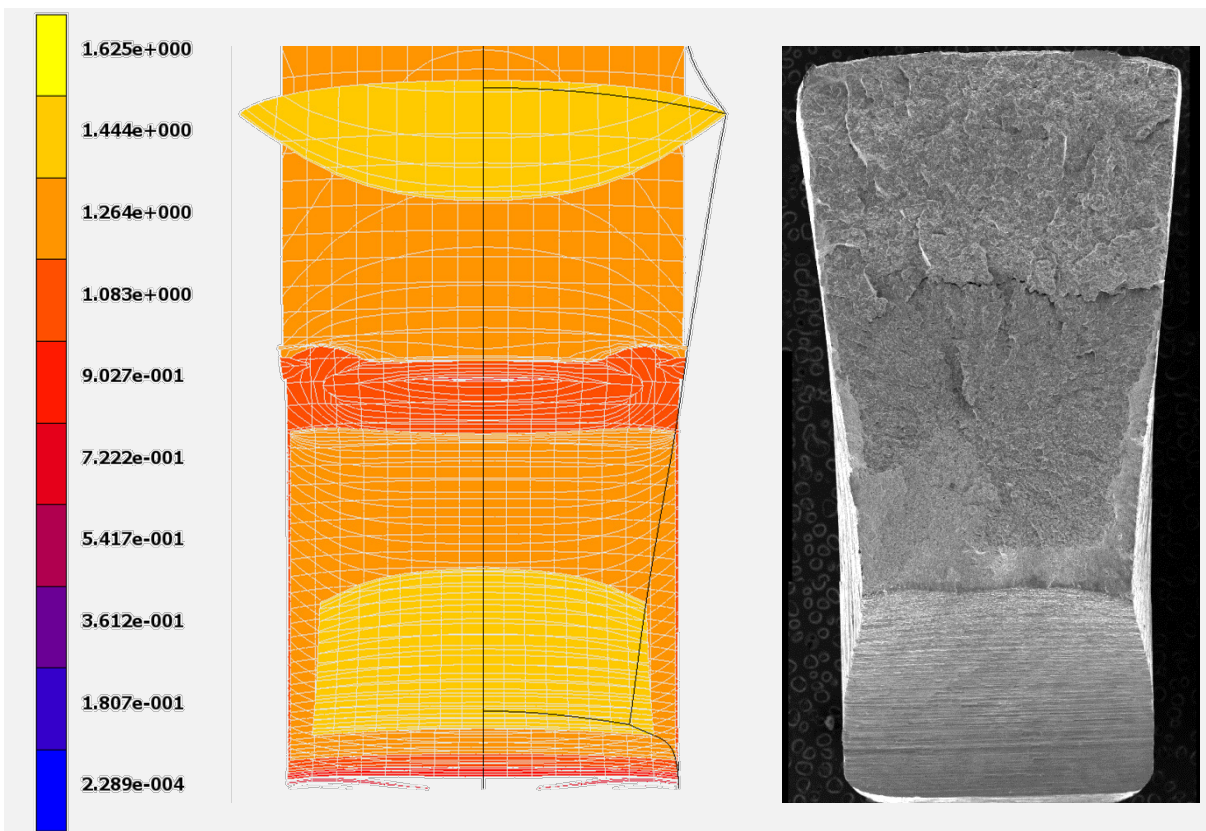


Fig. 4.86. Tensión equivalente de von Mises en la sección de rotura de la probeta B0-C-MEF.

### 3.6. Análisis numérico de la muestra B4-C

La malla utilizada para el análisis de la probeta B4-C es de elevada densidad, tanto en la zona de entalla como en las zonas correspondientes al ataque de los rodillos, con un total de 47943 nodos distribuidos en 42232 elementos de tipo HEX de 8 nodos por elemento, siendo ésta, la malla de mayor densidad analizada en la presente Tesis (Fig. 4.87). Las dimensiones de las entallas reales y los obtenidos para el proceso de cálculo se presentan en la Tabla 4.11. Los datos numéricos (MEF) y los experimentales (EXP) obtenidos se presentan en la Fig. 4.88. A pesar de la gran cantidad de nodos introducidos en la zona de ataque de rodillo, se puede observar la presencia de pequeños picos que se corresponden con el cambio de nodo. En cuanto a los datos resultantes del proceso de cálculo MEF se ha obtenido: ratio de singularidad: 0.12972, ratio de convergencia: 0.006279.

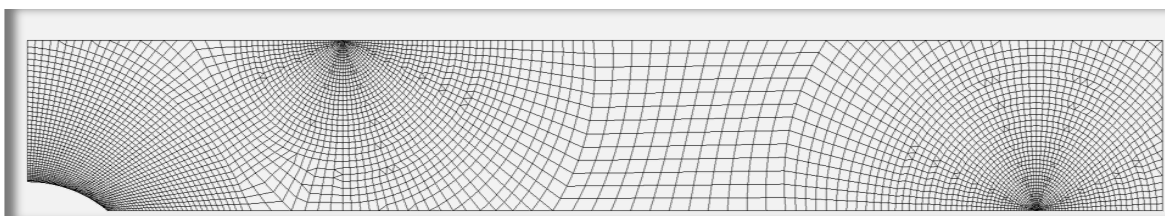


Fig. 4.87. Malla utilizada para el análisis de la probeta B4-C.

Tabla 4.11. Dimensiones características (mm) de la entalla de la probeta B4-C.

PROBETA	B4-C	
Entalla	$C_{Real} = 1.148$ $2\xi_{Real} = 6.357$	$C_{MEF} = 1.148$ $2\xi_{MEF} = 6.357$

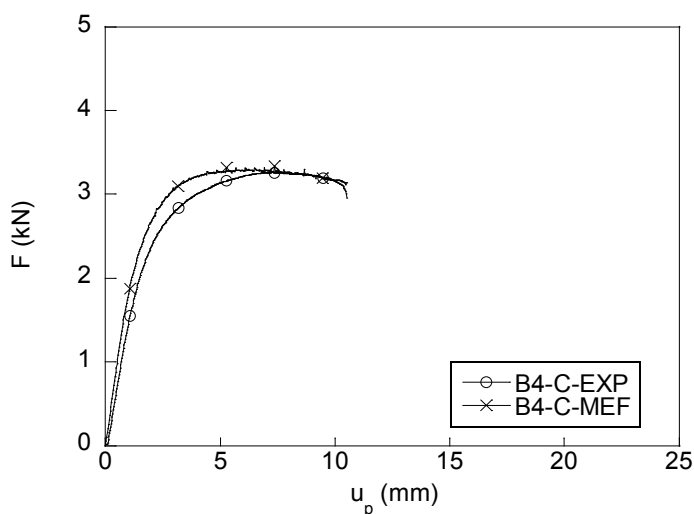


Fig. 4.88. Curva F-u experimental (EXP) vs simulación numérica (MEF); probeta B4-C.



### 3.6.1. Deformación plástica equivalente

La deformación plástica total equivalente de la probeta B4-C sigue el mismo patrón que la vista en la probeta B0-C. En el instante previo a la rotura de la probeta, se localizan en el material que circunscribe el fondo de entalla así como en el material que conforma el extremo superior de la probeta. La distribución presenta una forma geométrica que recuerda a *barquillos*, que enmarcan tanto el material en torno a la entalla como el material que se presenta en el borde superior. A medida que los campos se acercan a los puntos periféricos de la probeta, se curvan ligeramente, profiriendo el efecto de borde, como consecuencia del cambio que se establece en las condiciones de contorno (Fig. 4.89). Es manifiesta la diferencia, en la curvatura por el efecto de borde, existente entre los campos deformacionales que rodean la sección superior de la probeta y los campos que conforman la sección inferior.

La zona central de la probeta queda, por efecto de la distribución, ligeramente preservada puesto que en ella se presentan los valores más bajos, siendo de  $-0.00107$ , lo que resulta insignificante. Los valores máximos de la deformación plástica, son superiores a los de la probeta B0-C, pasando de 0.58 para ésta última a valores de 0.75 en la probeta B4-C. En principio, y en espera de lo que ocurra en la probeta B7-C, esta característica podría indicar que la deformación plástica equivalente aumenta progresivamente con el grado de trefilado.

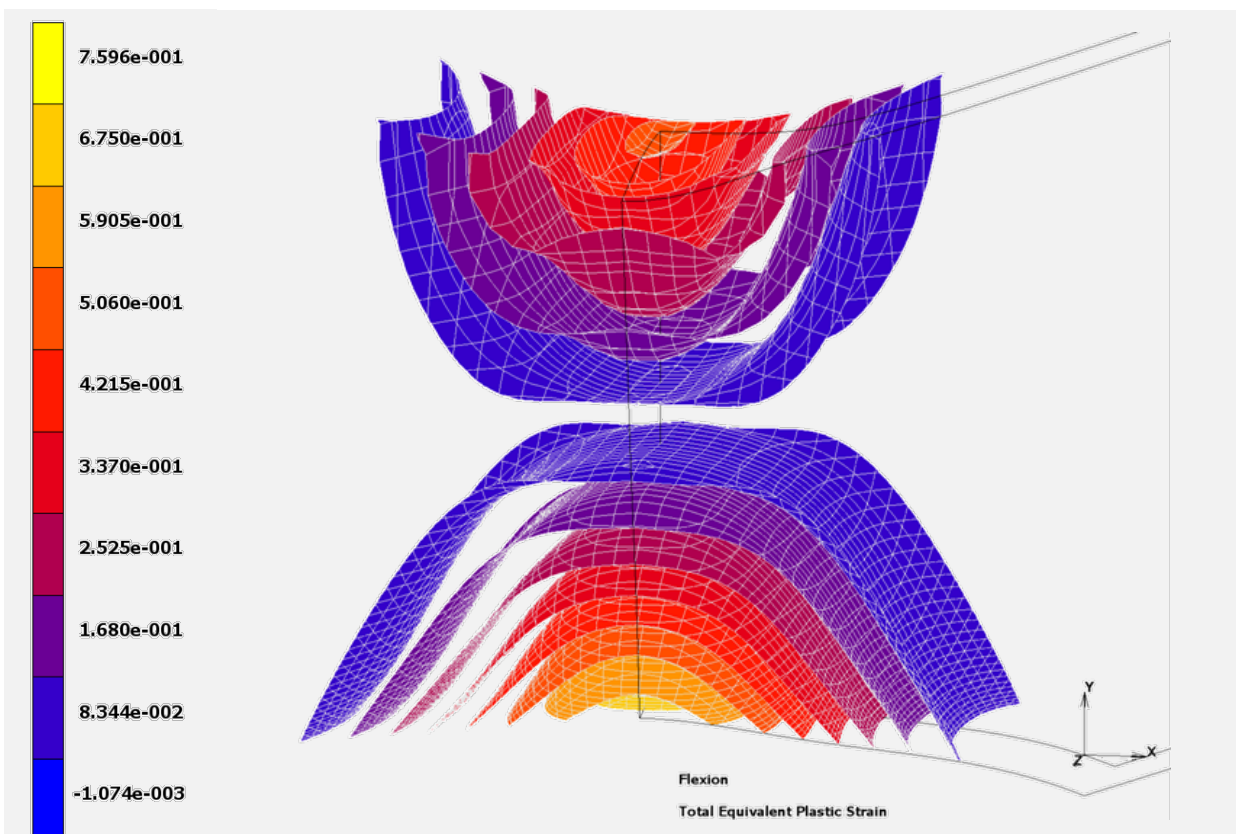


Fig. 4.89. Deformación plástica total equivalente en el instante de rotura, probeta B4-C.

### 3.6.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

En la Fig. 4.90 se presenta la tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura de la probeta B4-C. Como se puede apreciar en la imagen, se trata de una distribución en la que la tensión máxima se extiende a lo largo de toda la sección de entalla, existiendo poca diferencia entre los valores de la mitad superior y los valores que se presentan en la mitad inferior (1.5 GPa). Únicamente es en la zona central donde se puede observar una ligera caída de la tensión equivalente de von Mises respecto las zonas circundantes. Como se puede ver las tensiones máximas tienen una amplia distribución a lo largo de la probeta, ya que éstas se presentan prácticamente a lo largo de toda la entalla.

A medida que el punto de vista se aleja de la entalla se observa una caída substancial de la tensión equivalente de von Mises, siendo esta caída más acusada en el plano longitudinal central de la probeta, que como se puede ver presenta una tensión en el instante previo a la rotura del material de 0.17 GPa, representando este valor tan sólo un 11% del valor que se presenta en la sección de entalla.

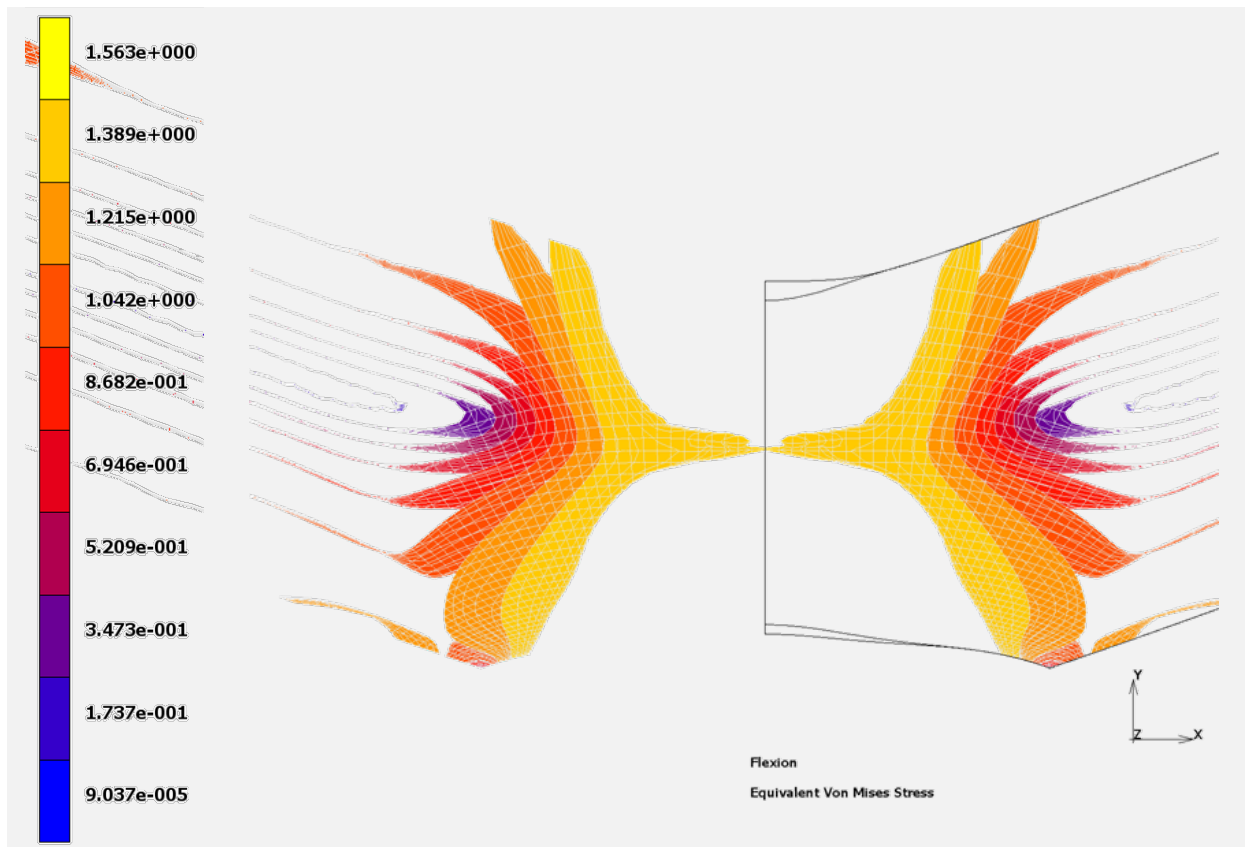


Fig. 4.90. Tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura del material, probeta B4-C.

### 3.6.3. Análisis de la sección de rotura

El estudio de la sección de entalla indica que la práctica totalidad de la misma (sección neta transversal) presenta valores máximos de la tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura del material. La probeta presenta en dicho instante una gran deformación con respecto a la forma original de la misma, con un aumento longitudinal del extremo superior y una contracción en el fondo de entalla que está estrechamente relacionado con los desplazamientos que están teniendo lugar en la zona. Los desplazamientos no se relegan a la sección de entalla, sino que todas las capas de material circundante presentan un estado elevado de deformación, lo que induce una forma física característica tanto de la sección de rotura como de las zonas adyacentes a ella.

Como ya sucediese en casos anteriores, para poder valorar el estado tensional de la sección de fractura, se hace necesario realizar una corrección de color a la imagen MEF obtenida que se presenta en la Fig. 4.91. En esta imagen se puede apreciar que la mayor concentración de trazas se centra en dos focos fundamentalmente, en las zonas adyacentes a la entalla y en la zona central; no obstante, en vista de la ligera caída de tensiones que se observa en la zona central existe una probabilidad mayor de inicio de fisura en la zona adyacente a la entalla.

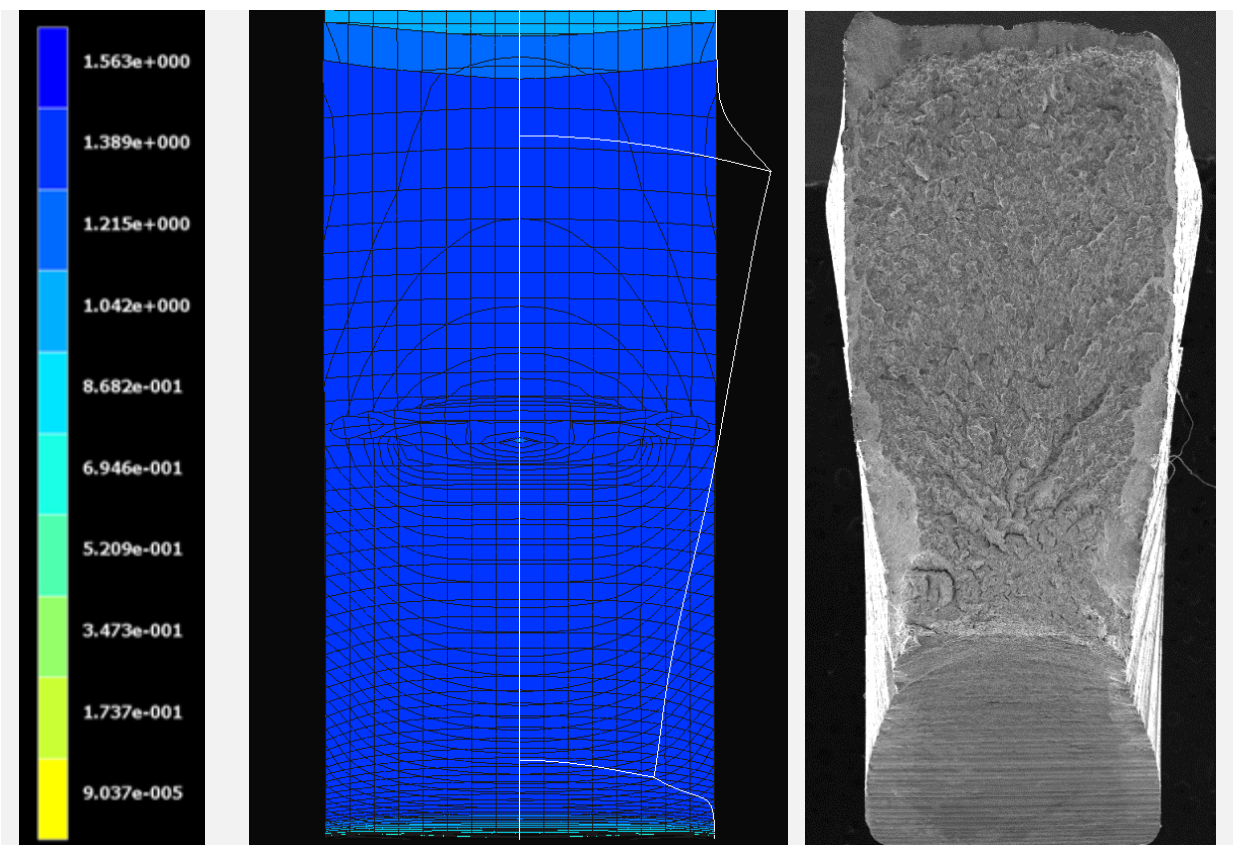


Fig. 4.91. Sección de rotura de la probeta B4-C (Corrección de color).

La zona de entalla no presenta, como en casos anteriores, una zona definida, sino que se observa una alta concentración de trazas con diferentes direcciones inmersas unas dentro de otras, lo que en principio indicaría la complejidad en situar un punto concreto de inicio de la fractura; si bien se observa, que el punto se encontraría en el cuarto inferior de la sección de entalla; no obstante, esta característica sería indicativa también de que toda esta zona presentaría una estructura característica de ZPF.

Al analizar la zona central de la probeta, marcada por el descenso en el estado tensional (tensión equivalente de von Mises) se observa una variación en el análisis fractográfico, observándose cómo, a partir de la misma, aparecen arcos radiales (clivajes) que se corresponden directamente con aquellas zonas en las que se presenta un descenso en el nivel de trazas de la sección de rotura. Las direcciones de estas fisuras radiales son perpendiculares a las trazas de iso-superficies de tensión que se presentan en la sección de rotura.

### 3.7. Análisis numérico de la muestra B7-C

En el análisis numérico de la muestra B7-C se ha empleado una malla de 42696 nodos distribuidos en 37368 elementos de tipo HEX de 8 nodos por elemento (Fig. 4.92). Los datos relativos al diseño de la entalla se reflejan en la Tabla 4.12 (la malla MEF realizada es fiel reflejo de la geometría *real* de la probeta).

En la Fig. 4.93 se presentan la gráfica resultante de la comparación entre el resultado del análisis numérico mediante el método de elementos finitos y el resultado de proceso de ensayo de flexión experimental. En cuanto a los datos resultantes del proceso de cálculo se ha obtenido un ratio de singularidad de 0.1252 y un ratio de convergencia de 0.0002345.

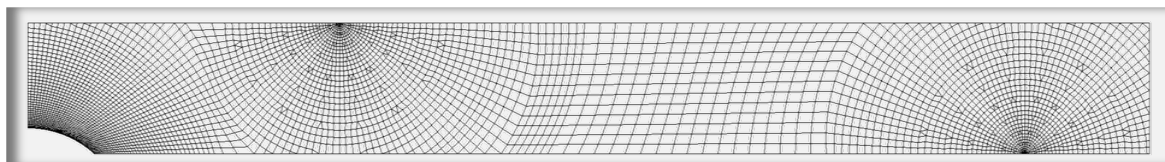


Fig. 4.92. Malla realizada para el análisis de la probeta B7-C.

Tabla 4.12. Dimensiones características (mm) de la entalla de la probeta B7-C.

PROBETA	B7-C	
Entalla	$C_{Real} = 1.035$	$C_{MEF} = 1.035$
	$2\xi_{Real} = 5.327$	$2\xi_{MEF} = 5.327$

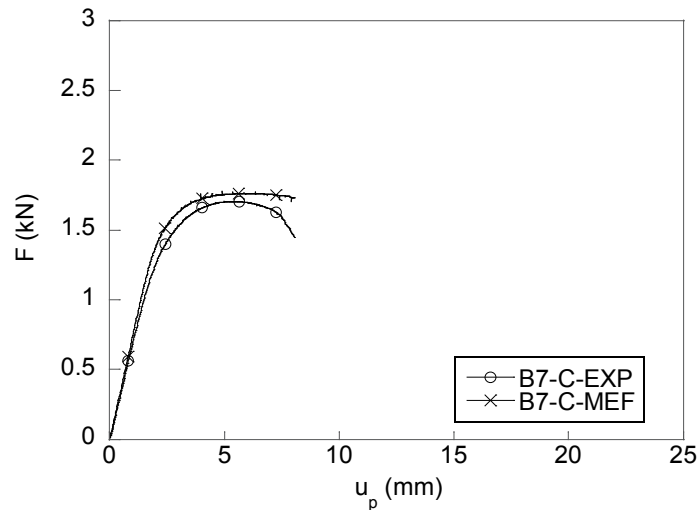


Fig. 4.93. Curva  $F-u_p$  experimental (EXP) vs simulación numérica (MEF); ensayo bajo sollicitación de flexión por cuatro puntos; probeta B7-C.

### 3.7.1. Deformación plástica equivalente

Los campos de deformación plástica total equivalente presentan en la probeta B7-C un comportamiento con características similares al que se observó anteriormente en las probetas B0-C y B4-C (idéntica entalla, menor grado de trefilado). La deformación plástica se concentra fundamentalmente en dos zonas situadas en la sección de entalla. Sin embargo, respecto a anteriores ensayos, se observa una ligera pérdida de la asimetría existente entre la sección superior de la probeta y la sección inferior; de modo que, en ambas zonas se presenta una distribución cuasi-simétrica, donde los valores máximos de deformación plástica equivalente se localizan tanto en el borde superior de la probeta, como en el material que define el perfil del fondo de entalla.

La iso-superficie correspondiente al máximo valor de la deformación plástica equivalente se sitúa en la zona central del perfil del fondo de entalla. Sobre ella se van solapando las diferentes iso-superficies de menor nivel de deformación, las cuales van adquiriendo una forma geométrica de menor curvatura, de modo que se va produciendo una ampliación progresiva de la zona (Fig. 4.94).

La cuantía máxima que llega a mostrar la la deformación plástica equivalente es de un total de 0.49; valor éste bastante inferior a los 0.58 y 0.75 encontrados para las probetas B0-A y B4-A respectivamente. Este valor de 0.49 rebate la tendencia de crecimiento de la deformación plástica con el grado de trefilado del acero de base, que se presumía a la vista de los dos ensayos anteriores.

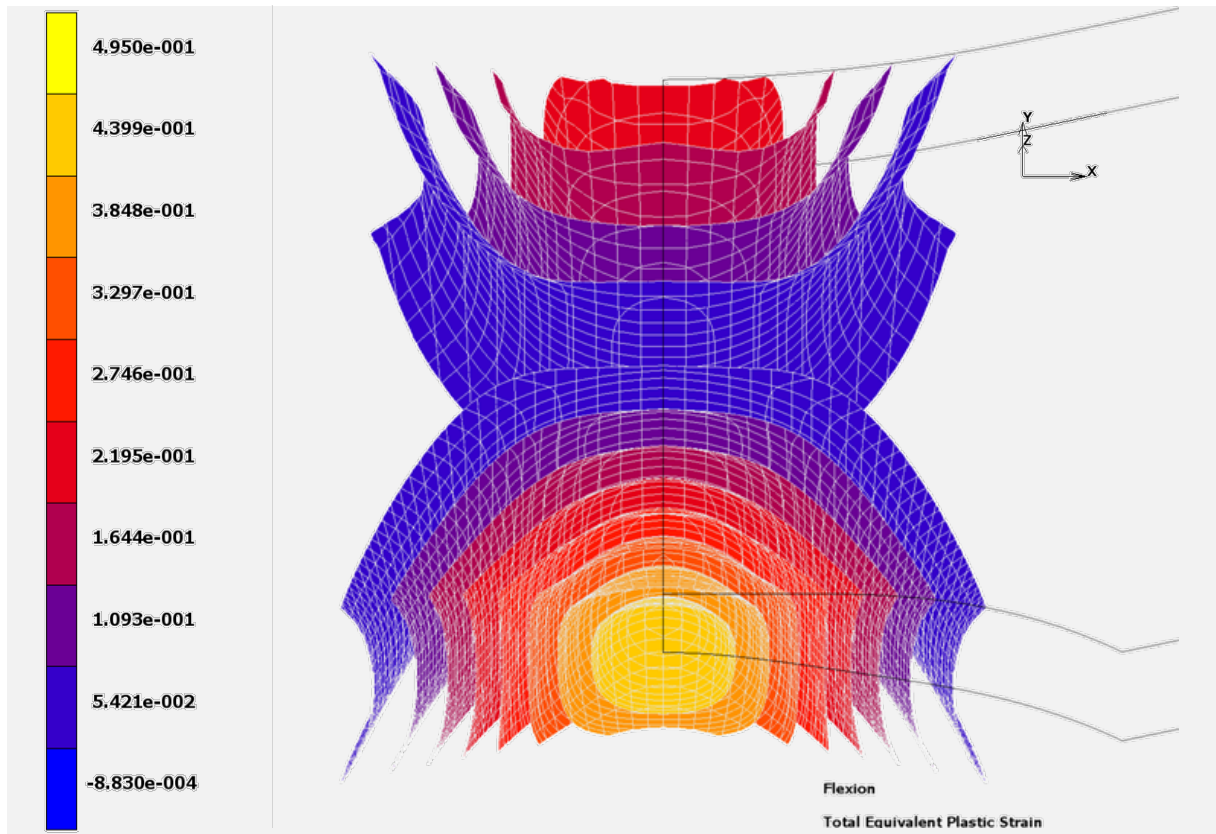


Fig. 4.94. Campo de deformación plástica equivalente correspondiente al instante previo a la rotura de la probeta B7-C.

### 3.7.2. Tensión equivalente o efectiva de von Mises

La tensión equivalente de von Mises es, para la probeta B7-C, máxima prácticamente en todos los puntos de la sección de rotura de la probeta, como se puede observar en la Fig. 4.95; manifestando una aparente cuasi-simetría entre la región superior de la sección y la región inferior correspondiente a la entalla. Únicamente se muestra, en la zona central de la sección de rotura, una ligera caída de la tensión equivalente de von Mises con respecto al material circundante. Como ya sucediese en las probetas previas (B0-C y B4-C), las tensiones equivalente de von Mises máximas se distribuyen en una amplia región del material que circunda la entalla.

A medida que el análisis se desvía de la zona de la entalla, la tensión equivalente o efectiva de von Mises, desciende rápidamente, de sobremanera en el material que se dispone a lo largo de la zona central del eje longitudinal de la probeta. En los puntos correspondientes a esta zona, se observa una caída del 90% respecto la tensión que se presenta en la sección de la entalla ( $\bar{\sigma} = 1.9 \text{ GPa}$ ). Como no podía ser de otro modo, también se observan iso-superficies de escaso valor tensional en aquel material que conforma los cantos exteriores de la entalla.

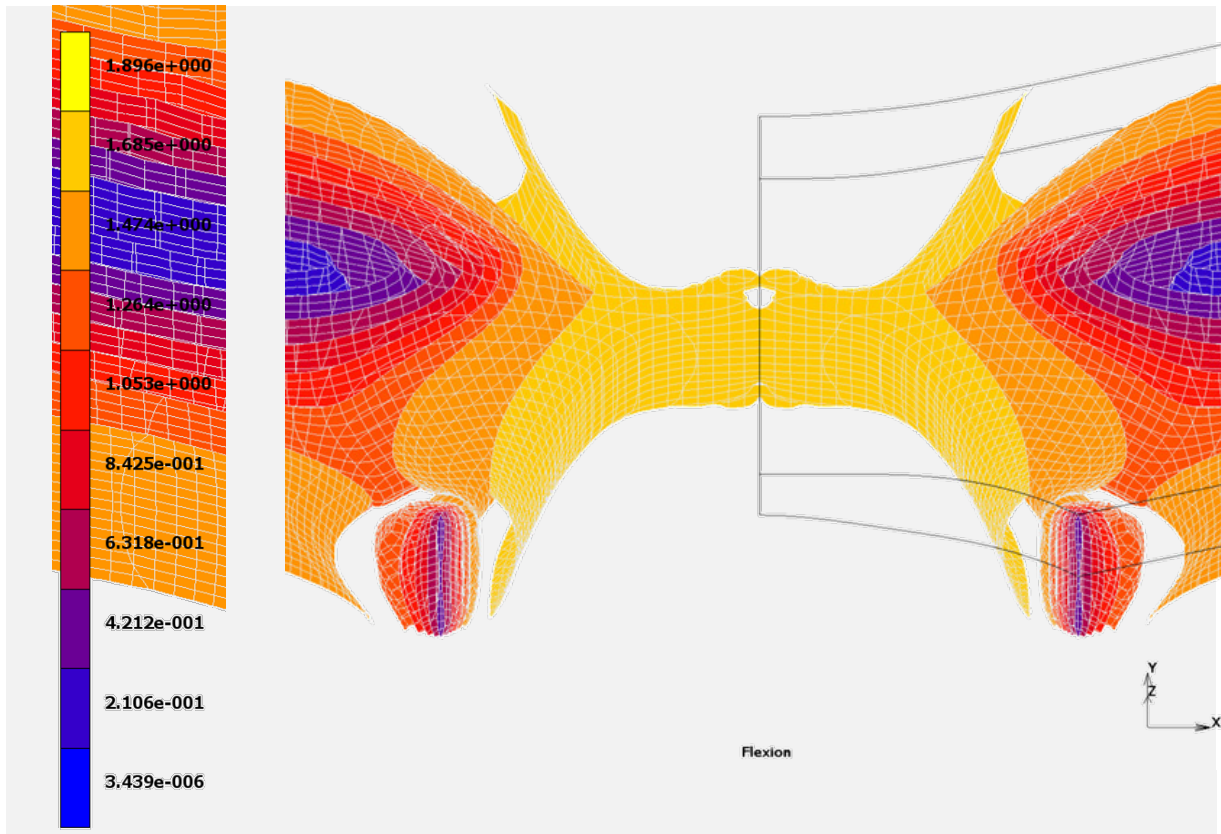


Fig. 4.95. Distribución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises en el instante previo a la rotura de la probeta B7-C.

### 3.7.3. Análisis de la sección de rotura

Como ya sucediese en el caso de la probeta B4-C, en la probeta B7-C prácticamente la totalidad de la misma se encuentra solicitada a máximos valores de tensión equivalente de von Mises (Fig. 4.96). La existencia de dos regiones, una en el tercio inferior de la probeta (junto a la entalla) y otra en la zona central, de elevadas concentraciones de trazas son indicativas de la variación en el régimen de tensiones que están sufriendo ambas zonas. La sección central manifiesta un descenso brusco del valor de la tensión presentando un valor de la tensión equivalente de von Mises de  $\bar{\sigma} = 1.5 \text{ GPa}$ , lo que supone una caída superior al 20% respecto los valores presentes en el resto de la sección.

El elevado estado tensional, del tercio inferior de la probeta (Figs. 4.96), unido a la alta concentración de trazas de la zona indica que ésta presenta una disposición favorable para dar comienzo al proceso de fractura. Esta descripción coincide notablemente con la fractografía experimental donde se aprecia como el tercio inferior de la probeta presenta una fractografía claramente indicadora de la ZPF. En la zona central se observa un cambio de conducta en el proceso de rotura, siendo esta zona el punto de partida de lo que en la fractografía se observa

como fisuras radiales, de la zona de clivaje, que se distribuyen perpendiculares a las trazas de las iso-superficies definidas en la sección de rotura de la probeta.

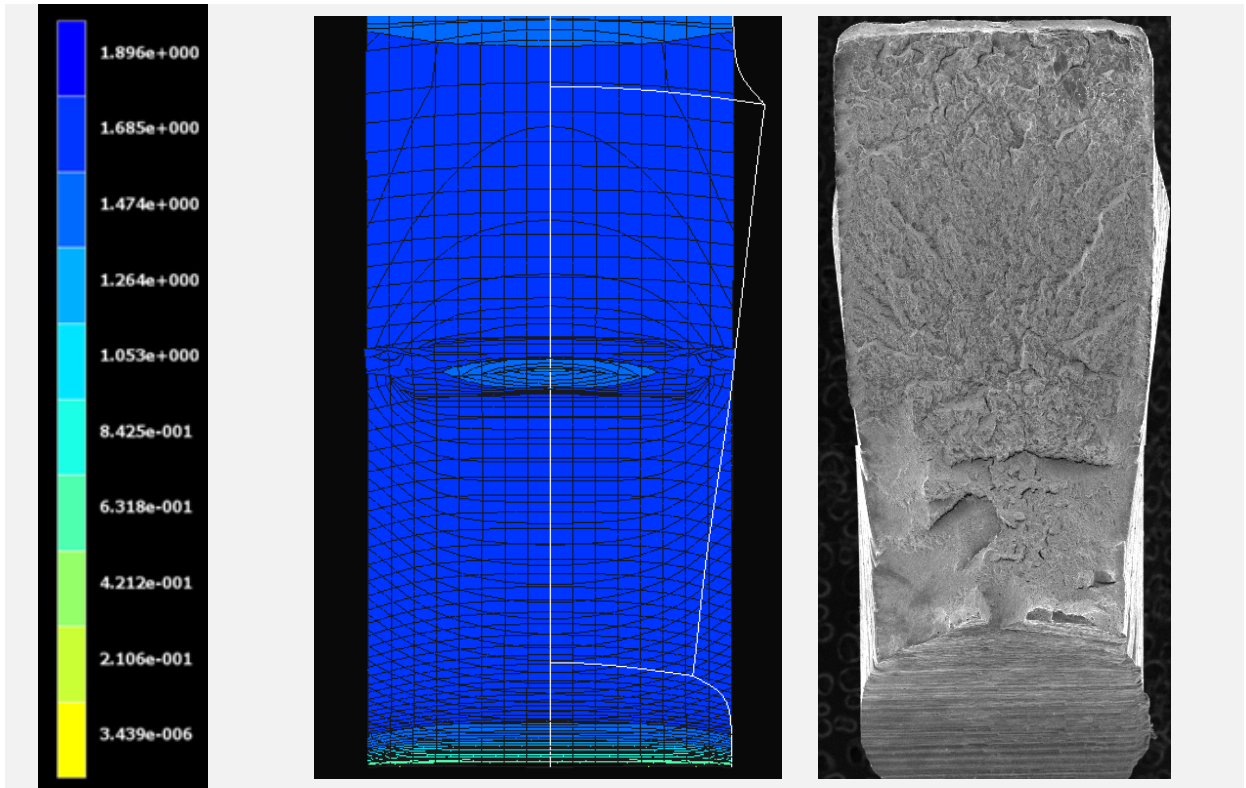


Fig. 4.96. Tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura del material.

### 3.8. Secciones de fractura de las probetas prismáticas entalladas tipo PC

En el análisis de la sección de rotura de las probetas B0-C, B4-C y B7-C respecto la tensión equivalente de von Mises, Fig. 4.97, se observan ligeras diferencias en función del tipo de acero que se esté analizando. Aunque en esencia el comportamiento de las probetas es el mismo, se puede apreciar que tanto el nivel de tensiones ( $\bar{\sigma}$ ) que presenta la sección neta de la probeta, como la distribución de las mismas es ligeramente diferente de unas probetas a otras; no obstante, en todas ellas se observa que la zona que presenta mayor nivel tensional se encuentra en la sección de la probeta situada adyacente al fondo de entalla. La definición de la forma geométrica de la ZPF es muy clara para la probeta B0-C mientras que resulta más complicada de interpretar para las probetas B4-C y B7-C.

Al contrario de lo que sucedió con las probetas B0-A, B4-A y B7-A, la probeta B0-C presenta una distribución de mayor número de superficies equi-tensionales que los observados en las probetas B4-C y B7-C, esto implica que en esta probeta se están produciendo las mayores variaciones en los niveles de tensión ( $\bar{\sigma}$ ) a lo largo de la sección. Esta característica también



se manifiesta en la zona central de la probeta (en la que se encuentran los valores más bajos de la tensión) donde también se observa una elevada concentración de trazas. La sección superior de la probeta B0-C aunque también presenta mayor número de trazas de superficie presenta una menor concavidad de las mismas, lo que indica que su comportamiento es más homogéneo a lo largo del flanco de la probeta.

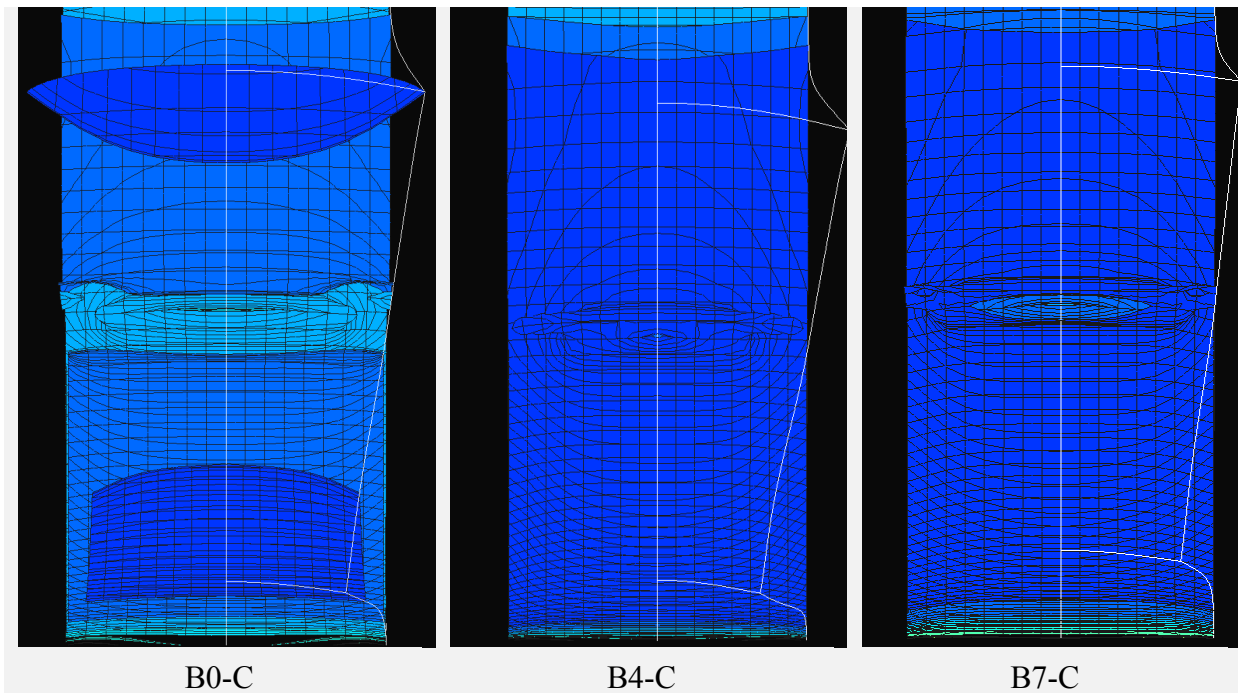


Fig. 4.97. Comparativa de las tres secciones netas.

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

---

### 1. CURVAS F-U

En el apartado 2.7 (Probetas prismáticas entalladas PAA vs. PCC), y en el apartado 3.8 (Probetas prismáticas entalladas PA vs. PC) del capítulo II de la presente Tesis se presentaron las representaciones gráficas correspondientes a las probetas tipo de cada terna considerada, esto es, las curvas F-u correspondientes a la probeta intermedia de cada uno de los aceros analizados (B0, B4, B7). Dichos resultados se discuten a continuación en las dos gráficas de las Figs. 5.1 y 5.2.

#### 1.1. Probetas prismáticas entalladas

En las Figs. 5.1 y 5.2, se hace un recorrido por las gráficas que describen el comportamiento general de los diferentes pasos de trefilado que dan origen a las probetas ensayadas bajo solicitaciones de tracción (probetas PAA y PCC) y de flexión (probetas PA y PC) hasta fractura. Visualizando ambas gráficas simultáneamente se observa una conducta muy semejante, tanto en cuanto al comportamiento de ambos tipos de entalla frente a cada solicitación mecánica externa individualmente, como al comportamiento que presentan ante la misma solicitación los diferentes tipos de acero analizados.

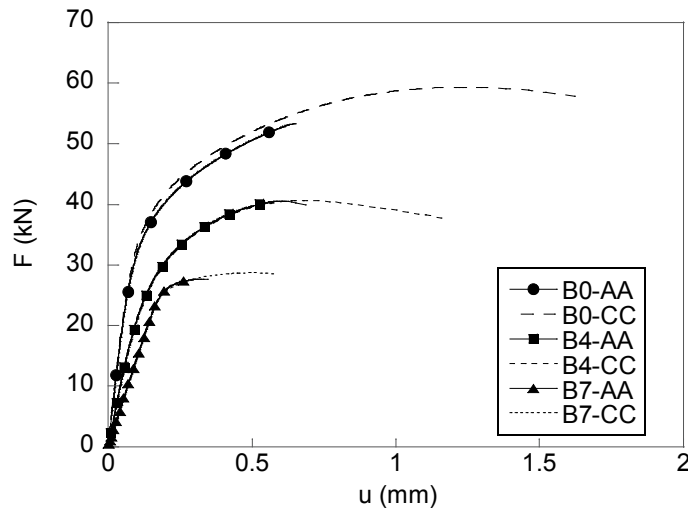


Fig. 5.1. Carga vs desplazamiento: probetas PAA y PCC.

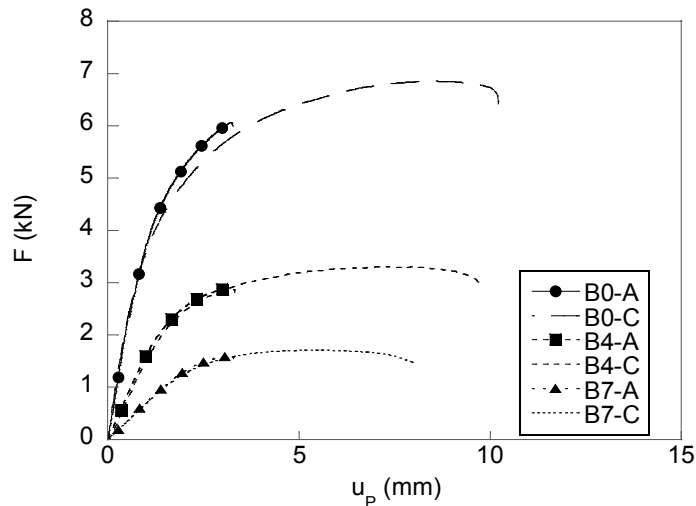


Fig. 5.2. Carga vs desplazamiento (puente) de las probetas PA y PC.

La característica más reseñable cuando se comparan las entallas A y C, independientemente del tipo de sollicitación mecánica externa empleada, es la pérdida de capacidad de deformación de la probeta con entalla tipo A respecto a aquellas probetas que presentan entalla tipo C. Así mismo, con independencia de la sollicitación actuante, ambos tipos de entalla inducen, en las probetas analizadas, una capacidad de carga resistente semejante. La diferencia más acusada a este proceder se presenta en aquellas probetas mecanizadas a partir del acero B0, donde las probetas con entalla tipo A soportan un régimen de carga menor que las probetas con entalla tipo C.

El análisis detallado, aunque generalizado a todas las probetas, sobre la evolución de los distintos tipos de sollicitaciones, indica que las probetas ensayadas frente a la sollicitación de flexión toleran tan sólo el 11% de la carga sobrellevada frente al ensayo de tracción; sin

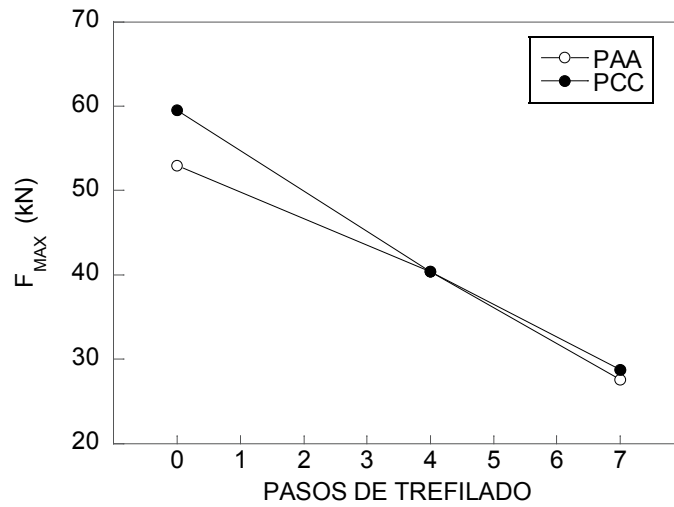
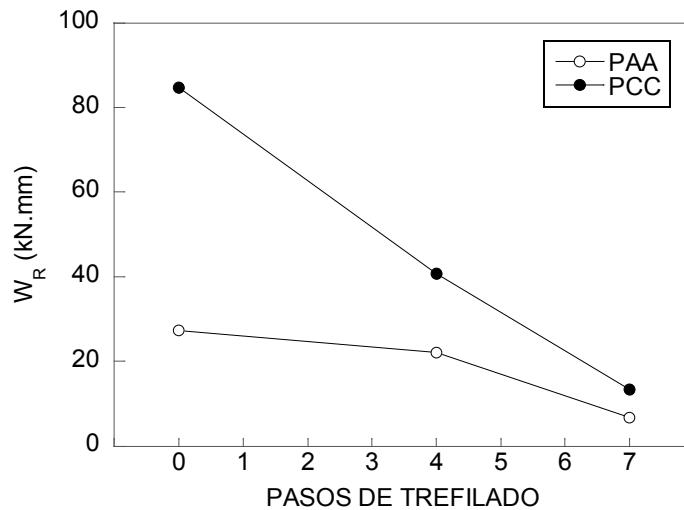
embargo, el análisis de los desplazamientos máximos indica que frente a la sollicitación a tracción el material es capaz únicamente de tolerar el 16% del desplazamiento que se soporta durante el ensayo de sollicitación de flexión. Esto hace que sea innato preguntarse cuál es el comportamiento del trabajo necesario para inducir la fractura en este tipo de materiales con sus circunstancias de sollicitación particulares.

## 1.2. Evolución de los parámetros $F_{MAX}$ y $W_R$ con el grado de trefilado

En este apartado de la Tesis se hace una recapitulación de los datos obtenidos en los ensayos de fractura bajo sollicitaciones de tracción y flexión. Para ello se va a hacer uso de cuatro gráficas en las que se representan la evolución de los parámetros de fuerza máxima soportada ( $F_{MAX}$ ) y del trabajo necesario para inducir el proceso de rotura ( $W_R$ ) con relación al grado de trefilado base para cada una de las dos entallas estudiadas en cada uno de los ensayos (Figs. 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6).

A los ensayos bajo sollicitación de tracción se dedican dos gráficas que aparecen en las Figs. 5.3 y 5.4. En la primera gráfica (Fig. 5.3) se presenta la variación de la carga máxima soportada ( $F_{MAX}$ ) por las probetas PAA y PCC cuando son ensayadas frente a la sollicitación de tracción hasta alcanzar la fractura final. Se observa que en las probetas PCC existe una relación de variación prácticamente lineal entre la carga máxima soportada y el grado de trefilado, de modo que a medida que aumenta el grado de trefilado se aprecia un descenso en la capacidad de carga máxima. No obstante, la capacidad de carga se mantiene muy semejante para las probetas obtenidas a partir de aceros B4 y B7, siendo en las probetas obtenidas a partir de acero B0 en las que el material presenta un comportamiento más distante en función de la entalla correspondiente.

En la gráfica representativa de la variación del trabajo necesario para la rotura  $W_R$  con respecto al grado de trefilado (Fig. 5.4) se aprecia cómo el trabajo necesario para inducir la rotura en el material es menor a medida que aumenta la deformación plástica acumulada en el proceso de trefilado del acero sobre el cual se han mecanizado las entallas, siendo esta pérdida menor para aquellas probetas que presentan una mecanización de entalla tipo PAA. En cuanto a la influencia de la forma geométrica de la entalla, también es necesario remarcar como a medida que avanza en el proceso de trefilado, se muestra una menor relevancia en cuanto a la sollicitación de tracción se refiere, de modo que la diferencia que se presenta entre ambas entallas es mucho más acusada en las probetas mecanizadas a partir del acero B0 que en aquellas muestras provenientes del B7, donde se observa que el trabajo necesario dista muy poco entre ambas entallas, siendo en todo caso en las probetas PCC en aquellas que se requiere más trabajo para llegar a la rotura total del material.

Fig. 5.3.  $F_{MAX}$  vs grado de trefilado: sollicitación de tracción.Fig. 5.4.  $W_R$  vs grado de trefilado: sollicitación de tracción.

La relación que se establece entre la  $F_{MAX}$  y el grado de trefilado es muy parecida para las probetas tipo PA y PC sometidas a ensayos de flexión por cuatro puntos, como se puede ver en gráfica de la Fig. 5.5 en la que se observa una caída de la capacidad de carga máxima a medida que aumenta el grado de trefilado, dicha pérdida aunque no obedece exactamente a una relación lineal no se aleja excesivamente de la misma. Se puede apreciar, como ya sucediese en los ensayos realizados bajo sollicitación de tracción, cómo el tipo de la entalla (A ó C) va dejando de ser representativa a medida que avanza el grado de trefilado, de modo que en las probetas mecanizadas a partir de acero B7 es muy difícil establecer una diferencia en cuanto a la carga máxima soportada entre una entalla y la otra.

En la gráfica  $W_R$  vs grado de trefilado de la probeta en cuestión (Fig. 5.6) se aprecia, al igual que sucediese en el ensayo de sollicitación a tracción, cómo existe una disminución de la cantidad de energía necesaria para inducir la rotura en el material a medida que aumenta el grado de trefilado del acero base o matriz. La relación de variación, aunque no exactamente lineal, se aproxima en grado sumo en las probetas con entalla tipo PA, y es en éstas en las que se observa la menor tasa de variación a medida que aumenta el grado de trefilado. La significación de la forma física de las entallas disminuye a medida que avanza el grado de trefilado, de modo que la diferencia de energía necesaria para inducir la rotura entre las entallas de las probetas PA y PC es menor en las probetas mecanizadas a partir de acero B4 que en las mecanizadas a partir de acero B0, siendo para las mecanizadas a partir de acero B7 de aproximadamente 10 kN.mm, prácticamente la misma que se observaba en las probetas ensayadas frente a sollicitación de tracción.

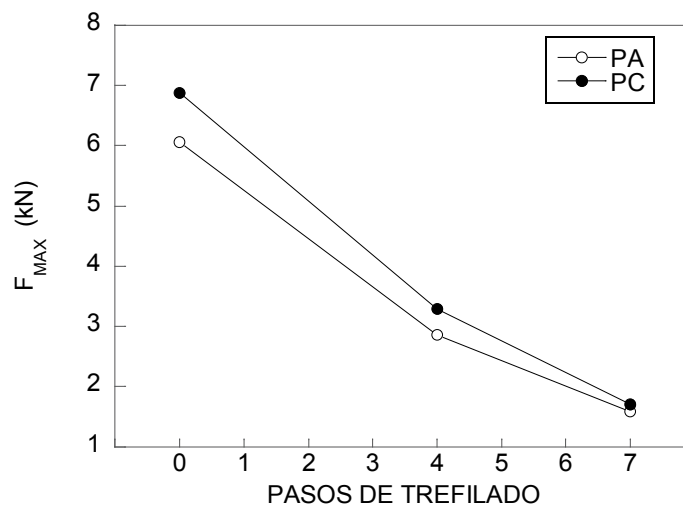


Fig. 5.5.  $F_{MAX}$  vs grado de trefilado: sollicitación de flexión.

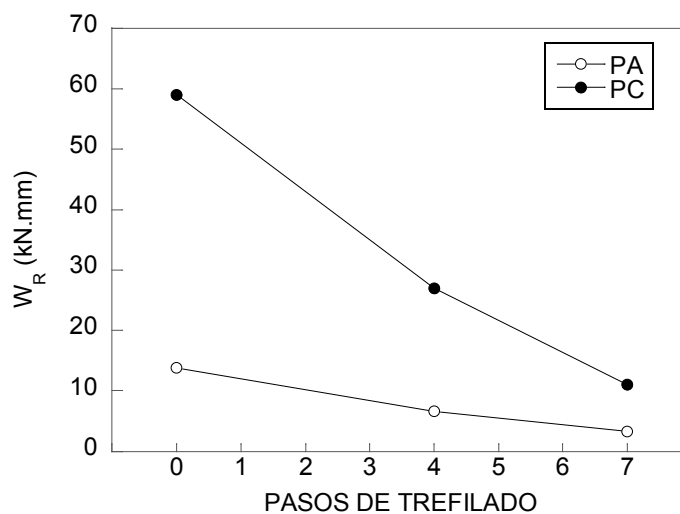


Fig. 5.6.  $W_R$  vs grado de trefilado: sollicitación de flexión.

## 2. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los datos obtenidos a partir del análisis fractográfico cuantitativo. En ella se representan las superficies características de la ZPF ( $A_{ZPF}$ ), la ZI ( $A_{ZI}$ ), la CE ( $A_{CE}$ ) y el porcentaje de ocupación ó área porcentual de las mismas en la superficie de fractura de la probeta particular ( $\%A_{ZPF}$ ,  $\%A_{ZI}$ ,  $\%A_{CE}$ ). Con el fin de establecer un valor medio, así como de reducir el número de datos a representar, se presentan los valores medios correspondientes a las tres probetas de cada uno de los ensayos analizados, de modo que, por ejemplo, la probeta B0-AA es una probeta ficticia media que recoge los valores medios de las  $A_{ZPF}$ ,  $A_{ZI}$  y  $A_{CE}$  de las probetas B0-AA-1, B0-AA-2, B0-AA-3.

Tabla 5.1. Dimensiones características de las ZPF, ZI y CE.

PROBETA		$A_{ZPF}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{ZI}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{CE}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_T$ (mm <sup>2</sup> )	$\% A_{ZPF}$	$\% A_{ZI}$	$\% A_{CE}$
TRACCIÓN	B0-AA	1.80	41.03	2.33	45.16	3.99	90.85	5.16
	B0-CC	1.83	27.19	6.72	35.75	5.13	76.07	18.81
	B4-AA	1.43	15.07	8.98	25.48	5.60	59.17	35.23
	B4-CC	1.57	6.57	9.55	17.69	8.88	37.13	54.00
	B7-AA	1.40	4.83	6.35	12.57	11.13	38.39	50.48
	B7-CC	1.20	5.42	5.47	12.09	9.92	44.82	45.26
FLEXIÓN	B0-A	0.74	26.74	0.27	27.75	2.67	96.36	0.97
	B0-C	1.1	24.68	1.98	27.76	3.96	88.90	7.13
	B4-A	1.22	13.93	3.47	18.62	6.55	74.81	18.64
	B4-C	0.89	14.72	3.2	18.81	4.73	78.26	17.01
	B7-A	0.47	9.14	1.4	11.01	4.27	83.02	12.72
	B7-C	0.49	9.68	2.12	12.29	3.99	78.76	17.25

En este punto es necesario remarcar el hecho de que, aunque en la mayoría de las fractografías analizadas resulta evidente el establecimiento de cada una de las zonas analizadas (ZPF, ZI, CE) en otros casos, como en las probetas solicitadas al ensayo de flexión con altos grados de trefilado (4 y 7), el proceso de medición ha resultado complicado y de algún modo subjetivo a la visión del observador.

En las gráfica de las Figs. 5.7 y 5.8 se presentan las evoluciones de los porcentajes de ocupación en función del grado de trefilado de las secciones de rotura de las probetas solicitadas al ensayo de tracción y flexión respectivamente. Se acompañan dos gráficas auxiliares, Figs. 5.7 (bis) y 5.8 (bis) para facilitar la interpretación de las dos anteriores.

En la sollicitación de tracción se puede observar cómo con independencia de la entalla que se analice, la ZPF sufre un incremento progresivo de su valor ( $A_{ZPF}$ ) a medida que aumenta el grado de trefilado del material [Figs. 5.7 y 5.7 (bis)]. Sin embargo, al analizar la evolución de la ZPF en las probetas sollicitadas a flexión, se observa como este comportamiento es extensible a los primeros pasos de trefilado pero no para el séptimo paso donde se observa una recesión de la ZPF (Fig. 5.8).

La ZI en las probetas sollicitadas a tracción presenta un comportamiento diferenciado entre las entallas tipos A y C; mientras que en las probetas con entalla tipo A se ve como la ZI presenta menos porcentaje de ocupación del área total a medida que aumenta el grado de trefilado, la probeta tipo C sigue también dicha tendencia en los aceros B0 y B4, pero no en las probetas procedentes del acero B7. Este mismo comportamiento es extensible a las probetas sollicitadas a flexión por cuatro puntos, ya que con independencia del tipo de entalla que presenten se observa como la ZI disminuye a medida que avanza el proceso de trefilado pero aumentando en el acero B7.

La CE o labio cortante presenta una conducta contraria a la ZI. En las probetas sollicitadas a tracción se observa como el área de ocupación de la sección de rotura destinado a la CE aumenta progresivamente con el grado de trefilado en las probetas entalladas tipo PAA, mientras que las probetas entalladas tipo PCC se observa un decrecimiento de la misma en el séptimo paso de trefilado. El mismo comportamiento de las probetas entalladas tipo PCC es extensible a las probetas PA y PC, donde se presenta un incremento de la CE del paso 0 al 4, pero un descenso al llegar al paso 7. El análisis global de ambas gráficas simultáneamente indica una tendencia a la preservación de la ZPF, mientras que el área reservada para la ZI y la CE se ve compensada entre ambas según el tipo de sollicitación y tipo de entalla.

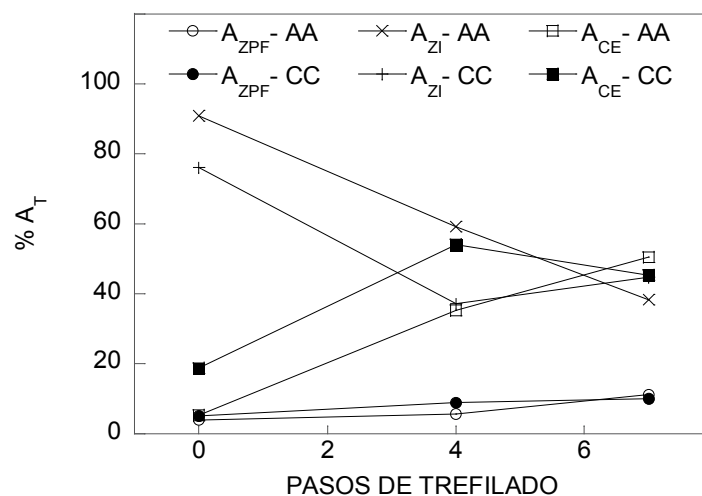


Fig. 5.7. Área porcentual vs grado de trefilado: sollicitación de tracción.



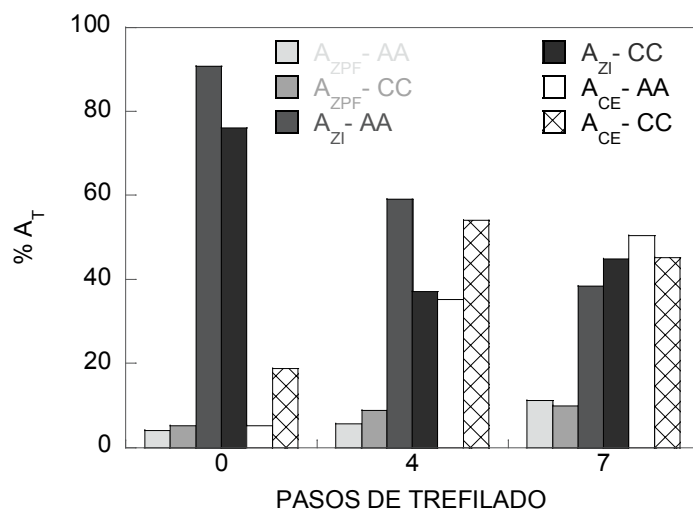


Fig. 5.7 (bis). Área porcentual vs grado de trefilado: sollicitación de tracción.

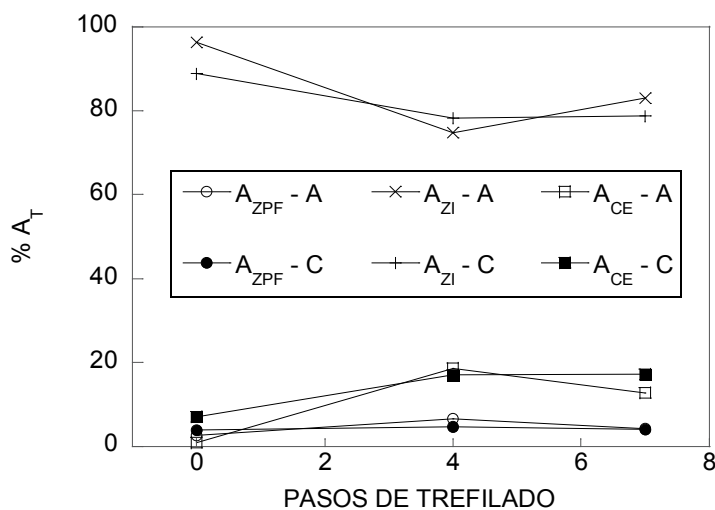


Fig. 5.8. Área porcentual vs grado de trefilado: sollicitación de flexión.

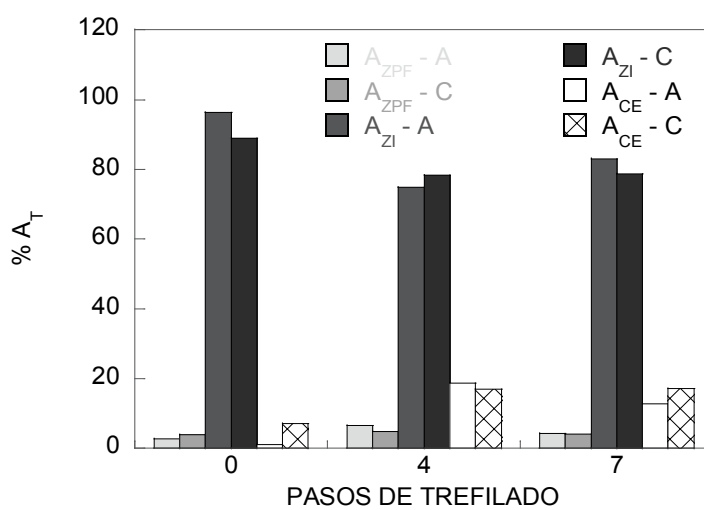


Fig. 5.8 (bis). Área porcentual vs grado de trefilado: sollicitación de flexión.

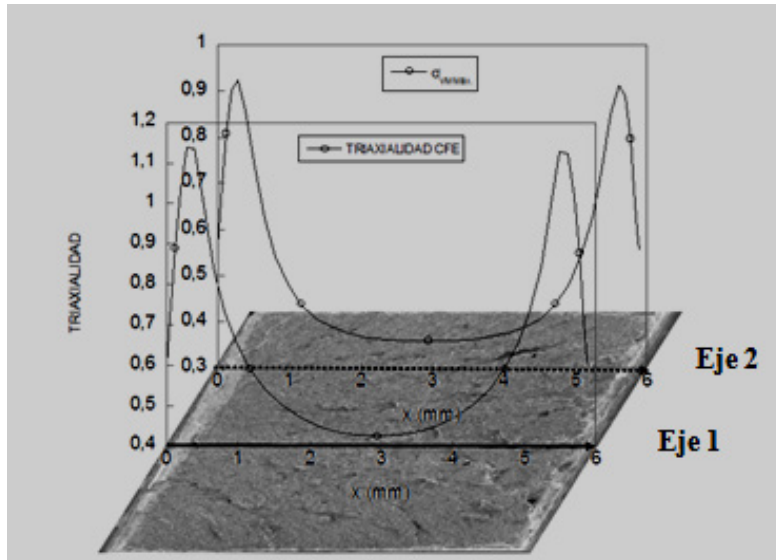
## 2.1. Micromecanismos básicos de fractura vs triaxialidad

En este apartado se pretende poner de manifiesto la relación existente entre los micromecanismos básicos de fractura y la triaxialidad de la zona. Para ello se va a proceder a analizar las fractografías correspondientes a la sección de rotura de las diferentes probetas, mediante el apoyo que proporciona el análisis numérico realizado, recurriendo para ello a la evaluación del factor de triaxialidad a lo largo de la sección neta de rotura de la probeta.

En el capítulo IV se estudiaron las secciones de rotura de las distintas probetas a través de los campos de tensión instalados durante el instante previo a la rotura del material. Para ello se hizo uso de la tensión equivalente de von Mises y se estableció una relación directa entre el estado tensional (tensión equivalente de von Mises), que determina el análisis numérico, y la fractografía de la probeta objeto de estudio. En este apartado se va a realizar el estudio de la sección de rotura mediante otro punto de vista que tratará de vincular la fractografía de la zona con el factor de triaxialidad. La triaxialidad es el factor que relaciona la tensión hidrostática y la tensión equivalente de von Mises. Valores de triaxialidad superiores a uno indican que en el estado tensional predomina la tensión hidrostática ( $\bar{\sigma} < \sigma$ ) y por tanto en la zona prevalece un cambio en el volumen de la misma, mientras que una triaxialidad menor que uno indica que en el estado tensional predomina la tensión equivalente de von Mises sobre la hidrostática ( $\bar{\sigma} > \sigma$ ) lo que supone un incremento de las componentes desviadoras del tensor de tensiones y por tanto en la zona prevalece el cambio de forma.

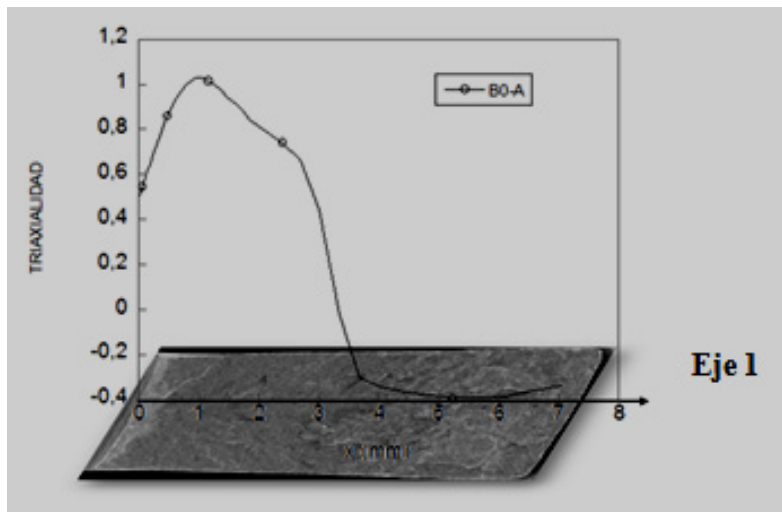
Las características particulares de las probetas hacen que en el análisis minucioso sea necesario hacer un recorrido a través de diferentes secciones de la probeta. Por ello en las Figs. 5.9 y 5.10 se presenta una descripción de los ejes que se van a encontrar en el análisis. En dichas figuras el denominado *Eje 1* es el eje básico que se va a encontrar en todos los análisis. Tiene su origen en el punto central del fondo de entalla izquierdo y discurre perpendicularmente a dicho fondo hasta alcanzar en las probetas solicitadas a tracción la entalla derecha o, en el caso de las probetas a flexión, el borde superior de la probeta. El denominado *Eje 2* transcurre paralelo al anterior, y en él el origen se va a fijar en el fondo de entalla izquierda, pero la posición vendrá determinada por alguna característica particular, como puede ser un valor máximo de la tensión equivalente de von Mises o de la tensión axial que se haya encontrado en esa zona etc. El denominado *Eje 3* (Fig. 5.11) se reserva para analizar la mitad de la sección que transcurre paralela al eje longitudinal de la entalla o entallas y tiene su origen en el punto central de la sección de la probeta, y por último el denominado *Eje 4* (Fig. 5.12) se trata de un eje paralelo al 3, pero su origen se encuentra en el centro de las entallas, (en este apartado no se va a tratar, pero se hará necesario más adelante cuando se evalúe la variación de las variables a lo largo del perfil del fondo de entalla). Para

los *Ejes 1 y 2* se reserva la variable  $x$ , que indica la distancia del punto de observación al fondo de entalla izquierdo. En los *Ejes 3 y 4* se establece la variable  $y$ , que indica la distancia del punto de observación al origen del eje.



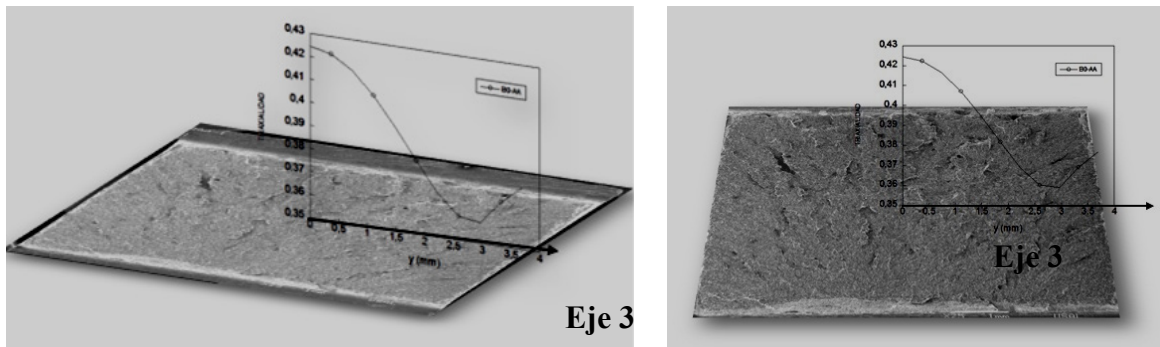
*Eje 1: parte del punto central del fondo de entalla, (FE).*  
*Eje 2: parte del punto del fondo de entalla en que se presentan valores máximos de la tensión equivalente de von Mises.*

Fig. 5.9. Descripción de los ejes utilizados para el análisis de la triaxialidad de las diferentes secciones de aquellas probetas solicitadas a tracción.



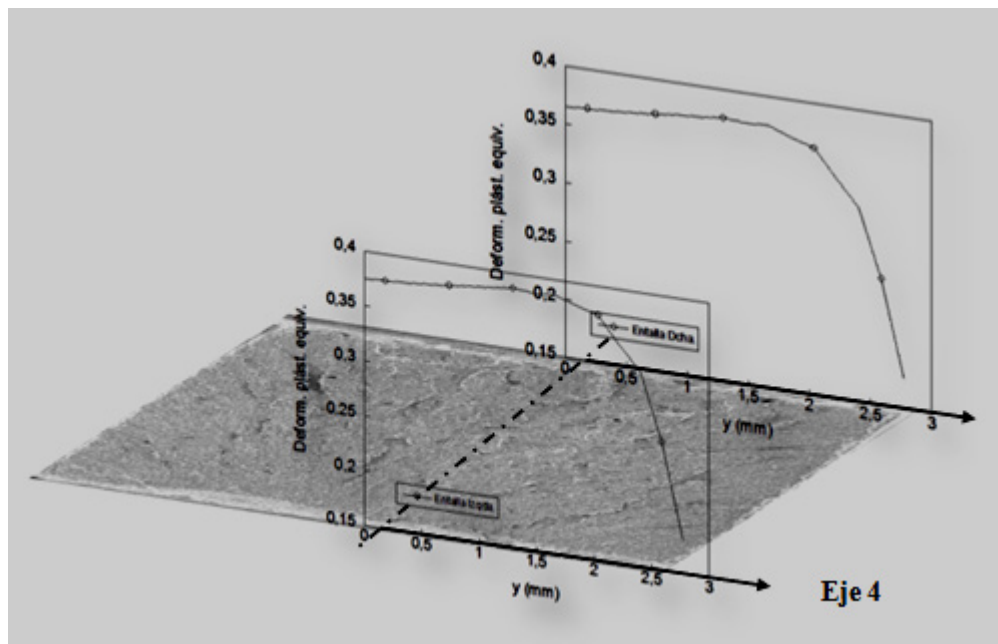
*Eje 1: parte del punto central del fondo de entalla, (FE), y se distribuye perpendicularmente hasta el borde superior de la probeta.*

Fig. 5.10. Descripción de los ejes utilizados para el análisis de la triaxialidad de las diferentes secciones de las probetas solicitadas a flexión.



**Eje 3:** parte del punto medio de la sección de rotura y se distribuye paralelamente al fondo de entalla.

Fig. 5.11. Descripción de los ejes utilizados para la sección transversal de la sección de rotura.



**Eje 4:** parte del punto central del fondo de entalla, (CFE), y recorre paralelamente el fondo de entalla.

Fig. 5.12 Diagrama básico para la interpretación de las gráficas referentes al estudio de las variables principales en los fondos de entalla izquierdo y derecho. Anexo III.

Para evitar la excesiva extensión del capítulo se han derivado para el Anexo IV las imágenes correspondientes a cada una de las probetas analizadas, en ellas se hace visible la relación entre el factor de triaxialidad de la sección con el mapa fractográfico de la superficie de fractura en cuestión. Se adjuntan miniaturas de la microfractografía de cada una de las zonas representativas, en las que se observa un cambio de conducta en el factor de triaxialidad. En

los primeros apartados se presentaran las imágenes derivadas de los ensayos bajo sollicitación de tracción y seguidamente los provenientes de los ensayos de flexión por cuatro puntos. Cuando se trata del ensayo de tracción el tamaño de las microfractografías de la sección de rotura es excesivamente grande, de modo que se procede a recortar la imagen y presentar sólo la sección de referencia. En el caso de las imágenes de las probetas sollicitadas a flexión, el tamaño de las fractografías no hace necesario reducirlas, de modo que se presentan a tamaño completo. A modo de ejemplo, se presentan las imágenes de las Figs. 5.13, 5.14 y 5.15 donde se presentan los valores de triaxialidad de la probeta B0 con entalla A, tanto cuando se sollicita a tracción como a flexión; en ellas se pueden observar que se han utilizado los *Ejes 1, 2 y 3* mientras que en el ensayo de sollicitación a flexión sólo se ha utilizado el *Eje 1*.

Cuando se procede a realizar el análisis de la probeta B0-AA (Fig. 5.13) se presentan en la misma imagen las dos curvas representativas de la triaxialidad, una correspondiente a la que discurre por el punto central del fondo de entalla (*Eje 1*) y la correspondiente a la sección en la que se han observado los valores más elevados de la tensión equivalente de von Mises (*Eje 2*). El valor máximo en la tensión equivalente de von Mises en el *Eje 2* induciría a pensar que en es en éste donde cabe esperar los valores más bajos del factor de triaxialidad, hecho que queda patente en la imagen, con una curva característica más baja que la correspondiente al *Eje 1*. En ella se aprecia cómo el factor de triaxialidad presenta un máximo en los puntos próximos a la entalla pero ligeramente desplazado hacia el interior; este hecho va a ser claramente visible en el resto de imágenes, incidiendo en el hecho de que los valores máximos del factor de triaxialidad se sitúan muy próximos al fondo de entalla. A medida que el punto de vista se mueve a través de la sección, el factor de triaxialidad se atenúa rápidamente estableciéndose un valor prácticamente constante a lo largo de la sección central de la probeta que es para el *Eje 1* próximo a 0.5 y para el *Eje 2* ligeramente inferior a 0.4.

En la sección perpendicular, Fig. 5.14, el factor de triaxialidad en el Eje perpendicular *Eje 3* (*y*) al eje de referencia, *Eje 1* (*x*), experimenta un rápido descenso desde el centro de la probeta hacia el borde exterior de la misma, llegando al cual se produce un ligero incremento del mismo que conduce a la consiguiente formación de la CE. De este modo se puede acotar el factor de triaxialidad para la formación de la corona, en la probeta B0-AA, entre los valores de 0.36 y 0.38.

Cuando se analizan en detalle las imágenes derivadas de los ensayos realizados bajo sollicitación a tracción concurre una circunstancia que no se presenta en los ensayos de sollicitación de flexión (Fig. 5.15): el solape de la triaxialidad de las dos entallas. Este hecho enmascara las características que claramente se observan en el ensayo de flexión y que vinculan directamente la fractografía de la zona con el factor de triaxialidad, por ello se

recomienda al lector visualizar primero las imágenes que proceden de los ensayos de flexión y posteriormente las de tracción.

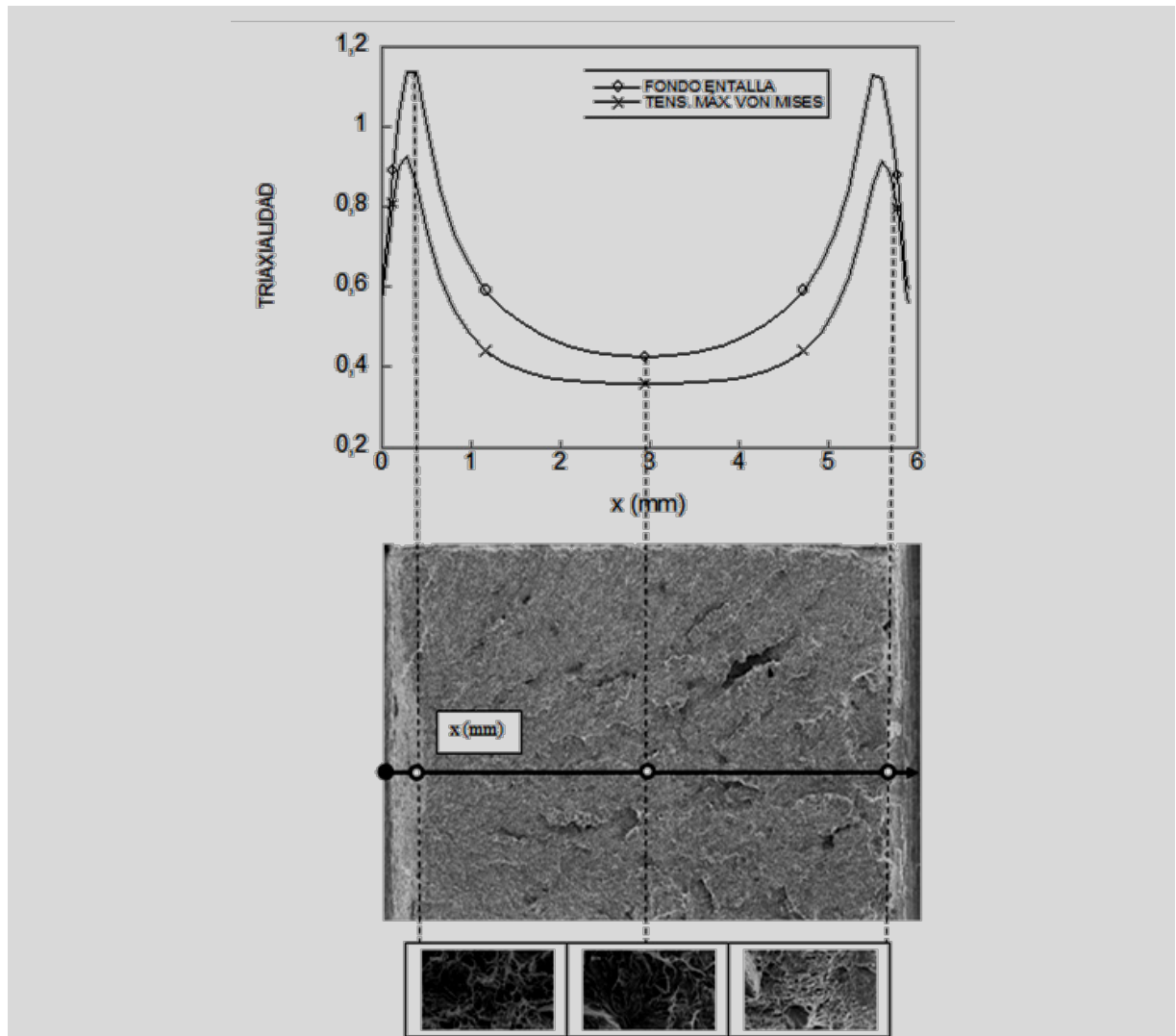


Fig. 5.13. Evolución de la triaxialidad vs fractografía a lo largo del eje de referencia de la probeta B0-AA.

Tras el análisis de correlación entre todas las imágenes fractográfica y los datos numéricos aportados por el MEF que, como se ha comentado previamente, se encuentran en el Anexo IV, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Para cada tipo de entalla analizado se puede acotar un intervalo en el que se mueve el factor de triaxialidad, siendo este independiente de la solicitación a la que se encuentre ensayado. Esta circunstancia conduce a establecer para las probetas con entalla A ó AA un intervalo de extremos 1 y 1.2, [1, 1.2], y para las probetas con entalla C ó CC entre 0.6 y 0.8 [0.6, 0.8]; en la probeta B4-CC se ha presentado una discrepancia respecto lo anteriormente expuesto mostrando un valor discretamente superior a 0.8.

- Las fronteras entre los micromecanismos básicos de fractura se definen en el instante previo a la rotura del material puesto que, a pesar de que la triaxialidad presenta una distribución a lo largo de la sección definida por las dos entallas, la fractografía resultante queda establecida por la entalla en la que se inicia el proceso de fractura. Esta característica se pone claramente de manifiesto cuando se comparan las fractografías correspondientes a los ensayos resultantes de las sollicitaciones de tracción y flexión.
- La extensión de la ZPF está directamente relacionada con la pendiente creciente del factor de triaxialidad de la zona, de modo que la proyección del tramo creciente sobre el plano de entalla determina, sobre la fractografía, la anchura de la ZPF.

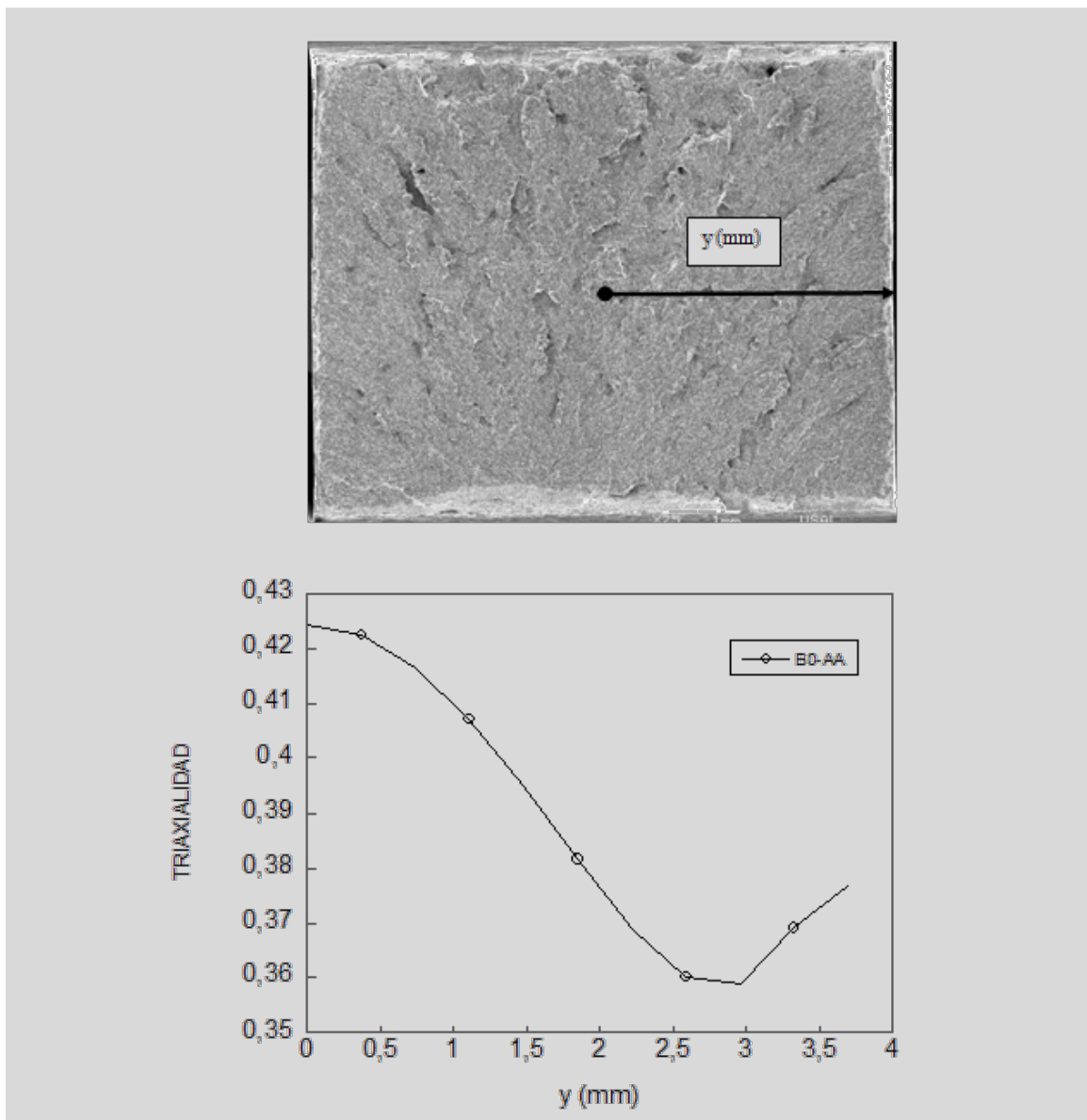


Fig. 5.14. Evolución de la triaxialidad en la sección de rotura de la probeta B0-AA a lo largo del eje perpendicular (y) al eje de referencia (x).

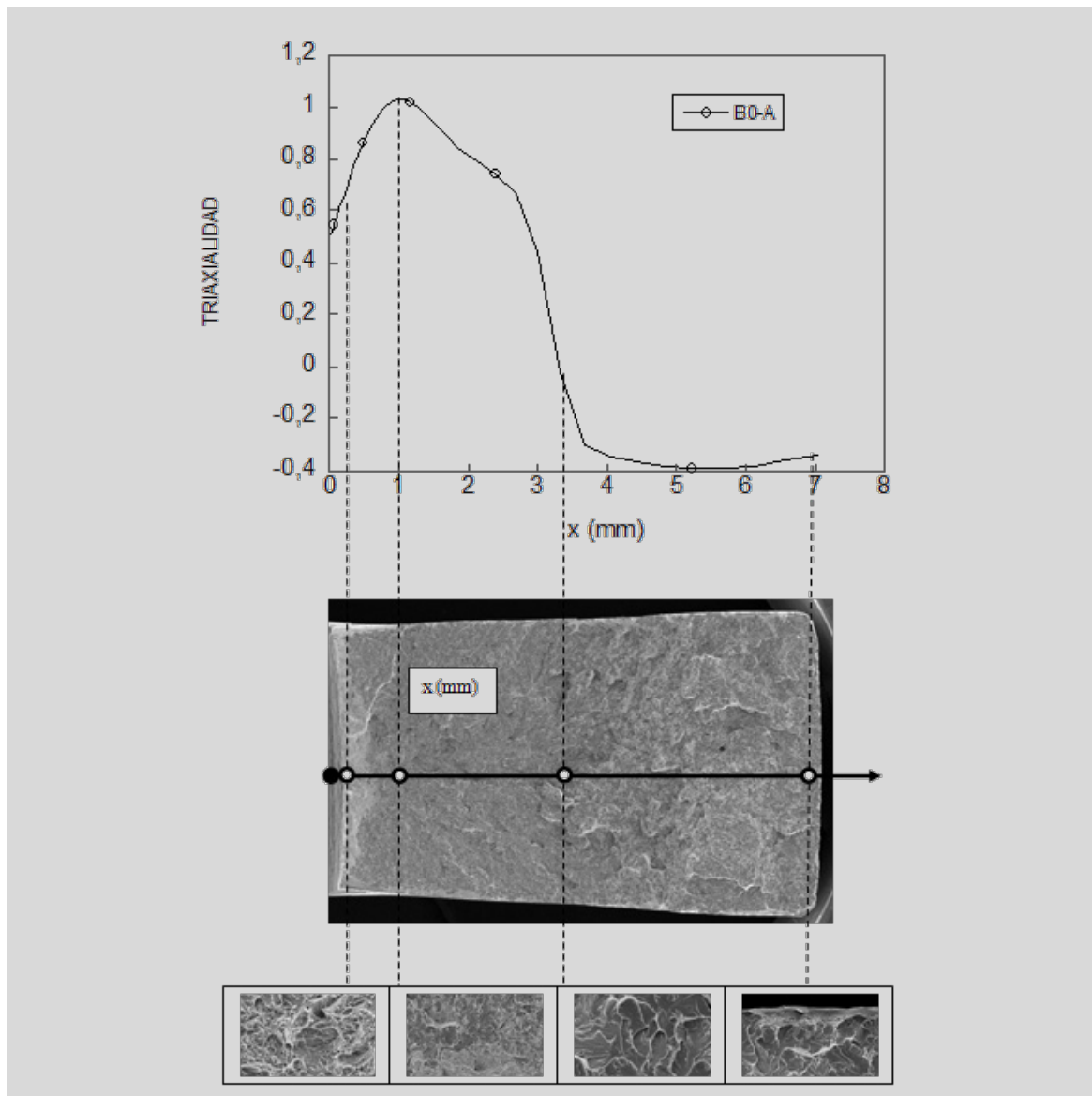


Fig. 5.15. Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B0-A.

- Llegado al punto de máximo valor del factor de triaxialidad, se produce el disparo por clivaje; esto se manifiesta con una marcada pendiente decreciente en dicho factor. El clivaje que se muestra, en las diferentes fractografías, es tanto más puro cuanto mayor es la pendiente de descarga del mismo. Así, se puede observar como en los ensayos de sollicitación de tracción se establece una pendiente más acusada que en los ensayos de flexión; esta característica es particularmente observable en las probetas con entallas tipo A, donde la pendiente de descarga del factor de triaxialidad es muy suave y la fractografía está marcada por la presencia de zonas de microhuecos inmersas dentro de la propia estructura de clivaje.



- Los cambios bruscos en los valores de la pendiente indican, por tanto, aquellas zonas del material en las que se encuentran las fronteras definidas entre los diferentes micro-mecanismos de fractura.
- El valor del factor de triaxialidad marca en buena medida el comportamiento de la ZI induciendo un clivaje tanto más puro cuanto más cercano se encuentre el factor de triaxialidad a cero; observándose como en las zonas en que el clivaje se encuentra hibridado con microhuecos un factor de triaxialidad distinto de cero. En el caso particular de las probetas solicitadas al ensayo de flexión, la cantidad de huecos presentes en la zona superior de la sección de entalla es tan elevada, que en la gráfica de triaxialidad se puede observar un mínimo, a partir del cual se produce una inversión en el valor de la pendiente de la curva, lo que evidencia la manifiesta cantidad de huecos encontrados en el extremo superior de la probeta.

A lo largo del estudio de las diferentes zonas que constituyen la fractografía que componen la sección de rotura de la probeta, se ha tratado de realizar una correlación entre el tamaño de los huecos presentes en cada una de las zonas y el factor de triaxialidad. Los resultados obtenidos no fueron concluyentes puesto que para garantizar que las medidas realizadas sean reproducibles, se hace necesario definir un plano de trabajo. Este plano de trabajo habría de ser consensuado entre diferentes observadores, puesto que en su definición, se presupone una visión subjetiva de cada uno.

### 3. ANÁLISIS NUMÉRICO

#### 3.1. Análisis del comportamiento, en función del grado de trefilado, de las principales variables internas en las probetas tipo PAA

Tras analizar la evolución de las variables internas en los fondos de entalla se procede a establecer la distribución de las mismas a lo largo de la sección neta transversal de las probetas ensayadas (sección transversal mínima que pasa por el fondo de las entallas). Las gráficas van a presentar los tres grados de trefilado analizados (0, 4 y 7) con el fin de hacer inferencia sobre la evolución de las variables estudiadas en los diferentes grados de trefilado que sirven de material base para las probetas entalladas. El estudio de estas variables internas (deformación plástica total equivalente, tensión equivalente o efectiva de von Mises, tensión hidrostática y triaxialidad tensional) se ha realizado respecto a la profundidad en la probeta ( $x$ ) y con relación al fondo de entalla, teniéndose de esta forma que la profundidad mínima ( $x = 0$ ) se corresponde con el fondo de entalla y la profundidad máxima con el eje longitudinal de la probeta considerada en cada caso.

En lo que se refiere a la deformación plástica equivalente (Fig. 5.16) es la probeta B4-AA la que presenta mayor nivel de deformación plástica en el fondo de entalla ( $x = 0$ ), seguido de las probetas B0-AA y B7-AA. En los tres casos analizados la distribución sigue el mismo patrón de decaimiento: presentando un descenso acusado desde el fondo de entalla hasta alcanzar una profundidad en la sección de rotura ( $x$ ) de 0.35 mm, lugar a partir del cual se produce una estabilización del valor de la deformación plástica (que resulta próximo a los 0.025 en los tres casos) hasta alcanzar el eje longitudinal de la probeta.

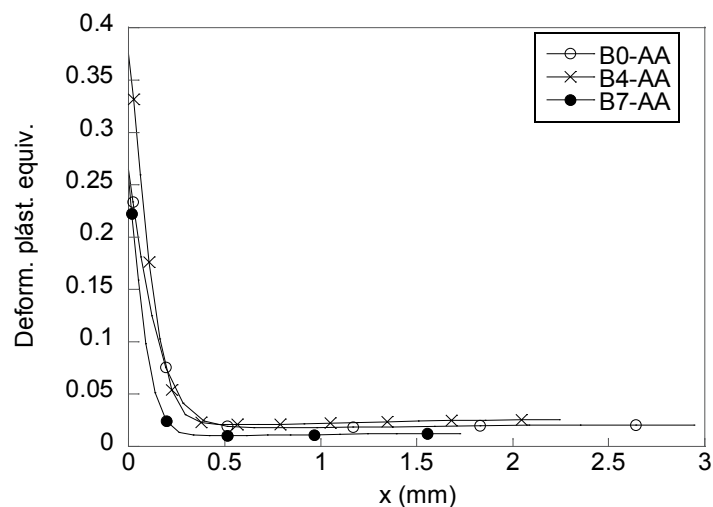


Fig. 5.16. Deformación plástica equivalente vs profundidad en la probeta.

Tras el análisis de la Fig. 5.17, correspondiente a la tensión equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ ), se concluye que el estado tensional de las probetas obedece a un criterio de máxima tensión equivalente con el grado de trefilado del acero base; de modo que es la probeta B7-AA la que presenta el mayor estado tensional, seguida por las B4-AA y B0-AA (en ese orden). Al igual que ha sucedido con la deformación plástica el valor máximo de la tensión equivalente de von Mises se establece en el fondo de entalla, tras el cual sufre una caída sustancial a lo largo de la sección. Este *amortiguamiento* de  $\bar{\sigma}$  es sustancialmente diferente de unos aceros a otros, aunque en todos ellos se produce una estabilización tensional a partir de aproximadamente 0.5 mm del fondo de entalla, siendo el valor de la tensión de estabilización dependiente del tipo de acero, mayor cuanto mayor es el grado de trefilado. La probeta B4-AA es la que manifiesta una distribución más homogénea a lo largo de la sección, puesto que es en ella donde la caída de la tensión es menos llamativa. La probeta B0-AA es, por contra, la que presenta la mayor caída siendo ésta cercana a los 0.4 GPa en  $x = 1$  mm; sin embargo, el mayor nivel de amortiguamiento tensional se observa en la probeta B7-AA donde a partir de aproximadamente 0.35 mm del fondo de entalla, la probeta presenta ya una tensión prácticamente homogénea a lo largo de toda la sección.

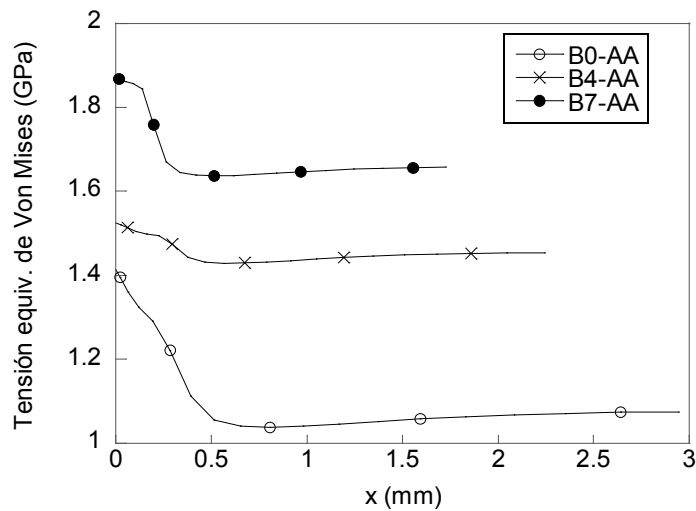


Fig. 5.17. Tensión equivalente de von Mises vs profundidad en la probeta.

Al igual que sucede con la tensión equivalente de von Mises, el valor máximo de la tensión hidrostática ( $\sigma$ ) crece a medida que aumenta el grado de trefilado del acero de procedencia de las probetas, pero, a diferencia de lo que sucediese en la tensión equivalente de von Mises en la cual se observa un valor máximo en el centro de la entalla, la tensión hidrostática presenta un máximo desplazado situado aproximadamente a 0.22 mm de profundidad (como término medio) en las tres probetas analizadas (Fig. 5.18). La tensión hidrostática presenta la misma curva de distribución (desde el fondo de entalla hasta el eje longitudinal) para los tres aceros analizados. En el fondo de entalla ( $x=0$ ) el valor máximo de  $\sigma$  es para la probeta B7-AA y el mínimo para la probeta B0-AA. A medida que se avanza en la sección se presenta un crecimiento prácticamente lineal de  $\sigma$  hasta alcanzar un valor máximo, siendo éste de mayor cuantía cuanto más elevado es el grado de trefilado al que pertenece la probeta en cuestión. Alcanzado el valor máximo se produce un descenso prácticamente exponencial de  $\sigma$  hasta que se establece un valor mínimo de entre 0.5 y 0.75 GPa en el centro de la probeta (eje longitudinal de la probeta y del alambre de partida para el mecanizado).

La triaxialidad tensional ( $t$ ) muestra una distribución similar a la de la tensión hidrostática (Fig. 5.19), de modo que partiendo de un valor de  $t = 0.6$  en el fondo de la entalla ( $x = 0$ ) para los tres aceros, aumenta linealmente con una pendiente muy acusada hasta alcanzar en aproximadamente 1/4 de mm (término medio para las tres probetas) su valor máximo; si bien este difiere del carácter encontrado en la tensión hidrostática donde el valor de máximo no presenta un crecimiento con el grado de trefilado de la probeta de base. Alcanzado el valor máximo se produce un descenso acusado hasta llegar al eje longitudinal (profundidad máxima), lugar donde se encuentran los valores mínimos.

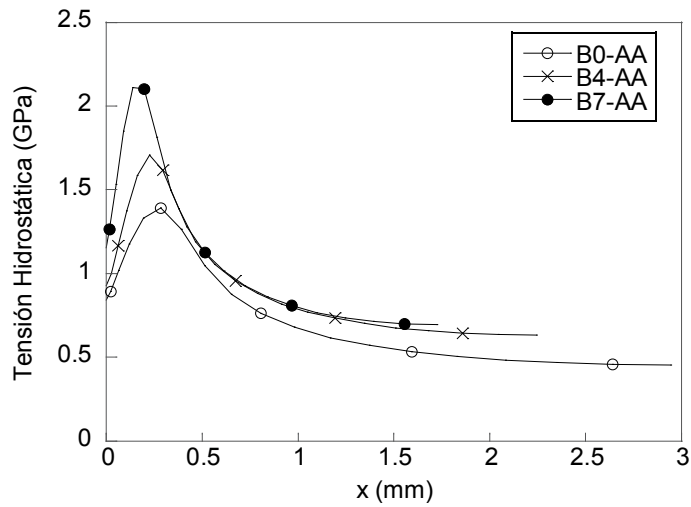


Fig. 5.18. Tensión hidrostática ( $\sigma$ ) vs profundidad en la probeta.

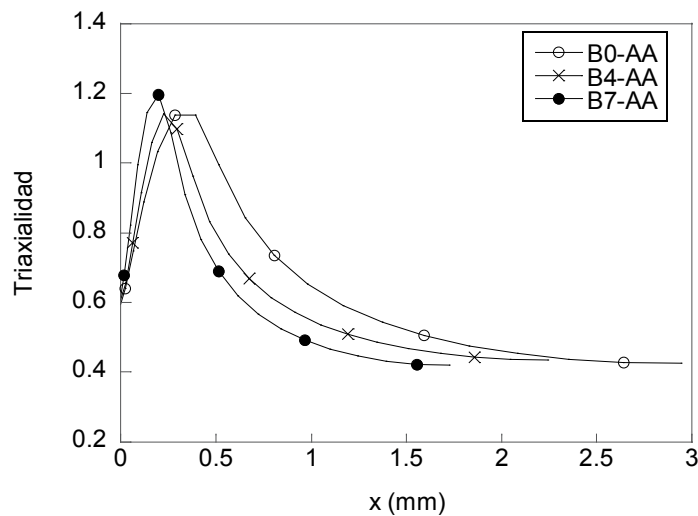


Fig. 5.19. Triaxialidad vs profundidad en la probeta.

### 3.2. Análisis del comportamiento, en función del grado de trefilado, de las principales variables internas en las probetas tipo PCC

La distribución de la deformación plástica equivalente (aceros B0, B4 y B7) mostrada en la Fig. 5.20 refiere, al igual que en el caso de las probetas PAA, cómo el valor máximo de deformación se sitúa en el fondo de entalla  $x = 0$ , en los tres casos analizados. Este valor es diferente de unas probetas a otras siendo la B4-CC la que presenta un nivel de deformación más elevado seguido por las B0-CC y B7-CC. Esta característica también se pudo observar para las probetas con entalla tipo AA, aunque no de un modo tan señalado. Con relación a la

morfología de la distribución ésta es igual en los tres casos, pues en todos ellos se puede observar que existe una atenuación del valor de la deformación plástica a medida que el punto de referencia analizado se aleja del centro de la entalla. A pesar de las coincidencias existentes entre las probetas PAA y PCC previamente comentadas, en lo referente a la distribución de la deformación plástica equivalente a lo largo de la sección, es manifiesta la diferencia entre los dos tipos de entalla, siendo ésta característica para cada una de ellas.

La distribución de la tensión equivalente o efectiva de von Mises (Fig. 5.21), es sustancialmente diferente a la hallada en las probetas PAA. En éstas se observa un comportamiento muy homogéneo (*cuasi cte.*) a lo largo de toda la sección neta, donde prácticamente se podría aproximar su curva característica por una recta para los tres aceros; siendo la probeta más disidente respecto a este hecho la B0-CC, donde se presenta una ligera disminución de la tensión a medida que el punto de referencia se aleja del centro de entalla. En cuanto al nivel de tensión, se refiere el mismo criterio que el establecido para las probetas con entalla tipo PAA, lo que supone un estado tensional más elevado para aquellas probetas mecanizadas a partir del material de mayor el grado de trefilado.

En cuanto a la tensión hidrostática ( $\sigma$ ) se refiere (Fig. 5.22) la distribución de la misma sigue un patrón diferenciado en función del grado de trefilado de la probeta base. La probeta B0-CC experimenta los valores menos significativos de  $\sigma$ , no superando los 0.9 GPa; no obstante, se trata de la probeta que presenta el comportamiento más homogéneo a lo largo de toda la sección referida. La probeta B4-CC, por contra, presenta los valores más elevados de  $\sigma$ , aproximándose a 1.3 GPa. Esta probeta muestra un comportamiento creciente a medida que el punto de referencia se desplaza lo largo de la sección ( $x > 0$ ), alcanzando su valor máximo en el punto central de la sección. La probeta B7-C experimenta una distribución de  $\sigma$  similar a la probeta B0-CC, salvo que una vez alcanzado el valor máximo ésta decae rápidamente (según aumenta la profundidad en la probeta) hasta alcanzar valores próximos a 1 GPa en eje longitudinal de la probeta.

La distribución de la triaxialidad tensional (Fig. 5.23) a lo largo de la sección de la entalla es pareja con la de la tensión hidrostática, únicamente se ve desplazada por los valores de la tensión equivalente de von Mises. En este caso se observa cómo es la probeta B0-CC la que presenta el comportamiento más homogéneo a lo largo de la sección neta. La probeta B4-CC presenta una distribución de la triaxialidad semejante a la B0-CC pero con valores mucho más elevados, siendo en ella donde se alcanza el mayor factor. La probeta B7-CC es la que presenta el comportamiento más heterogéneo a lo largo de la sección, con un aumento progresivo hasta alcanzar un cuarto de la sección neta para luego disminuir hasta alcanzar el eje longitudinal de la probeta.

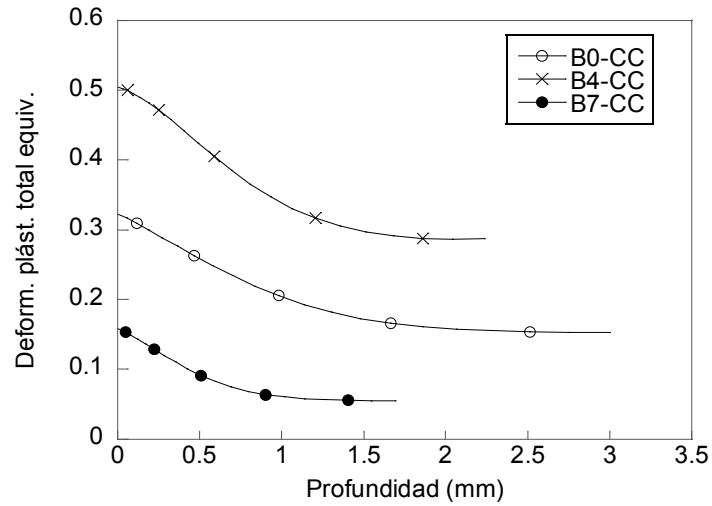


Fig. 5.20. Deformación plástica equivalente vs profundidad en la probeta.

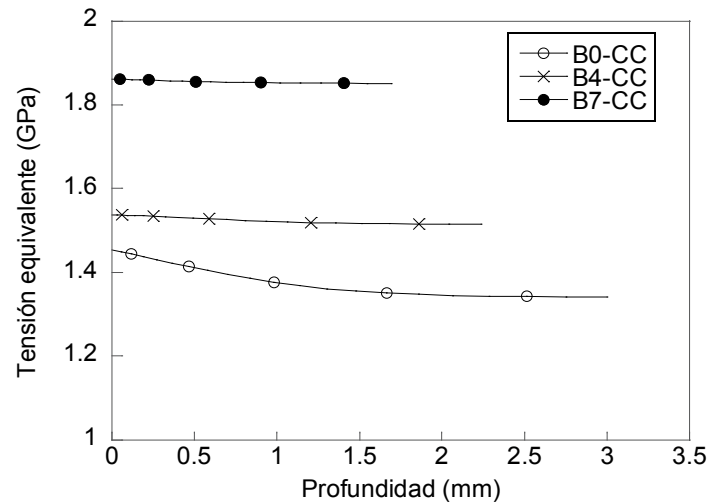


Fig. 5.21. Tensión equivalente de von Mises vs profundidad en la probeta.

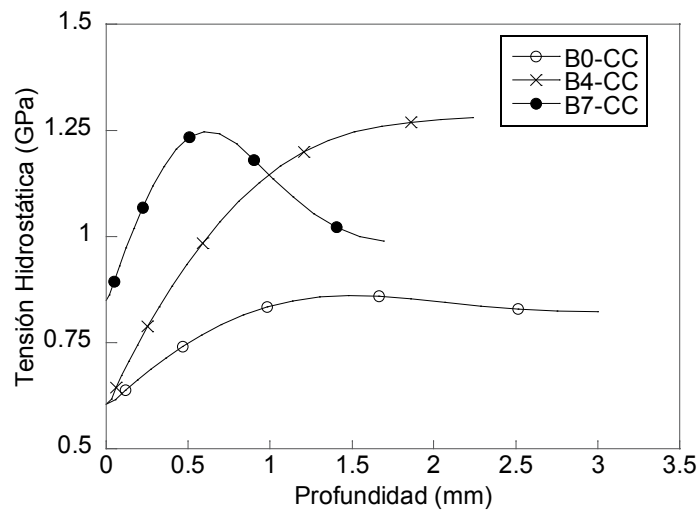


Fig. 5.22. Tensión hidrostática ( $\sigma$ ) vs profundidad en la probeta.

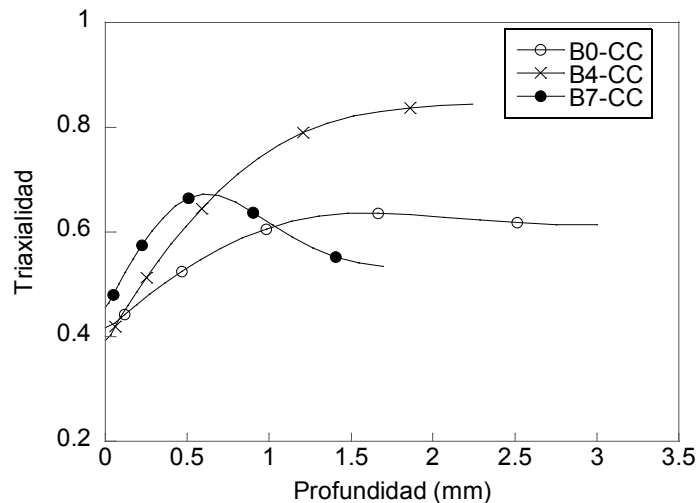


Fig. 5.23. Triaxialidad vs profundidad en la probeta.

### 3.3. Estudio global probetas con entalla tipo PAA y PCC

La presencia de entallas en las probetas solicitadas a tracción ha condicionado notablemente el estado tensional en la probeta, induciendo un estado triaxial de tensiones alejado notablemente del que se presenta en un ensayo de tracción simple en el que la tensión está gobernada por un estado uniaxial uniforme, que se define a lo largo del eje longitudinal de la probeta en el que se está produciendo la sollicitación mecánica exterior (o la propia sollicitación mediante el MEF), y se distribuye homogéneamente a lo largo de toda la sección ( $\sigma_{Axial}$ ). Con el fin de extender el estudio de la tensión axial a las probetas solicitadas a flexión y poder establecer comparaciones entre ambas, se ha optado por denominar a la tensión axial como ( $\sigma_L$ ), definiéndose ésta como la tensión perpendicular a la sección de rotura, o lo que es lo mismo la tensión dirigida según el eje longitudinal de la probeta objeto de estudio. Esta medida tiene como fin evitar la posible confusión debido al cambio de ejes que se produce como consecuencia del tipo de ensayo que se esté realizando.

Con el fin de valorar el comportamiento de la tensión axial en función del grado de trefilado, de las probetas PAA y PCC, se presentan las gráficas correspondientes a la distribución de tensiones axiales que se producen desde el punto medio del fondo de la entalla izquierda del material hasta el punto central de la probeta (denotando esta longitud mediante la variable  $x$ ), durante dos instantes fundamentales en la evolución del ensayo de tracción que son: el instante de carga máxima (ICM) y el instante previo a la rotura de la probeta (IRP).

En el caso de las probetas entalladas tipo PAA el ICM coincide con el IRP, de ahí que sólo sea necesario presentar una distribución de tensiones (Fig. 5.24). El comportamiento que exhiben los tres aceros analizados es en esencia el mismo. La tensión axial en el eje longitudinal  $Y$  de la probeta ( $\sigma_Y$ ), coincidente con el eje longitudinal del alambre de acero matriz, presenta

un valor máximo creciente con el grado de trefilado. Éste se sitúa en todos los casos desplazado ligeramente del punto central del fondo de entalla ( $x = 0.25$  mm). Establecido el máximo se produce un descenso prácticamente simétrico de la tensión hasta alcanzar en  $x = 0.5$  mm un valor muy similar al encontrado en el fondo de entalla. Para  $x > 0.5$  mm, el material sigue acusando un descenso moderado del valor de la tensión hasta alcanzar el mínimo que se localiza en la zona central de la sección. Este mínimo es tanto más elevado cuanto mayor es el grado de trefilado de la probeta.

En el caso de las probetas con entalla tipo CC se hace necesario realizar una evaluación de los valores de la tensión en el ICM y el IRP, puesto que en estas probetas ambos instantes no concurren salvo en el caso de la probeta B7-CC. En las Figs. 5.25 y 5.26 se presentan las distribuciones de la tensión axial o longitudinal ( $\sigma_L$ ) en el punto central del fondo de entalla izquierda durante el ICM y el IRP respectivamente. Comparando ambas gráficas se pueden establecer las diferencias existentes en las mismas, no siendo realmente significativas para las probetas B0-CC y B7-CC, mostrando ambas un comportamiento semejante en los dos instantes señalados. Sin embargo, en la probeta B4-CC existe una diferencia marcadamente significativa que tiene lugar en la distribución de tensiones. Mientras que en el IRP la probeta B4-CC presenta una distribución axial creciente desde el fondo de entalla hasta alcanzar un valor máximo situado en el centro de la probeta, en el ICM la distribución es muy similar a la encontrada en las probetas con entalla tipo AA, es decir con un máximo desplazado del punto medio del fondo de entalla, situándose en las probetas con entalla tipo CC a más de medio milímetro del fondo de entalla. Este máximo, a diferencia de lo que sucediese en las probetas con entalla tipo AA, se va aproximando más al fondo de entalla a medida que aumenta el grado de trefilado.

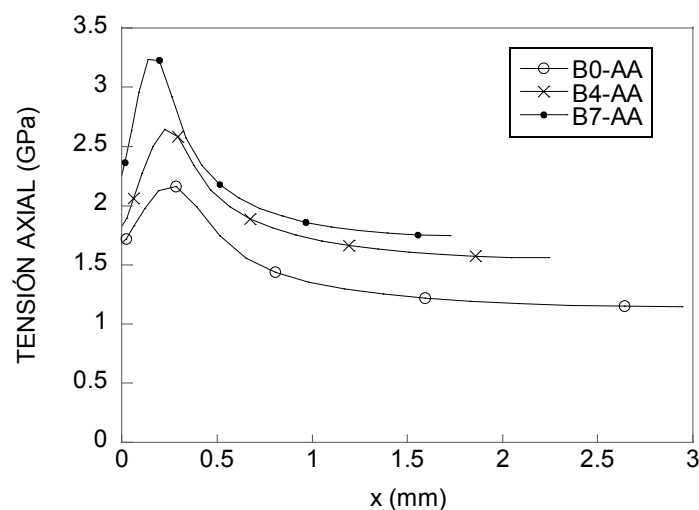


Fig. 5.24. Tensión axial ( $\sigma_L$ ) a lo largo de la sección neta de las probetas tipo PAA en el IRP.



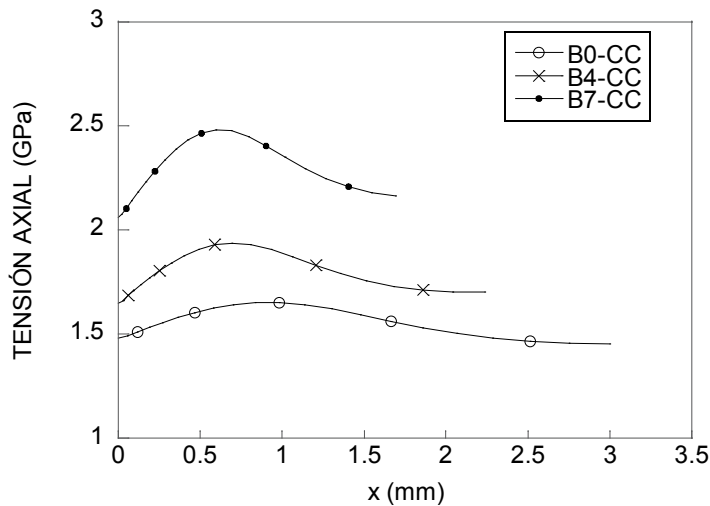


Fig. 5.25. Distribución de la tensión axial ( $\sigma_L$ ) a lo largo de la sección neta de las probetas tipo PCC en el ICM.

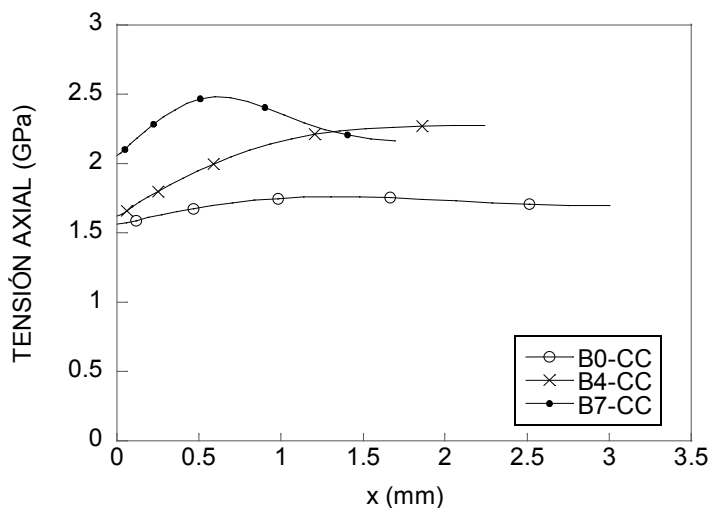


Fig. 5.26. Distribución de la tensión axial ( $\sigma_L$ ) a lo largo de la sección neta de las probetas tipo PCC en el IRP.

### 3.3.1. Factor de endurecimiento por la presencia de entallas

Para valorar el comportamiento mecánico de la probeta cuando en ella concurren la presencia de dos entallas se procede a analizar el *factor de endurecimiento por entalla* ( $\lambda_Y$ ) que se define como la relación existente entre la tensión neta correspondiente al límite elástico de la probeta entallada y la tensión asociada con el límite elástico propio del material  $\sigma_Y$  (siendo la tensión neta aquella que resulta de dividir la carga correspondiente entre la sección neta inicial de dicha probeta en el fondo de entalla). Este criterio establece que si  $\lambda_Y < 1$  existe un *ablandamiento* por la presencia de las entallas en el material, mientras que si  $\lambda_Y > 1$  experimenta un *endurecimiento* por efecto de las mismas.

La Fig. 5.27 muestra la evolución de  $\lambda_Y$  en función del grado de trefilado del material de las probetas que presentan entallado doble tipo AA y CC. A la vista de la gráfica de la Fig. 5.27 se observan varias circunstancias. Por una parte la evolución de  $\lambda_Y$  es diferente para las probetas PAA que para las probetas tipo PCC. En las probetas PCC existe un crecimiento de dicho factor aproximadamente lineal con el grado de trefilado, de modo que se parte del acero B0 en el que se presenta claramente un ablandamiento por presencia de las entallas para alcanzar en el acero B7 un endurecimiento por la presencia de las mismas. Sin embargo, para las probetas PAA se observa como las probetas mecanizadas a partir de acero B4 presentan un factor de ablandamiento mayor que para aquellas elaboradas a partir de acero B0, marcando una clara diferencia respecto a la linealidad observada en las probetas PCC. No obstante, independientemente del tipo de entalla, las probetas mecanizadas a partir de acero B7 experimentan un ligero endurecimiento prácticamente igual, lo que remarca el hecho de que en el séptimo paso de trefilado la forma geométrica de la entalla ha perdido representatividad cuando se evalúa el factor de endurecimiento por efecto de la entalla.

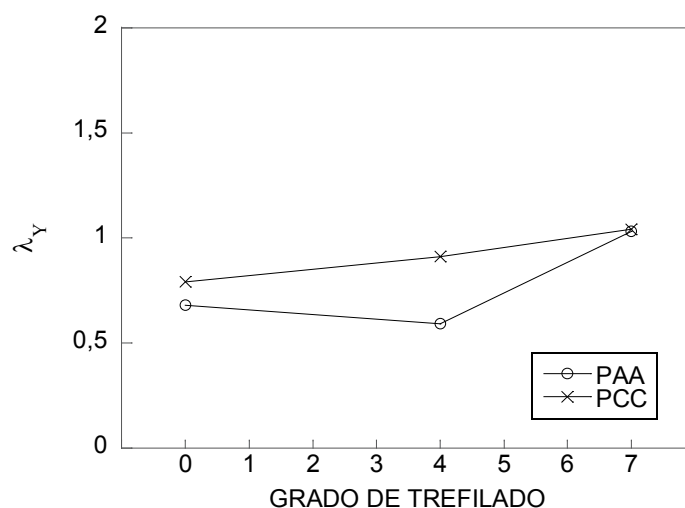


Fig. 5.27. Evolución del factor de endurecimiento ( $\lambda_Y$ ).

### 3.3.2. Factor de fortalecimiento por la presencia de entallas

Con el fin de establecer cuál es el comportamiento de la probeta en presencia de entallas de características diferentes se procede a analizar el parámetro denominado *factor de fortalecimiento por entalla*. El factor de fortalecimiento por la presencia de entalla o factor de inestabilidad,  $\lambda_{máx}$ , representa la relación existente entre la tensión neta máxima ( $\sigma_{Nmáx}$ ) aplicada sobre las probetas entalladas y la tensión máxima aplicada en las mismas probetas pero carentes de entalla ( $\sigma_R$ ), (siendo  $\sigma_{Nmáx}$  la relación entre la carga máxima aplicada sobre la probeta con entalla y la sección neta instantánea de la probeta medida en el fondo de

entalla). El criterio establece que si  $\lambda_{m\acute{a}x} < 1$ , la probeta experimenta un *debilitamiento* como consecuencia de la presencia de entallas. En el caso de que  $\lambda_{m\acute{a}x} > 1$  la probeta experimenta un *fortalecimiento* consecuencia de la presencia de las mismas.

Extendiendo el criterio para el caso de las probetas con presencia de dos entallas se puede establecer cómo evoluciona en función del grado de trefilado el factor de fortalecimiento. Así, en la Fig. 5.28, se representa la evolución de  $\lambda_{m\acute{a}x}$  con el grado de trefilado en las probetas PAA y PCC. En ella se puede apreciar como el comportamiento de las probetas es muy homogéneo, con independencia del tipo de acero a partir del cual se ha mecanizado así como del tipo de entalla que presenta, siendo el caso más llamativo el de la probeta mecanizada a partir de acero B4, en la que se muestra el mismo  $\lambda_{m\acute{a}x}$  para ambas entallas, lo que supone una clara diferencia respecto al factor de endurecimiento  $\lambda_Y$ , donde la misma probeta ostentaba la mayor dispersión de valores. En cualquier caso,  $\lambda_{m\acute{a}x}$  es, en todos los ensayos realizados, superior a la unidad, lo que indica un ligero fortalecimiento por efecto de la entalla.

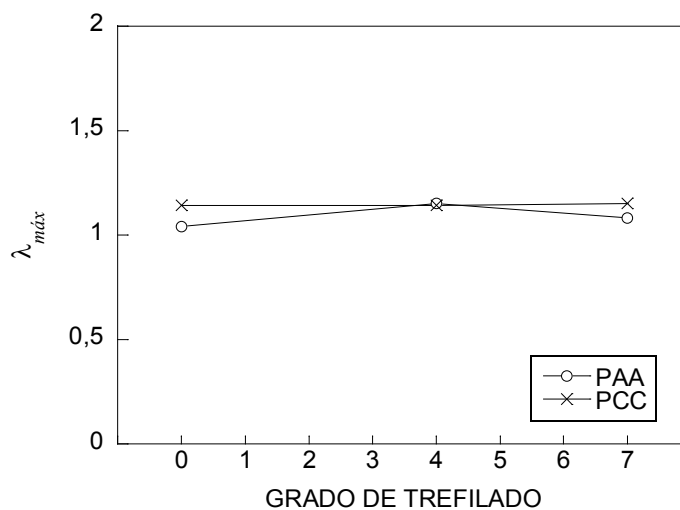


Fig. 5.28. Evolución del factor de fortalecimiento ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ).

### 3.3.3. Factor de concentración

La presencia de entallas y la geometría de las probetas condiciona el estado tensional en las probetas cuando son ensayadas bajo sollicitación de tracción, de modo que lejos queda la tensión axial que aparece en una probeta de sección circular cuando en ella se produce una sollicitación de tracción simple (estado de tensiones uniaxial y uniforme). El factor de concentración de tensiones ( $K_t$ ) establece la relación entre la tensión máxima axial ( $\sigma_{Lm\acute{a}x}$ ) que existe en la probeta como consecuencia de la presencia de entallas y la tensión media que se presenta ( $\sigma_{Lm}$ ).

Para establecer  $K_t$  se van a analizar aquellas secciones que presentan el comportamiento más acusado, durante dos momentos fundamentales del ensayo correspondiente, el ICM y el IRP que en las probetas tipo PAA coinciden.

En la Fig. 5.29 se presenta la distribución de tensiones axiales correspondientes a las zonas próximas al plano de entalla en el IRP. Las distribución de tensiones que se muestran son marcadamente diferentes de unos planos a otros, esta característica hace necesario realizar una exploración previa a fin de establecer cuál es la sección perpendicular al plano de entalla sobre la que trabajar. Con este fin, se analizan todos los fondos de entalla en busca de aquellas variables más significativas y que podrían tener una influencia directa sobre el estudio de la sección de rotura de las diferentes probetas. Con el fin de limitar la extensión de este capítulo se relegan las gráficas correspondientes al Anexo III, donde cualquier lector interesado tendrá acceso a ellas.

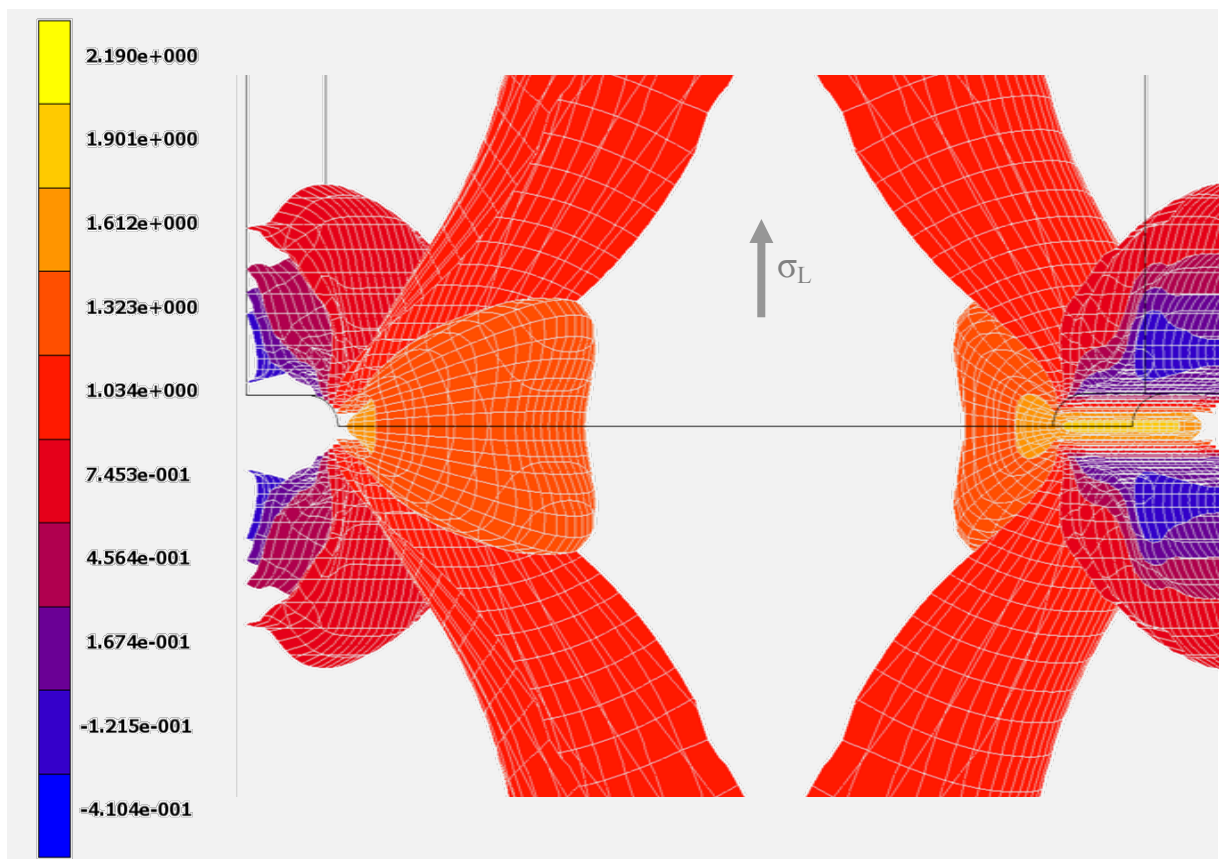
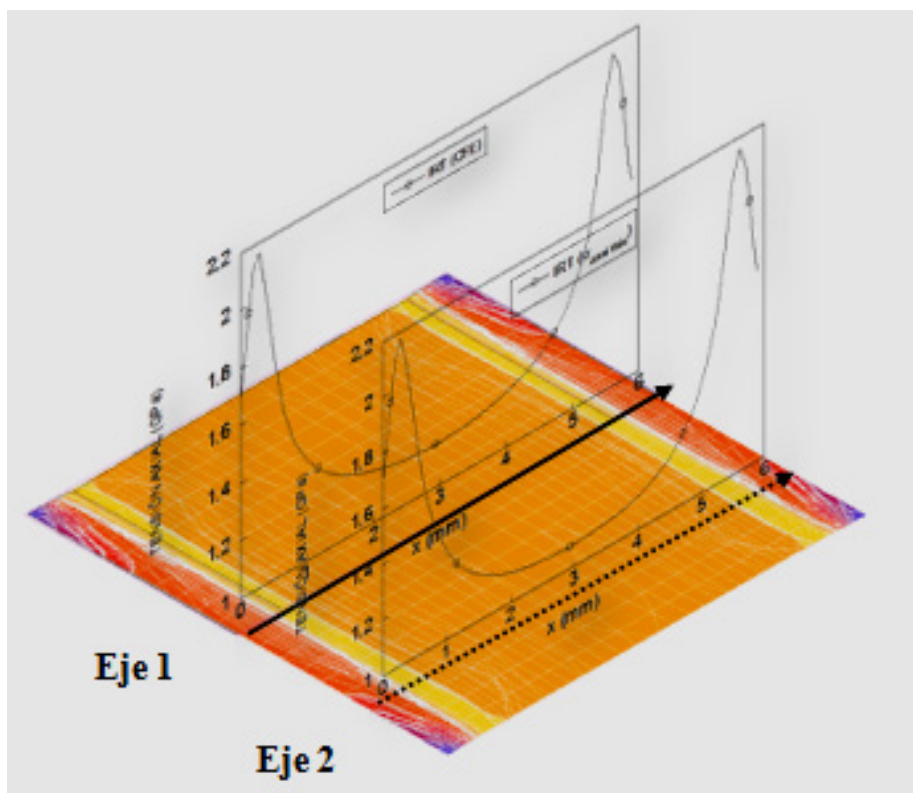


Fig. 5.29. Distribución de la tensión axial  $\sigma_L$  en la sección de entalla en el IRP (B0-AA).

Tras analizar todas las gráficas se concluye que existen ciertas diferencias en la forma física de las entallas que inducen, en algunas probetas, a realizar el análisis de varias secciones simultáneamente, puesto que las variables presentan un comportamiento diferencial a lo largo

del perfil del fondo de entalla. Un ejemplo de estas diferencias es observable en las probetas con entalla tipo AA (pequeño radio de curvatura, pequeña profundidad), en las cuales el máximo de la tensión equivalente de von Mises se da aproximadamente a 1/4 de los bordes exteriores de la probeta. Por ello se detallarán dos secciones (referentes a los *Ejes 1 y 2*), ambas perpendiculares al plano de entalla localizadas una, en el punto central del perfil del fondo de entalla, y otra en el punto en el que se percibe el valor máximo de la tensión equivalente de von Mises. Con el fin de dar claridad a lo anteriormente expuesto se representan en la Fig. 5.30 ambos ejes de análisis.

En el análisis de la tensión axial llevado a cabo, se comprobó que en todos los casos, el valor máximo de la tensión axial  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  tenía lugar en el punto central del perfil del fondo de entalla; excepto para la probeta B0-AA, donde  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  era coincidente con el valor máximo de la tensión equivalente de von Mises, y que por tanto se localiza aproximadamente a 1/4 del borde exterior de la probeta. Esto ha hecho necesario, para el caso de la probeta B0-AA, realizar un análisis comparado de ambas secciones.



*Eje 1: parte del punto central del fondo de entalla (FE)*

*Eje 2: parte del punto del fondo de entalla en que se presentan valores máximos de la tensión axial  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$*

Fig. 5.30. Ejes de análisis para la probeta B0-AA.

### 3.3.4. Factor de concentración de tensiones en la probeta tipo PAA

Las probetas entalladas tipo PAA presentan dos casos particulares: el caso individual de la probeta B0-AA y el análisis de las probetas B4-AA y B7-AA. Como se analizó en el capítulo IV la tensión equivalente de von Mises máxima se presenta desplazada a 1/4 del fondo de entalla para las probetas con entalla tipo AA. Aunque esta característica está presente cuando se analiza  $\sigma_L$  en la probeta B0-AA, no lo está las probetas B4-AA y B7-AA, donde la  $\sigma_{Lmáx}$  se localiza en el centro del perfil del fondo de entalla. Por ello se va a proceder a analizar  $K_t$  a lo largo de dos secciones en la probeta B0-AA y en una única sección en las dos probetas restantes. Se recuerda que en las probetas PAA el ICM coincide con el IRP, por lo que el estudio se limita a este último instante.

La distribución de  $\sigma_L$  en las tres probetas analizadas es en esencia la misma, con dos máximos situados en el material próximo a la entalla y una zona central en la que se observa una caída sustancial de la tensión.

En la Fig. 5.31 se representan las distribuciones de  $\sigma_L$  durante el IRP en las secciones definidas a lo largo del *Eje 1* (perpendicular al punto central del plano de entalla denominada FE) y del *Eje 2* (por el punto de máxima tensión axial) para las cuales se va a calcular el  $K_t$ . La distribución de tensión axial tiene un comportamiento ligeramente más acusado en la sección situada a 1/4 del borde exterior de la probeta, punto en el cual presenta su valor máximo. A pesar del máximo obtenido en esta sección, (localizado próximo a la entalla izquierda) la distribución de la tensión axial en este *Eje 2* presenta menor cuantía en la mayor parte de la zona central respecto que a la que discurre a lo largo del *Eje 1*, lo que motiva un incremento en el factor de concentración de tensiones, que pasa a ser de  $K_{t(FE)} = 1.56$  para el fondo de entalla a  $K_t(\sigma_{Lmáx}) = 1.61$  en la sección correspondiente al máximo de tensión axial longitudinal  $\sigma_L$ .

La evolución de  $\sigma_L$  en el FE (fondo de entalla) para la probeta B4-AA se representa en la Fig. 5.32. Es, en esta sección representada, en la que se procede a calcular el  $K_t$  respecto a  $\sigma_{Lmáx}$ , que para esta probeta en concreto se presenta en la entalla izquierda, obteniéndose un factor de concentración de tensiones de  $K_{t(FE)} = 1.45$ .

En la probeta B7-A se observa que el mayor valor de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  no se presenta desplazado del centro del fondo de entalla (como sucediese en la tensión equivalente de von Mises) de modo que, al igual que en la probeta B4-A se calcula el  $K_t$  en la sección neta central, cuya distribución de  $\sigma_L$  se presenta en la Fig. 5.33, y en la que  $K_{t(FE)} = 1.53$ .

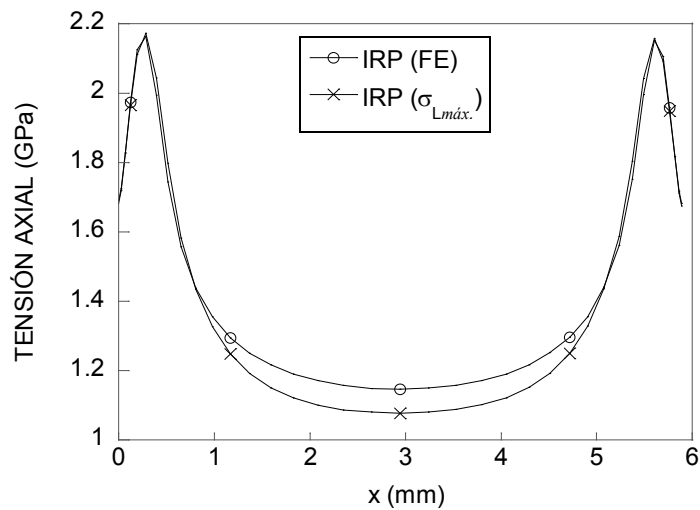


Fig. 5.31. Distribución de  $\sigma_L$  en las secciones del FE y  $\sigma_{Lmáx}$  en el IRP; probeta B0-AA.

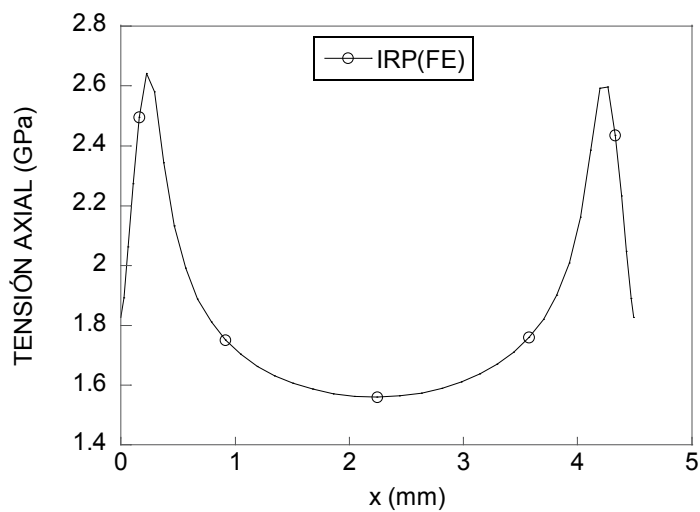


Fig. 5.32. Distribución de  $\sigma_L$  en la sección neta del FE en el IRP; probeta B4-AA.

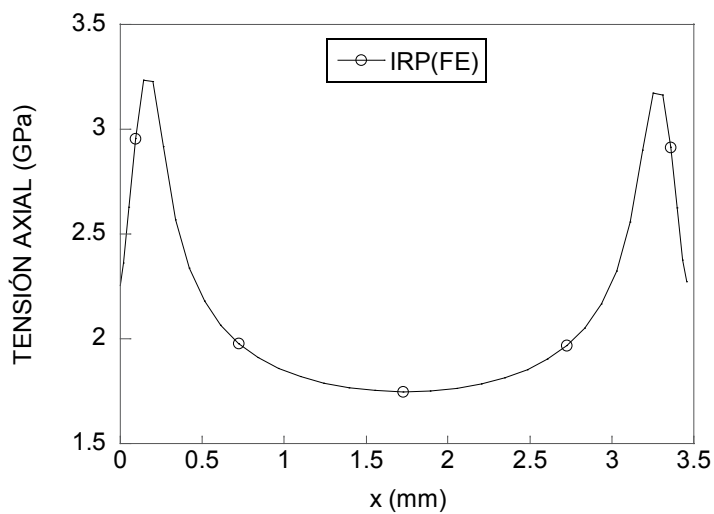


Fig. 5.33. Distribución de  $\sigma_L$  en la sección neta del FE en el IRP; probeta B7-AA.

### 3.3.5. Factor de concentración de tensiones en la probeta tipo CC

El cálculo de  $K_t$  en las probetas con entalla tipo C se va a referir a dos momentos fundamentales: el ICM y el IRP; que para el caso de la probeta B7-CC coinciden ( $ICM \equiv IRP$ ). En este caso no se ha hecho necesario realizar un estudio de dos secciones, como en el caso de la probeta B0-AA, puesto que en las probetas entalladas tipo PCC el valor máximo de la tensión axial se encuentra localizado en el fondo de entalla. Aunque ambas distribuciones (correspondientes al ICM y al IRP) muestran ciertas similitudes, es la correspondiente al ICM la que presenta más parecido con las encontradas en las probetas PAA, puesto que en ésta se aprecia una disminución mayor de  $\sigma_L$  en la sección central, no obstante, no tan extendida como las encontradas en aquellas.

En la Fig. 5.34 se presenta la distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  para la probeta B0-CC que está teniendo lugar en la sección perpendicular al plano de entalla por su punto medio durante los momentos correspondientes al ICM y al IRP. El factor de concentración de tensiones oscila entre un valor máximo  $K_{t(ICM)} = 1.07$  y un valor de  $K_{t(IRP)} = 1.03$ . Esto supone que a pesar de la sustancial diferencia que existe en la distribución de tensiones en ambos instantes, el factor de concentración de tensiones no difiere significativamente entre ambos.

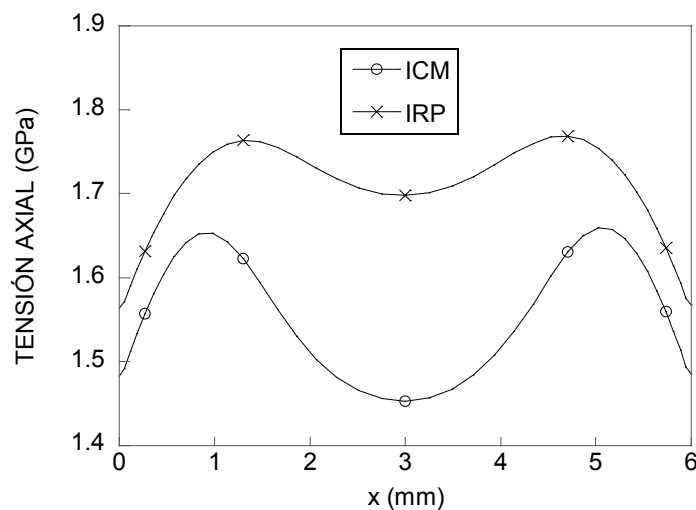


Fig. 5.34. Distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  a lo largo de la sección neta de la probeta B0-CC en el fondo de entalla durante los instantes ICM e IRP.

En la Fig. 5.35 se recoge la evolución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  (Eje Y) en el plano perpendicular a la sección de entalla de la probeta por su punto medio. Tras el estudio de ambos instantes de cálculo se observa un factor de concentración de tensiones que oscila entre



$K_{t(\text{ICM})} = 1.09$  y  $K_{t(\text{IRP})} = 1.08$ , lo que indica que a pesar de la diferencia existente entre ambas distribuciones de tensión axial el factor de concentración de tensiones es en esencia el mismo.

En la probeta B7-CC se observa que el ICM coincide con el IRP presentando una gráfica de comportamiento de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  que aparece reflejada en la Fig. 5.36. El valor máximo de la tensión axial se presenta en la entalla izquierda del material siendo  $K_t$  para la probeta B7-CC de  $K_{t(\text{IRP})} = 1.08$  lo que supone un valor igual al que se encontrara en las probetas B4-CC y un valor ligeramente superior al encontrado en la probeta B0-CC en el IRP.

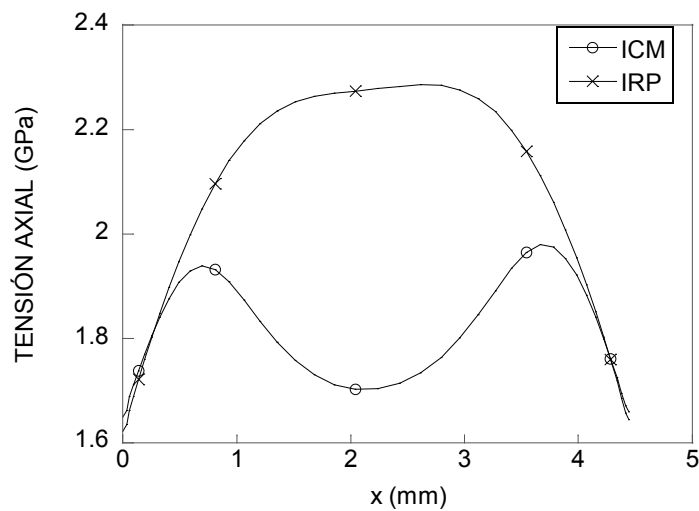


Fig. 5.35. Distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  a lo largo de la sección neta de la probeta B4-CC, en la sección FE en los ICM e IRP.

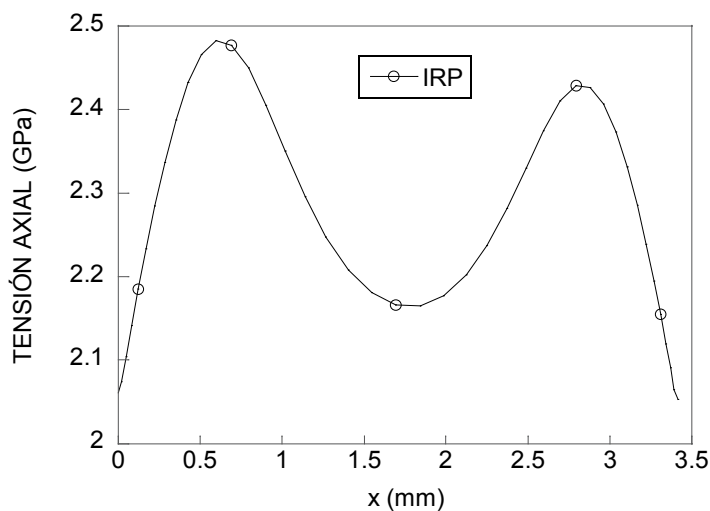


Fig. 5.36. Distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  a lo largo de la sección neta de la probeta B7-CC en el IRP.

### 3.3.6. Criterio de fractura

A lo largo del capítulo IV se analizaron las gráficas que representan la evolución de las siguientes variables internas: deformación plástica equivalente, tensión equivalente o efecriva de von Mises, y la triaxialidad tensional, dejando para el Anexo II aquellas correspondientes a la tensión hidrostática y desplazamiento que estaban teniendo lugar en los fondos de las entallas de las probetas. Las diferencias existentes en la forma física de las entallas ha condicionado en algunos casos el comportamiento de las diferentes variables, mientras que no ha sido significativo en la respuesta de otras. Esto ha sido especialmente relevante en las probetas prismáticas tipo PAA y PCC, ya que al tener mecanizadas dos entallas, las diferencias existentes entre ambas han provocado una respuesta diferente en la cuantía de sus correspondientes fondos de entallas. En la Tabla 5.2 se recoge la simbología empleada que se ha utilizado para indicar las diferencias encontradas entre los valores de las variables en el fondo de ambas entallas.

El análisis cuantitativo de estas variaciones se recoge la Tabla 5.3. En ella se resume el comportamiento de las diferentes variables en ambas fondos de entallas. Se presentan mediante el símbolo “-” aquellas magnitudes que se mantienen prácticamente iguales en las entallas izquierda y derecha, mientras que el número de asteriscos (\*) indica el nivel de influencia que ha tenido la diferencia entre entallas en la variable analizada (Tabla 5.2). Por ejemplo en la probeta B4-CC se observa cómo mientras la tensión equivalente de Von Mises no se ha visto afectada por la forma física de las entallas, en las demás variables si se ha manifestado la diferencia; siendo el desplazamiento de la entalla derecha la variable más voluble, (sustancialmente mayor que la que toma en la entalla izquierda). En esta misma tabla se recoge la variación en cuanto a la profundidad ( $\Delta C$ ) y de la distancia entre flancos de entalla ( $\Delta \xi$ ) que existe entre las dos entallas de cada probeta considerada.

Tabla 5.2. Simbología empleada para establecer la diferencia de variables entre ambos fondos de entalla para las probetas prismáticas tipo PAA y PCC.

Símbolo	Diferencia entre las variables en el fondo de entalla FE ( $\Delta$ )
-	$\Delta < 1\%$
*	$1\% \geq \Delta < 5\%$
**	$5\% \geq \Delta < 10\%$
***	$10\% \geq \Delta < 15\%$
****	$15\% \geq \Delta < 20\%$
*****	$20\% \geq \Delta \leq 25\%$

En la Tabla 5.3 se pone de manifiesto cómo la deformación plástica  $\varepsilon_p$  es una de las variables más sensibles a la forma física de las entallas ( $\Delta\varepsilon_p$ ), con independencia del tipo de entalla que presente y del acero base a partir del cual se haya mecanizado la probeta. Este hecho ha influido notablemente en la conducta de los desplazamientos ( $\Delta u$ ) debido a la relación directa establecida entre ambos. Sin embargo, cuando se analiza la variación de la tensión equivalente de von Mises en los fondos de entalla ( $\Delta\bar{\sigma}$ ) se ha observado que ésta permanece inalterada, de modo que presenta el mismo valor y la misma distribución para los dos tipos de entalla. Esto supone que el material redistribuye las tensiones, de modo que las máximas adquieren en los fondos de entalla el mismo valor, lo que indica que las probetas con presencia de dos entallas ligeramente diferentes van a presentar la misma distribución de tensiones equivalentes de von Mises, y que esta condición es independiente del tipo de acero que se esté estudiando y del tipo de entallado que presente, lo que en principio es válido para los rangos estudiados, y que indicaría la necesidad de establecer si esta característica se mantiene para diferencias mayores de las dimensiones de la forma física de las entalla.

Tabla 5.3. Diferencia de las variables principales entre fondos de entalla en el IRP.

Probeta	$\Delta C$	$\Delta \xi$	$\Delta \varepsilon_p$	$\Delta \bar{\sigma}$	$\Delta \sigma$	$\Delta t$	$\Delta u$
<b>B0-AA</b>	0.13%	5.1%	*	-	-	-	**
<b>B4-AA</b>	0.38%	11.8%	*	-	-	-	****
<b>B7-AA</b>	1.3%	14.4%	***	-	*	*	*
<b>B0-CC</b>	0.9%	0.3%	*	-	-	-	*****
<b>B4-CC</b>	5.6%	0.8%	**	-	*	*	*****
<b>B7-CC</b>	5.6%	0.5%	***	-	*	*	**

Aunque en principio la condición de estabilidad de la tensión se esperaría en la tensión hidrostática ( $\sigma$ ) al igual que sucediese en la tensión equivalente de von Mises, los análisis indican que la variación de la tensión hidrostática ( $\Delta\sigma$ ) entre ambas entallas de una misma probeta presenta un comportamiento diferente, que viene establecido ligeramente por la forma física de la entalla, donde a partir de diferencias de un 1.3% en la profundidad de entalla ( $\Delta C$ ) se observa una diferencia menor del 5% en la tensión hidrostática que experimentan ambos fondos de entalla. Sin embargo, las diferencias existentes entre las distancias en los flancos de entalla no han revelado una correlación directa con la  $\Delta\sigma$ .

La variación de la triaxialidad entre ambas entallas ( $\Delta t$ ), por definirse sobre la base de la relación directa que existe entre la tensión hidrostática y la tensión equivalente de von Mises,

presenta unos valores en consonancia con aquéllos, como queda claramente patente en la Tabla 5.3. Los valores de  $\Delta t$  son los mismos que los que presenta  $\Delta \sigma$ , ya que la tensión equivalente de von Mises muestra valores idénticos en ambas entallas.

En lo referente a la distribución de las variables principales a lo largo del perfil del fondo de entalla (Anexo III) se sigue que todas ellas presentan un comportamiento semejante al que se presentara en el fondo de entalla (en su punto central). Únicamente existe una ligera diferencia que se pone de manifiesto cuando éstas se observan en aquellos puntos próximos al borde de la probeta. Las variables que más acusan el efecto de borde son: la deformación plástica equivalente (y por ende los desplazamientos), y en menor medida la tensión hidrostática y la triaxialidad. La tensión equivalente de von Mises, por contra, es la variable que menos se ve afectada por el efecto de borde de la probeta; no obstante, en el caso de las probetas PCC el efecto de borde es más acusado que en las PAA.

Establecido el comportamiento prácticamente homogéneo de la tensión equivalente de von Mises a lo largo del perfil del fondo de entalla, y teniendo en cuenta que (como ya se comprobó en el capítulo IV) las tensiones equivalentes de von Mises presentan un valor máximo tanto en las PAA como en las PCC en el fondo de entalla, se analizan las tensiones equivalentes de von Mises a lo largo del perfil que dan lugar a la rotura de la probeta. Los datos obtenidos se representan en la Tabla 5.4 y es necesario recordar que el máximo de la tensión equivalente de von mises se encuentra en una posición diferente según sea el tipo de entalla que se presente en la probeta. Para las probetas con entalla tipo AA el máximo se encuentra aproximadamente entre 1/3 y 1/4 del borde exterior de la probeta. Para las probetas con entalla tipo CC, sin embargo, el máximo se encuentra en el punto central de la entalla, situándose en ambos en el fondo de entalla.

Tabla 5.4. Tensión equivalente de von Mises: valores máximos ( $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ ), mínimos ( $\bar{\sigma}_{min}$ ) y medios ( $\bar{\sigma}_{med}$ ) en el instante de rotura de la probeta (IRP).

Probeta	$\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ (GPa)	$\bar{\sigma}_{min}$ (GPa)	$\bar{\sigma}_{med}$ (GPa)	Entalla
B0-AA	1.43	1.35	1.41	Izquierda
B0-CC	1.46	1.38	1.44	Derecha
B4-AA	1.53	1.50	1.52	Izquierda
B4-CC	1.54	1.52	1.53	Derecha
B7-AA	1.87	1.86	1.87	Izquierda
B7-CC	1.86	1.86	1.86	Izquierda

Tras el establecimiento de los valores máximos, mínimos y medios de la tensión equivalente o efectiva de von Mises ( $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ ,  $\bar{\sigma}_{m\acute{i}n}$  y  $\bar{\sigma}_{med}$  respectivamente) a lo largo del perfil del fondo de entalla, se observa cómo la tensión equivalente de von Mises presenta un valor determinado en el cual se produce la rotura que es función del material sobre el que se ha mecanizado la entalla, e independiente de la entalla que tiene éste mecanizada, siendo para las probetas realizadas a partir de acero B0 de 1.4 GPa, de 1.5 GPa para las probetas de B4 y de 1.8 GPa para las probetas mecanizadas a partir de acero B7, tal y como se infiere de los datos reflejados en la Tabla 5.4.

### 3.4. Análisis del comportamiento en función del grado de trefilado de las principales variables internas en las probetas tipo PA

En este punto se presenta la evolución de las principales variables internas en el instante previo a la rotura de las probetas a lo largo del canto neto (eje Y) desde el fondo de entalla (punto medio) hasta alcanzar el lado opuesto de la probeta (cara superior). En la Fig. 2.24 de la presente Tesis se indica que el canto neto es de un valor  $W-C$ , siendo  $W$  el canto de la probeta y  $C$  la profundidad de entalla. En las siguientes gráficas (Figs. 4.37 a 4.40) se mostrará la distribución de las variables a lo largo del canto neto  $x$  (con  $x_{m\acute{a}x} = W-C$ ; y con  $x_{m\acute{i}n} = 0$  en el fondo de entalla).

La distribución de la deformación plástica equivalente ( $\bar{\epsilon}_p$ ) es bastante similar para las probetas PA (Fig. 5.37). En los tres casos la mayor  $\bar{\epsilon}_p$  se localiza en la propia entalla ( $x = 0$ ), los valores máximos se encuentran muy próximos en las probetas B0-A y B4-A, siendo superior para la B0-A; la probeta B7-A muestra una disminución sustancial en la deformación plástica equivalente de aproximadamente el 45% respecto a la probeta B0-A. Cuando el punto de análisis se desvía de la entalla ( $x > 0$ ) se observa una disminución progresiva de  $\bar{\epsilon}_p$  hasta la mitad del canto neto para luego aumentar ligeramente hasta llegar al extremo superior de la sección ( $x = W-C$ ).

El carácter general de la geometría de la distribución de la tensión equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ ) es semejante en los diferentes aceros, en todos ellos se observa una disminución sustancial de  $\bar{\sigma}$  en el punto medio de la sección de la entalla, como se puede observar en la gráfica de la Fig. 5.38. Sin embargo, las cuantías son bastantes diferentes de unas probetas a otras. En la probeta B0-A (Fig. 5.38) a partir del punto medio de la entalla ( $x = 0$ ) y hasta llegar a la zona central de la probeta [ $x = (W-C)/2$ ], se produce un descenso del valor de  $\bar{\sigma}$  que se manifiesta como una pendiente progresivamente decreciente, muy acusada en la zona próxima a la entalla, pero que se va suavizando hasta alcanzar la zona central de la sección neta, donde vuelve a experimentar una fuerte caída. A partir de esta zona central la probeta

experimenta un incremento progresivo de la tensión equivalente o efectiva de von Mises hasta alcanzar el borde superior de la probeta ( $x = W-C$ ), mostrando de esta manera una distribución cuasi simétrica.

La probeta B4-A, por el contrario, presenta un comportamiento muy homogéneo a lo largo de la sección, salvo por el pico de descenso abrupto que se localiza en la zona central. La tensión equivalente de von Mises máxima es similar en el fondo de entalla y el extremo superior de la probeta (alrededor de 1.5 GPa) y común con la observada en la probeta B0-A.

La distribución de  $\bar{\sigma}$  en la probeta B7-A es manifiestamente más acusada que en las probetas mecanizadas a partir de grados de trefilado menores (probetas B0-A y B4-A). La tensión en la zona central de la entalla ( $x = 0$ ) es aproximadamente 1.8 GPa, a partir de este punto sufre un ligero amortiguamiento que se acentúa a partir del medio milímetro del centro de entalla ( $x=0.5$  mm), alcanzando el menor valor de  $\bar{\sigma}$  de todas las probetas analizadas. A partir de la zona central experimenta un ligero incremento hasta alcanzar el borde superior de la probeta ( $x = W-C$ ) donde se observa que prácticamente adopta el mismo valor que muestra en el fondo de entalla ( $x = 0$ ).

La geometría de la distribución de la tensión hidrostática ( $\sigma$ ) es muy similar en las tres probetas B0-A, B4-A y B7-A, como se puede verificar en la imagen de la Fig. 5.39; en ella se observa cómo el valor de la tensión hidrostática parte de un valor cercano a 1 GPa en el fondo de la entalla ( $x = 0$ ), común para las tres probetas, para sufrir un aumento sustancial hasta alcanzar el valor máximo. Éste tiene diferente cuantía y distinta localización en función del acero de procedencia, así para la probeta B7-A es de  $\sigma = 2$  GPa y se sitúan en  $x = 0.5$  mm; para la probeta B4-A es de  $\sigma = 1.6$  GPa en  $x = 0.8$  mm y para la probeta B0-A es de  $\sigma = 1.3$  GPa en  $x = 1$  mm. Esto refiere que el valor máximo de la tensión hidrostática aumenta con el grado de trefilado y se sitúa muy cerca del fondo de entalla. Una vez que se alcanza el valor máximo éste desciende rápidamente hasta alcanzar un máximo de tensión hidrostática pero de carácter compresivo, próximo en las tres probetas a  $-0.5$  GPa, tras observarse éste, la tensión se relaja paulatinamente hasta llegar al extremo superior de la probeta ( $x_{\text{máx}} = W-C$ ).

La distribución de la triaxialidad tensional ( $t$ ) es muy similar a la de la tensión hidrostática, como queda patente en la Fig. 5.40. El valor máximo de triaxialidad se encuentra a una distancia de entre medio milímetro y un milímetro del fondo de entalla para las tres probetas. En cuanto al valor máximo de triaxialidad se observa curiosamente que en los tres casos es muy parecido, siendo muy próximo a la unidad ( $t \approx 1$ ); no obstante, aunque con pequeña diferencia respecto de la probeta B7-A, el valor máximo de triaxialidad se presenta en la probeta B4-A.

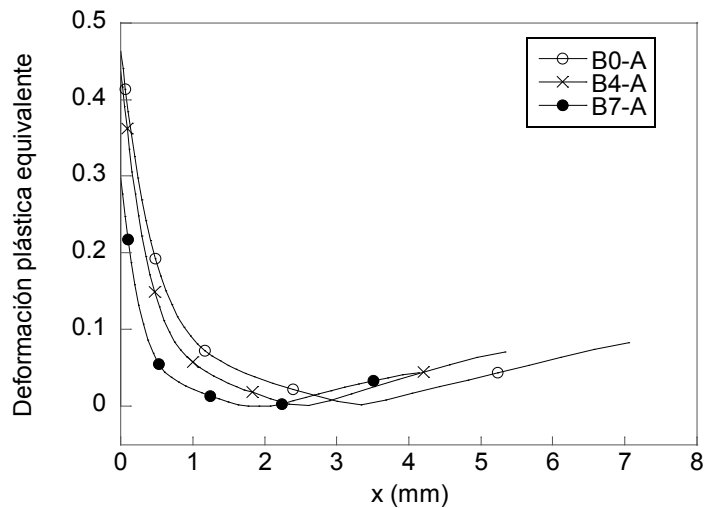


Fig. 5.37. Deformación plástica equivalente vs profundidad en la probeta.

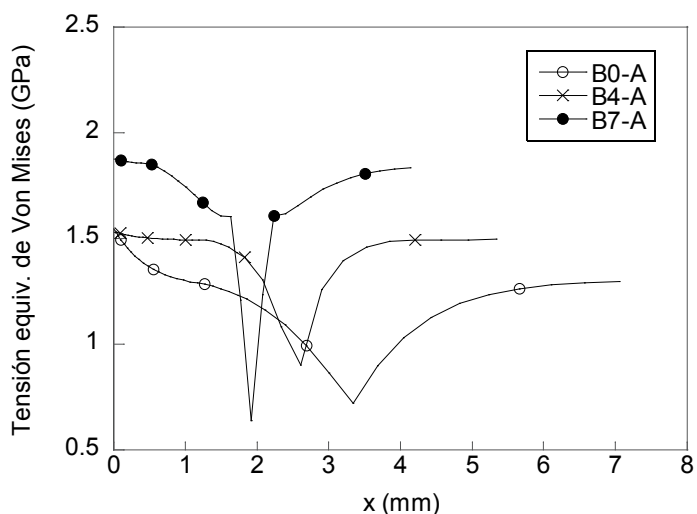


Fig. 5.38. Tensión equivalente de von Mises vs profundidad en la probeta.

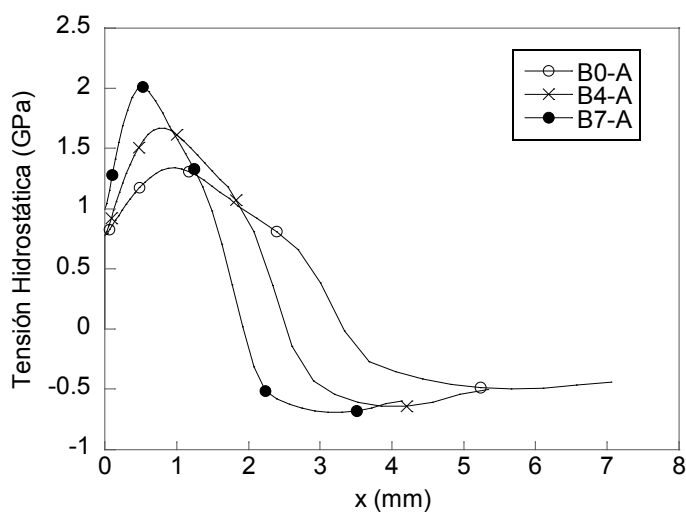


Fig. 5.39. Tensión hidrostática ( $\sigma$ ) vs profundidad en la probeta.

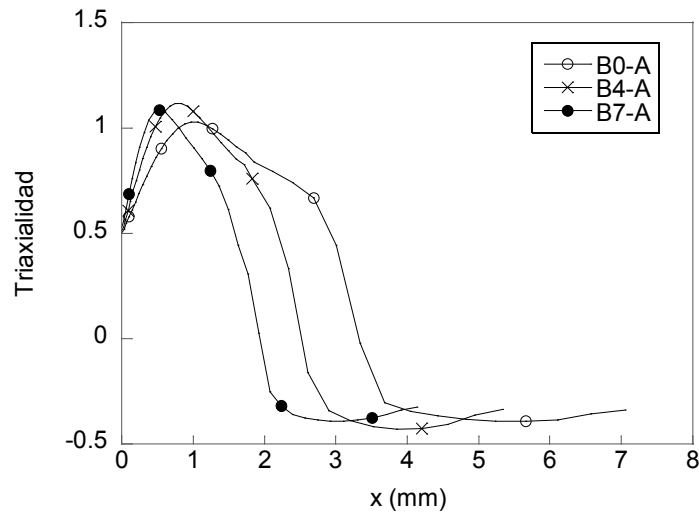


Fig. 5.40. Triaxialidad vs profundidad en la probeta.

### 3.5. Análisis del comportamiento en función del grado de trefilado de las principales variables internas en las probetas tipo PC

La evolución de deformación plástica total equivalente ( $\bar{\epsilon}_p$ ) a lo largo de la sección de la probeta es semejante para los tres aceros analizados (Fig. 5.41). Al igual que sucedió en las probetas PA, las probetas tipo PC presentan un máximo que se localiza en el fondo de entalla ( $x = 0$ ). A medida que se analizan los puntos más alejados de ésta ( $x > 0$ ) la deformación plástica presenta un disminución progresiva hasta alcanzar aproximadamente la mitad de la sección [ $x = (W-C)/2$ ], punto en el cual  $\bar{\epsilon}_p$  alcanza su valor mínimo, siendo próximo a cero. Para localizaciones de  $x$  superiores a la mitad de la sección [ $x > (W-C)/2$ ] la deformación plástica vuelve a aumentar, hasta alcanzar en el borde exterior de la probeta ( $x = W-C$ ) valores cercanos a los que se hallaban en el fondo de entalla. A diferencia de lo que sucediese en las probetas con entalla tipo A, los mayores valores de  $\bar{\epsilon}_p$  se presentan para las probetas B4-C seguidas por la probeta B0-C y B7-C.

Como se ha venido observando la  $\bar{\epsilon}_p$  es para la probeta B0-C, en el fondo de entalla, mayor que la experimentada por la probeta B4-C, siendo prácticamente todos los valores del resto de los puntos de la sección menores que los que se alcanzan en la probeta B4-C, en el instante previo a la rotura del material.

En cuanto a la tensión equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ ) se observa un comportamiento similar al encontrado en el caso de las probetas B0-A, B4-A y B7-A. Las tensiones existentes en las tres probetas tipo PC son máximas en el fondo de entalla ( $x = 0$ ), aunque no significativamente superiores a aquellas halladas en la periferia superior de la misma ( $x = W-C$ ) como se puede ver en la imagen de la Fig. 5.42. En el transcurso a través de la sección la tensión  $\bar{\sigma}$



experimenta una disminución ligera hasta llegar a aquellos puntos situados en la zona central [ $x \approx (W-C)/2$ ], donde se acentúa el descenso con una caída significativa, siendo del 21% para el acero B7, del 10% para el acero B4 y del 40% para el acero B0. Una vez superada la zona central el material experimenta un incremento progresivo de  $\bar{\sigma}$  que le lleva a alcanzar en el extremo superior de la probeta valores muy próximos a los encontrados en el fondo de entalla. En su conjunto, sin tener en cuenta el valor en la zona central, el comportamiento de la tensión  $\bar{\sigma}$  es más homogéneo a lo largo de la sección para las probetas B7 y B4 mientras que para en la probeta B0 se experimenta una relajación tensional progresiva desde los dos focos de concentración de tensión hacia la zona central de la probeta.

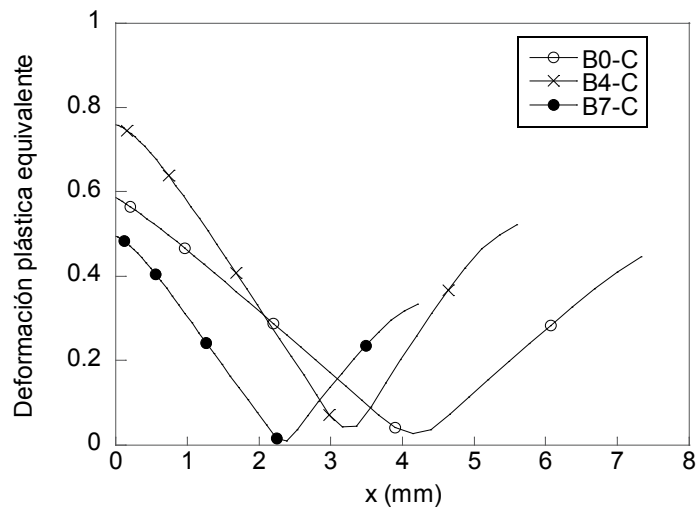


Fig. 5.41. Deformación plástica equivalente vs profundidad en la probeta.

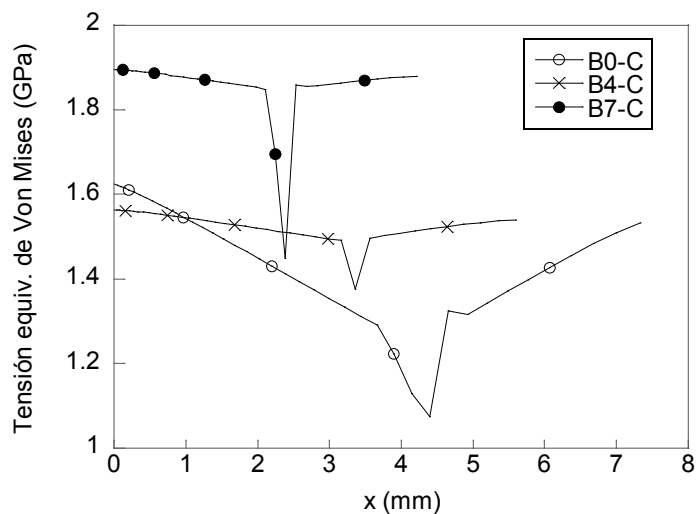


Fig. 5.42. Tensión equivalente de von Mises vs profundidad en la probeta.

La distribución de la tensión hidrostática ( $\sigma$ ) es en esencia la misma para las probetas B0-C, B4-C y B7-C, en las tres se presenta la misma cuantía (0.5 GPa) en el fondo de entalla y en el instante previo a la rotura del material (Fig. 5.43). Este valor aumentan progresivamente hasta alcanzar un máximo que se presenta en la zona central de cada probeta [ $x = (W-C)/2$ ]. La cuantía de  $\sigma$  es significativamente diferente de unas probetas a otras, en el caso de la probeta B7-C el máximo es un 250% mayor que en el valor que se presenta en el fondo de entalla; en el caso de la probeta B4-C es el doble y en la probeta B0-C es muy similar al encontrado en el fondo de entalla. Establecido el valor máximo de  $\sigma$ , la curva experimenta un cambio abrupto pasando en menos de 1 mm a un estado compresivo en el que se encuentran valores máximos que oscilan de  $-1$  GPa para la probeta B7-C a  $-0.5$  GPa para la probeta B0-C. Una vez superado el punto central la tensión hidrostática presenta un descenso hasta alcanzar el borde superior de la probeta ( $x = W-C$ ).

La distribución de la triaxialidad tensional (Fig. 5.44) presenta un patrón muy similar al encontrado en la tensión hidrostática. No obstante, a diferencia de lo que sucede en la tensión hidrostática, el valor máximo de la triaxialidad se da en la probeta B4-C; característica ésta que ya se pudo observar en el caso de las probetas PA, donde es la probeta B4-A la que presenta el índice más alto de triaxialidad, no siendo en aquel caso tan acusado como el que se está observando en la probeta B4-C. El máximo factor de triaxialidad se sitúa, en las tres probetas (B0-C, B4-C y B7-C), en la zona central de las mismas. Una vez superado dicho valor la triaxialidad se invierte y alcanza en menos de 1 mm una cuantía semejante al máximo pero con carácter negativo. A medida que el punto de vista se aproxima al borde exterior de la probeta el factor de triaxialidad experimenta una relajación progresiva.

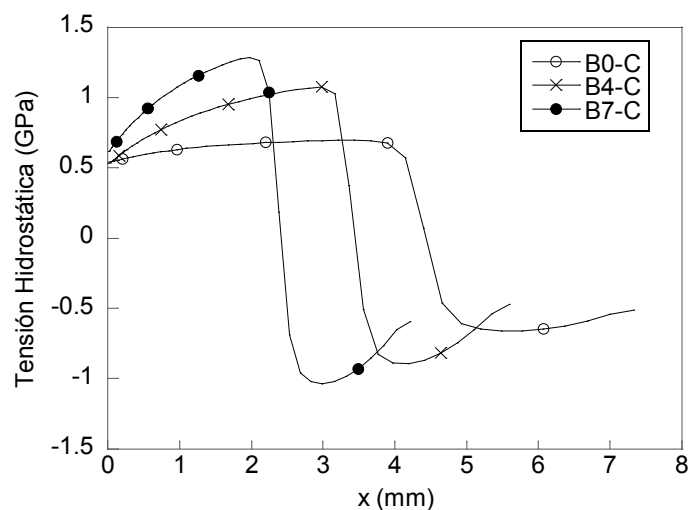


Fig. 5.43. Tensión hidrostática ( $\sigma$ ) vs profundidad en la probeta.

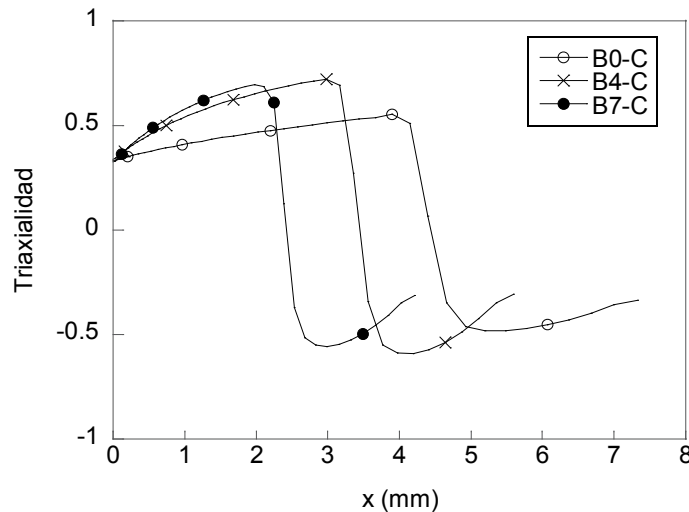


Fig. 5.44. Triaxialidad vs profundidad en la probeta.

### 3.6. Estudio global de las probetas entalladas tipo PA y PC

Como sucediese en las probetas PAA, el análisis de las tensiones axiales se ha de llevar a cabo a partir de un análisis tridimensional previo de la distribución de tensiones que se encuentran en la sección de rotura de la probeta. Con el fin de evitar ser repetitivo, se presenta únicamente la distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  (que para las probetas solicitadas a flexión se corresponde con la tensión axial  $\sigma_X$ ) en el fondo de entalla de la probeta B0-A (Fig. 5.45), puesto que las características del resto son semejantes.

La distribución de  $\sigma_L$  a lo largo de la sección de rotura de la probeta es compleja; con un valor máximo localizado en el punto central del fondo entalla; por tanto ya no se establece como en el caso axisimétrico una distribución homogénea de  $\sigma_L$  a lo largo del perímetro de la entalla. La distribución de iso-superficies muestra cómo la tensión  $\sigma_{Lmax}$  se dispone en el entorno de la entalla en forma de núcleo, abriéndose paulatinamente a medida que se aleja del punto central del fondo de entalla. Este núcleo difiere bastante de la forma esférica, y claramente manifiesta un cambio de curvatura cuando se aproxima a los bordes exteriores de la probeta, esto es consecuencia de la variación de la tensión que está teniendo lugar en el borde exterior, en el que se aprecia una caída de la tensión axial  $\sigma_L$ . A medida que el punto de vista se aleja del perfil del fondo de entalla y se aproxima a la zona central de la probeta, las superficies de tensión constante adquieren una distribución plana para luego volverse a curvar al llegar al extremo superior de la probeta donde se observa una inversión del valor de la tensión  $\sigma_L$  como manifestación del estado compresivo que está teniendo lugar.

Este estudio, a diferencia del que se presentase para las probetas solicitadas a tracción, es más simple, puesto que los valores máximos de  $\sigma_L$  se van a situar en aquella sección perpen-

dicular al fondo de entalla que pasa por su punto medio. Esta circunstancia, unida al hecho de que los valores máximos de tensión axial van a tener lugar en el IRP, hace que se produzca una simplificación notable del análisis, tanto para las probetas PA como para las PC, esto permite representar en la misma gráfica las tres probetas objeto de análisis.

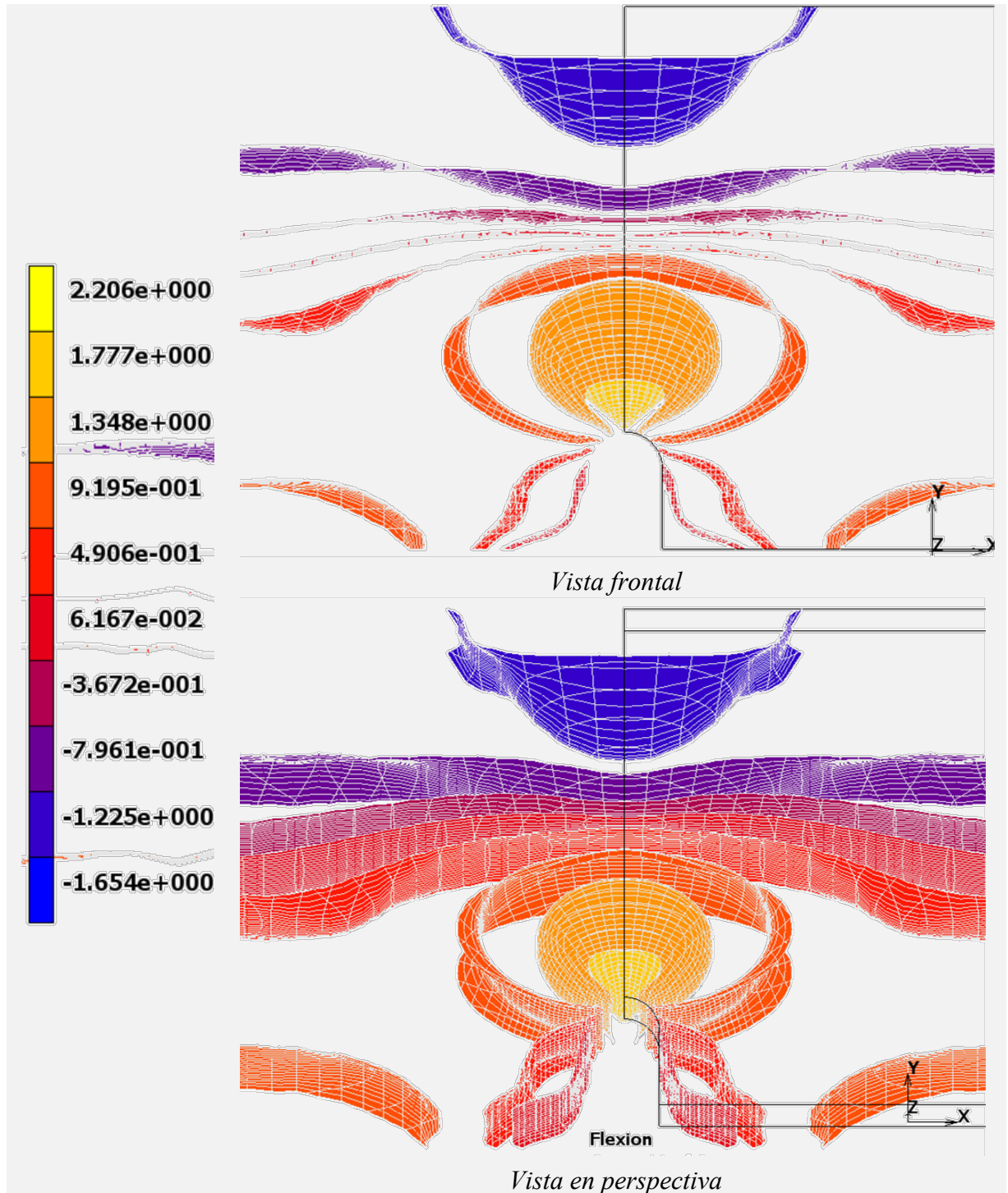


Fig. 5.45. Distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$  (eje longitudinal X, coincidente con el eje longitudinal del alambre de acero matriz): sección de entalla en el IRP; B0-A.

### 3.6.1. Factor de concentración

Con el fin de establecer la evolución de las tensiones axiales en el plano de entalla de las probetas solicitadas a flexión, se va a extender el criterio del factor de concentración de tensiones para las probetas entalladas tipo PA y PC. Para ello se considera únicamente el valor absoluto de la tensión axial, de modo que las tensiones compresivas situadas en la mitad superior de la sección de la probeta adquieren un efecto similar al que se pudiese derivar de una entalla superior.

### 3.6.2. Factor de concentración de tensiones en la probeta entallada PA

En la gráfica de la Fig. 5.46 se presenta la evolución de la tensión axial longitudinal en los diferentes tipos de aceros, en la sección de entalla, durante el instante previo a la rotura del material de las probetas B0-A, B4-A y B7-A. La geometría de la distribución indica que la mitad inferior de la probeta está solicitada a tracción mientras que la parte superior lo está a compresión. Los valores máximos de tensión en la mitad inferior oscilan entre los 2 GPa para la probeta B0-A y los 3.2 GPa para la B7-A. Los valores más elevados de tensión en la zona inferior son ligeramente menores (en valor absoluto) que los obtenidos en la mitad superior, si bien se puede apreciar que la concentración es más extensa en la mitad inferior, con una distribución cuasi-constante para los tres casos a nivel del máximo (compresivo).

Tras realizar la corrección en el valor absoluto de los valores de la tensión, se concluye que:  $K_{t(FE)} = 1.58$  con  $\sigma_{Lm} = 1.39$  GPa, para el caso de la probeta B0-A;  $K_{t(FE)} = 1.53$  con  $\sigma_{Lm} = 1.74$  GPa en la probeta B4-A; y por último  $K_{t(FE)} = 1.62$  con una tensión media  $\sigma_{Lm} = 2.0$  GPa, para la probeta B7-A.

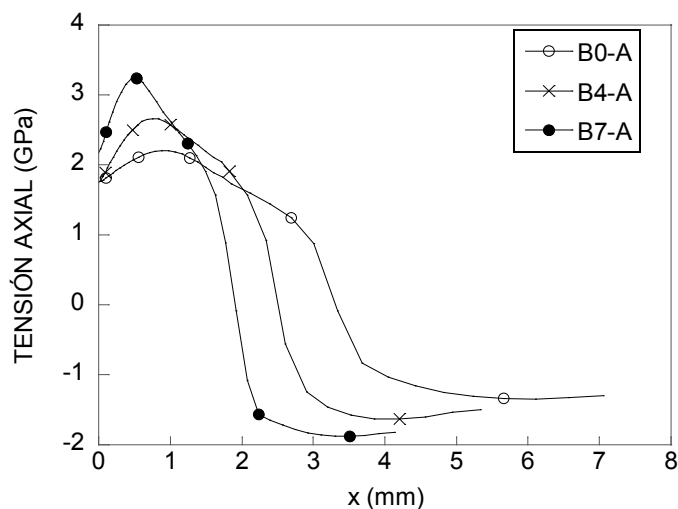


Fig. 5.46. Distribución de la tensión axial longitudinal  $\sigma_L$ . Probetas B0-A, B4-A y B7-A.

### 3.6.3. Factor de concentración de tensiones en la probeta entallada PC

Las distribuciones correspondientes a la tensión axial de las probetas PC, durante el IRP, se presentan en la Fig. 5.47, siendo el eje de análisis el definido a lo largo de la sección perpendicular al plano de entalla trazado por su punto central.

A pesar de que las geometrías de la distribución de la tensión axial muestran elementos comunes con las probetas PA, se pueden reseñar ciertas diferencias como es la extensión del campo tensional. En las probetas tipo PC la zona de tracción se desarrolla a lo largo de una superficie más extensa, superando la mitad de la probeta; si bien el estado tensional es más bajo que en aquellas.

Los valores de las tensiones máximas de tracción y compresión son muy semejantes y la distribución de las mismas muy homogénea a lo largo de sus secciones respectivas, observándose una distribución cuasi-constante más representativa de los aceros de más bajo grado de trefilado, siendo para el B7, aquel en el que la pendiente adquiere un carácter más acusado en la zona de tracción. Los valores máximos oscilan entre los 2.5 GPa para el acero B7 y 1.6 GPa para la probeta B0-C, siendo estos más bajos que los obtenidos en las probetas con entalla tipo PC.

Analizando en factor de concentración de tensiones, teniendo en cuenta el criterio previamente adoptado, se obtiene lo siguiente:  $K_{t(FE)} = 1.09$  con  $\sigma_N = 1.53$  GPa, para la probeta B0-C;  $K_{t(FE)} = 1.14$  con  $\sigma_{Lm} = 1.81$  GPa, para el acero B4; y por último  $K_{t(FE)} = 1.17$  con  $\sigma_{Lm} = 2.15$  GPa para el acero B7.

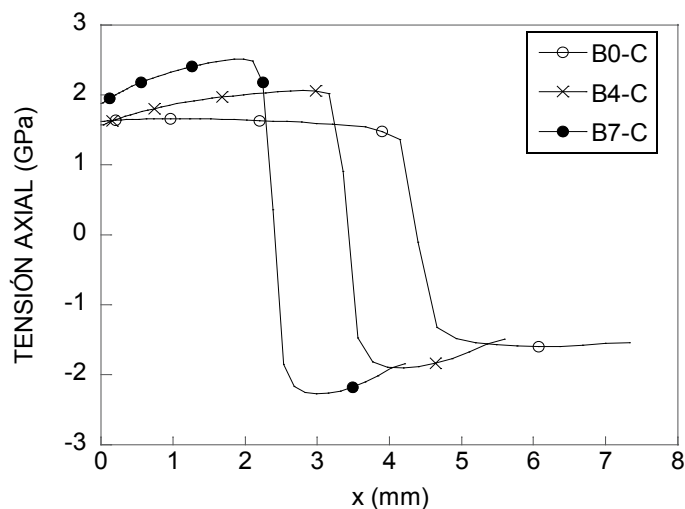


Fig. 5.47. Distribución de la tensión axial a lo largo de la sección neta de la probeta B0-C.

### 3.6.4. Criterio de fractura

El comportamiento de la tensión equivalente de von Mises, a lo largo del perfil del fondo de entalla, se presenta en la Tabla 5.5. En ella se recogen las tensiones máximas, mínimas y medias ( $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ ,  $\bar{\sigma}_{min}$  y  $\bar{\sigma}_{med}$  respectivamente) que se presentan en el IRP de las probetas ensayadas a sollicitación de flexión.

Las variaciones en la cuantía son poco significativas mostrándose en todas ellas el valor máximo de la tensión equivalente de von Mises,  $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ , en el punto central del borde de entalla y el valor mínimo,  $\bar{\sigma}_{min}$ , en el borde de la entalla. La tensión equivalente media,  $\bar{\sigma}_{med}$ , se corresponde con el valor ficticio medio calculado a lo largo de la sección. Las probetas mecanizadas a partir de B0 son las que manifiestan una variación mayor del valor de la tensión a lo largo del perfil del fondo de entalla seguidas por las obtenidas a partir de B4 y B7. En función de la forma física de la entalla se puede apreciar como son las probetas tipo PA las que presentan más irregularidad a lo largo del perfil del fondo de entalla, siendo para las tipo PC prácticamente constante.

Concurre la circunstancia de que las probetas mecanizadas a partir de los aceros B0 y B4 presentan un comportamiento anómalo respecto la tensión equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ ) como ya se observará anteriormente (Fig. 5.38 y Fig. 5.42), y es que  $\bar{\sigma}$  en el perfil de fondo de entalla es mayor para la probetas mecanizadas a partir de B0 que de B4, siendo más acusado este fenómeno en las probetas PC que en las probetas PA. Este hecho hace complicado establecer un criterio de fractura a partir de la tensión equivalente de von Mises puesto que sólo es para el acero B7 donde se mantiene una tensión prácticamente común para ambos casos. Este comportamiento bien podría ser extrapolable para el B4 pero sería poco preciso en el caso del acero B0.

Tabla 5.5. Tensión equivalente de von Mises en el instante previo a la rotura de material.

Probeta	$\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ (GPa)	$\bar{\sigma}_{min}$ (GPa)	$\bar{\sigma}_{med}$ (GPa)
<b>B0-A</b>	<b>1.54</b>	<b>1.40</b>	<b>1.50</b>
<b>B0-C</b>	<b>1.62</b>	<b>1.58</b>	<b>1.61</b>
<b>B4-A</b>	<b>1.53</b>	<b>1.50</b>	<b>1.52</b>
<b>B4-C</b>	<b>1.56</b>	<b>1.55</b>	<b>1.56</b>
<b>B7-A</b>	<b>1.88</b>	<b>1.86</b>	<b>1.87</b>
<b>B7-C</b>	<b>1.90</b>	<b>1.89</b>	<b>1.89</b>

### 3.7. Criterio de fractura general

Con el fin de establecer un comportamiento general de los diferentes materiales (B0, B4, y B7) cuando en ellos se producen solicitaciones de tracción y de flexión por cuatro puntos se procede a realizar el estudio conjunto de todos los ensayos realizados. El criterio de fractura trata, por tanto, de establecer los valores críticos de tensiones que puede soportar el material y cuya superación haría que se detonara en ellos el proceso de fractura. El criterio de fractura buscado se va a enfocar desde el punto de vista de la tensión equivalente de von Mises ( $\bar{\sigma}$ ) y respecto la tensión axial o longitudinal  $\sigma_L$ .

#### 3.7.1. Criterio de fractura respecto la tensión equivalente de von Mises

Comparando los datos obtenidos a partir de los ensayos derivados de tracción y de flexión para los tres aceros B0, B4 y B7, se aprecia un comportamiento diferenciado en función del grado de trefilado (Fig. 5.48).

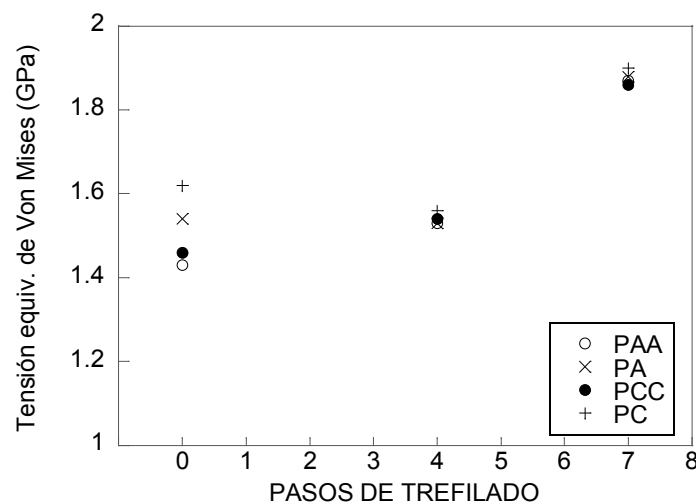


Fig. 5.48. Valores máximos de la tensión equivalente de von Mises,  $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ , en el punto central del fondo de entalla y en función del grado de trefilado.

Para el caso del B7 se puede establecer una tensión equivalente de von Mises máxima a partir de la cual se produce la rotura del material; situándose ésta muy próxima a 1.9 GPa, independientemente del ensayo en que se vea involucrada y de la entalla que tenga mecanizada la probeta. Esta conducta es extensible para el acero B4, en el que la tensión  $\bar{\sigma}$  a la que se produce la rotura de la probeta es ligeramente superior a 1.5 GPa. El acero B0 por el contrario presenta un comportamiento diferenciado y susceptible del ensayo que se esté realizando así como del tipo de entalla que presente, ya que en él se presenta la mayor dispersión de valores; obteniéndose una tensión  $\bar{\sigma}$  de rotura ligeramente superior a 1.4 GPa para las probetas solicitadas a tracción con independencia de la entalla que tengan



mecanizada. Para el caso de los ensayos de flexión sobre el acero B0 el comportamiento es ligeramente diferente presentando una tensión de rotura mayor que la encontrada en el ensayo de tracción superando en ambas entallas los 1.5 GPa; siendo todavía más acusado en las probetas con entalla PC donde se llegan a superar los 1.6 GPa.

### 3.7.2. Factor de concentración de tensiones

En la Tabla 5.6 se reflejan en un resumen conjunto los valores analizados respecto la tensión axial media  $\sigma_{Lm}$  y la tensión axial máxima  $\sigma_{Lmáx}$  que están teniendo lugar en la sección particular de análisis así como el factor de concentración de tensiones hallado  $K_t$  (téngase en cuenta que se ha establecido la tensión axial perpendicular a la sección de rotura de la probeta como  $\sigma_L$  para evitar confusiones entre los ensayos de tracción y flexión puesto que en cada ensayo se definen en ejes distintos). La sección de análisis queda determinada a través de su posición (siendo FE el fondo de entalla en su punto central y siendo MAX la sección perpendicular a la entalla en aquel punto que se encuentra el máximo de la tensión axial) durante el instante de carga (INST) que previamente se indica (siendo IRP aquel que tiene lugar en el instante de rotura de la probeta e ICM aquel que se da en el instante de máxima carga). Sobre la base de lo anteriormente comentado, una misma probeta podrá presentar varios valores como consecuencia de la sección longitudinal que se esté analizando o bien, del instante en el que se realice el análisis.

Con el fin de simplificar la Tabla 5.6 se presentan las Tablas 5.7 y 5.8, en las que se reflejan los valores característicos de las variables ( $\sigma_{Lm}$ ,  $\sigma_{Lmáx}$ ,  $K_t$ ) en función de la entalla que se presenta en la probeta e independientemente del tipo de sollicitación a la que esté sometida.

En la Tabla 5.7 se presentan los datos referentes a los ensayos de sollicitación de tracción y flexión para las probetas entalladas tipo PAA y PA (entalla de pequeña profundidad y pequeño radio de curvatura). Las tensiones medias ( $\sigma_L$ ), tensiones axiales máximas ( $\sigma_{Lmáx}$ ) y los factores de concentración de tensiones ( $K_t$ ), son característicos del tipo de acero pues, con independencia del ensayo que se esté realizando, se observan valores muy parejos de estas variables. Así con independencia del paso de trefilado, el factor de concentración de tensiones se mueve entre los valores  $K_t = 1.45$  y  $1.62$ . Para el acero B0, con independencia del tipo de sollicitación (tracción o flexión) que se esté realizando sobre el mismo y en el momento correspondiente con el IRP, presentan una ( $\sigma_{Lm}$ ) de entre 1.35 y 1.39 GPa y una tensión máxima ( $\sigma_{Lmáx}$ ) que oscila entre 2.16 y 2.21 GPa; en el acero B4 las tensiones medias ( $\sigma_{Lm}$ ) oscilan entre 1.74 y 1.83 GPa y las máximas ( $\sigma_{Lmáx}$ ) entre 2.64 y 2.65 GPa; así mismo, en el acero B7 se observa como la tensión media oscila entre 2 y 2.11 GPa mientras que los valores máximos ( $\sigma_{Lmáx}$ ) se encuentran entre 3.23 y 3.24 GPa.

Tabla 5.6. Resumen de los valores característicos encontrados en los diferentes ensayos.

PROBETA	POSICIÓN	INST.	$\sigma_{Lm}$ (GPa)	$\sigma_{Lm\acute{a}x}$ (GPa)	$K_t$
<b>B0-AA</b>	FE	IRP	1.39	2.16	1.56
<b>B0-AA</b>	MAX	IRP	1.35	2.17	1.61
<b>B4-AA</b>	FE	IRP	1.83	2.64	1.45
<b>B7-AA</b>	FE	IRP	2.11	3.23	1.53
<b>B0-CC</b>	FE	ICM	1.55	1.66	1.07
<b>B0-CC</b>	FE	IRP	1.71	1.77	1.03
<b>B4-CC</b>	FE	ICM	1.82	1.98	1.09
<b>B4-CC</b>	FE	IRP	2.11	2.29	1.08
<b>B7-CC</b>	FE	IRP	2.29	2.48	1.08
<b>B0-A</b>	FE	IRP	1.39	2.21	1.58
<b>B4-A</b>	FE	IRP	1.74	2.66	1.53
<b>B7-A</b>	FE	IRP	2.00	3.24	1.62
<b>B0-C</b>	FE	IRP	1.53	1.66	1.09
<b>B4-C</b>	FE	IRP	1.81	2.07	1.14
<b>B7-C</b>	FE	IRP	2.15	2.51	1.17

Tabla 5.7. Datos resultantes de los ensayos de sollicitación a tracción en las probetas con entalla tipo A (PAA y PA).

PROBETA	POSICIÓN	INST.	$\sigma_{Lm}$ (GPa)	$\sigma_{Lm\acute{a}x}$ (GPa)	$K_t$
<b>B0-AA</b>	FE	IRP	1.39	2.16	1.56
<b>B0-A</b>	FE	IRP	1.39	2.21	1.58
<b>B0-AA</b>	MAX	IRP	1.35	2.17	1.61
<b>B4-AA</b>	FE	IRP	1.83	2.64	1.45
<b>B4-A</b>	FE	IRP	1.74	2.66	1.53
<b>B7-AA</b>	FE	IRP	2.11	3.23	1.53
<b>B7-A</b>	FE	IRP	2.00	3.24	1.62

Los datos obtenidos derivados de los ensayos de sollicitación a tracción y flexión sobre probetas PCC y PC (entalla de pequeña profundidad y gran radio de curvatura) se presentan en la Tabla 5.8; en ella se observa un comportamiento similar al encontrado en las probetas PAA y PA. El factor de concentración de tensiones ( $K_t$ ) oscila entre los valores de 1.03 y 1.17 con independencia del grado de trefilado que presente el acero a partir del cual se ha

mecanizado la probeta. Así mismo, con independencia del tipo de sollicitación el acero B0 manifiesta una tensión  $\sigma_{Lm}$  que oscila entre 1.53 y 1.71 GPa en el momento de rotura, mientras que los valores de  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  se encuentran entre 1.66 y 1.77 GPa. Este comportamiento es extensible al acero B4, donde la tensión en el ICM coincide en ambas sollicitaciones, siendo la  $\sigma_{Lm}$  de 1.81–1.82 GPa y  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  de entre 1.98–2.07 GPa. Para el acero B7 se repite el mismo patrón:  $\sigma_{Lm}$  oscila entre 2.15 y 2.29 GPa y  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  ente 2.48 y 2.51 GPa.

Tabla 5.8. Datos resultantes de los ensayos de sollicitación a tracción en las probetas con entalla tipo C (PCC y PC).

PROBETA	POSICIÓN	INST	$\sigma_{Lm}$ (GPa)	$\sigma_{Lm\acute{a}x}$ (GPa)	$K_t$
<b>B0-CC</b>	FE	ICM	1.55	1.66	1.07
<b>B0-C</b>	FE	IRP	1.53	1.66	1.09
<b>B0-CC</b>	FE	IRP	1.71	1.77	1.03
<b>B4-CC</b>	FE	ICM	1.82	1.98	1.09
<b>B4-C</b>	FE	IRP	1.81	2.07	1.14
<b>B4-CC</b>	FE	IRP	2.11	2.29	1.08
<b>B7-CC</b>	FE	IRP	2.29	2.48	1.08
<b>B7-C</b>	FE	IRP	2.15	2.51	1.17

Representando los valores de  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  (en el FE durante el IRP) en función del grado de trefilado para todas las probetas analizadas con independencia de la sollicitación (Fig. 5.49), se percibe un distribución prácticamente lineal en el que la tensión  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  se va incrementando con el grado de trefilado, con una ligera diferencia para las probetas PCC (respecto a esta conducta media). Se establecen dos tensiones  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$  marcadas por la entalla que se presente, situándose la diferencia, entre ambas, en el entorno de los 0.5 GPa.

La evolución de la tensión  $\sigma_{Lm}$  (en el FE durante el IRP) no se observa tan lineal como en el caso de la tensión  $\sigma_{Lm\acute{a}x}$ , pero a diferencia de ésta manifiesta una conducta que no se ve tan afectada por la forma física de la entalla que lleve mecanizada (Fig. 5.50), presentando una diferencia menor de 0.4 GPa entre los valores extremos de la tensión  $\sigma_{Lm}$  en todas las probetas del mismo acero.

El factor de concentración de tensiones  $K_t$  (en el FE durante el IRP) en función del grado de trefilado se representa en la Fig. 5.51. Manifiesta una conducta prácticamente constante con independencia del material y de la sollicitación actuante, quedando perfectamente establecido para cada entalla; siendo el valor medio de  $K_t$  para las probetas tipo PA y PAA de 1.545 y de 1.098 para las probetas tipo PC y PCC.

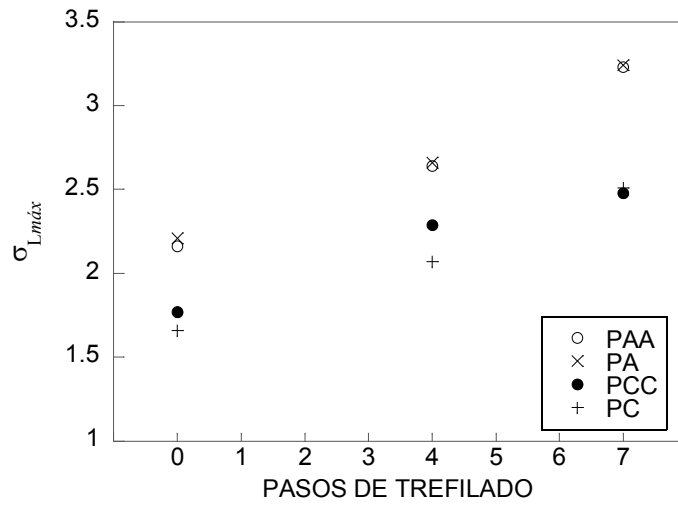


Fig. 5.49. Evolución de  $\sigma_{Lmáx}$  con el grado de trefilado (FE durante el IRP).

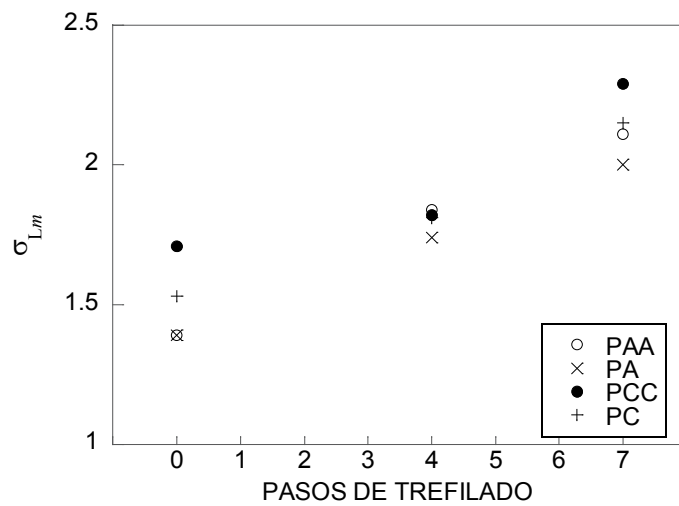


Fig. 5.50. Evolución de  $\sigma_{Lm}$  con el grado de trefilado (FE durante el IRP).

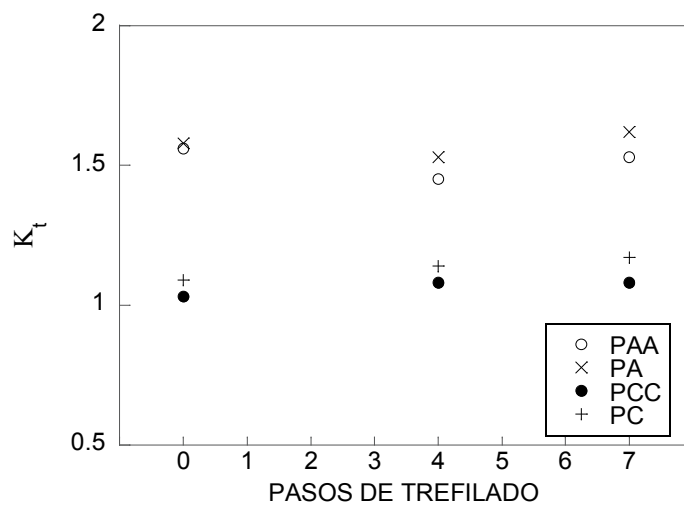


Fig. 5.51. Evolución de  $K_t$  con el grado de trefilado (FE durante el IRP).



## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

---

### 1. COMPORTAMIENTO MECÁNICO

#### 1.1. Descripción

En la presente tesis se ha realizado un estudio que pone de manifiesto el comportamiento del acero perlítico eutectoide (denominado acero tipo B, acero de trefilar), cuando en él concurre la presencia de una o varias entallas durante las solicitaciones de tracción o de flexión por cuatro puntos. Para ello, se ha realizado un seguimiento del acero B a lo largo de sus diferentes pasos por la hilera de trefilado (B0, B4 y B7).

El análisis se ha centrado en probetas que presentan una geometría prismática sobre las que se han tallado una o varias entallas, según la sollicitación actuante. Las probetas ensayadas a sollicitación de tracción presentan un entallado doble que tiene lugar en dos de las caras opuestas, sin embargo, las probetas sollicitadas a flexión por cuatro puntos presentan una única entalla. En ambos ensayos las entallas presentan las mismas características geométricas.

El diseño geométrico de la entalla obedece a un criterio particular que busca una relación definida entre la profundidad de penetración y el diámetro de la varilla de acero específico.

Se han analizado dos tipos de entallas: la entalla tipo A y la tipo C, diferenciadas ambas por su radio de curvatura (siendo en la entalla tipo A donde el radio de curvatura es más pequeño). Esto conduce a que en el ensayo de sollicitación de tracción se designen las probetas como PAA y PCC (por presentar dos entallas en la misma probeta) y en el ensayo de sollicitación de flexión se designen las probetas como PA y PC.

El análisis pormenorizado por entallas, realizado durante el proceso experimental, ha puesto de manifiesto que, con independencia del ensayo que se esté realizando, el material experimenta una pérdida de capacidad de carga, siendo ésta semejante para ambos tipos de entalla. Ésta no se empareja con una disminución en el trabajo necesario para inducir la rotura igual en ambas probetas, ya que éste ha resultado ser notablemente más alto en las probetas con entalla tipo C (PCC y PC, gran radio de curvatura) que las probetas con entalla tipo A (PAA y PA, pequeño radio de curvatura). Esta manifiesta diferencia se debe a que las probetas con entalla tipo C (PCC y PC) toleran un desplazamiento mucho más elevado que las probetas con entalla tipo A (PAA y PA). Este patrón de conducta se ha observado extensible a todos los aceros analizados B0, B4 y B7; estableciéndose un comportamiento prácticamente lineal con el aumento de grado de trefilado, además de una pérdida de representatividad de la forma física de la entalla (o entallas) de la probeta.

El análisis de conjunto de ambos tipos de ensayo, de sollicitaciones a tracción y a flexión, indica un comportamiento que se ha manifestado, en ambos casos, con una pérdida de capacidad de carga muy semejante para ambos tipos de entallas; siendo éste más acusado en las probetas de flexión, que en las de tracción. Las probetas sollicitadas a flexión únicamente han podido tolerar un 11% de la capacidad de carga que han soportado las de tracción; no obstante, el trabajo necesario para inducir la rotura en ambos ensayos es semejante. Esta circunstancia particular se debe a la alta capacidad de deformación que poseen las probetas cuando son sollicitadas a flexión, mostrando en algún caso una tolerancia máxima (puesto que en una de las probetas no se llega a alcanzar la rotura durante el proceso de ensayo).

Cuando se analizaron las curvas de comportamiento de los especímenes correspondientes a cada grado de trefilado y tipo de entalla característico, en el ensayo de sollicitación de flexión, se comprobó que pequeñas diferencias entre las profundidades de penetración de los diferentes especímenes motivaban una ligera variación en la curva de comportamiento, mostrándose ésta ligeramente más elevada a medida que disminuía la profundidad de penetración de la entalla.

El efecto de cambio de conducta de la probeta como consecuencia de las ligeras diferencias en el proceso de mecanización de las entallas (en concreto en la profundidad de penetración de la entalla) no se apreció en la respuesta mecánica (curvas F-u) correspondiente al ensayo bajo sollicitación de tracción, puesto que la diferencia entre las entallas de la misma probeta ya enmascara de algún modo el patrón de conducta general, prevaleciendo un comportamiento general medio para cada espécimen. Éste se observó común en los tres especímenes realizados, de modo que la diferencia en el entallado de las diferentes probetas que constituyen la muestra no resultaba significativa a la hora de evaluar el comportamiento general del acero frente a cada entalla. Este último resultado resultaba independiente del tipo de entalla que presentaba el material siendo por tanto válido para las probetas tipo PAA como para las tipo PCC.

## **1.2. Análisis numérico vinculado al comportamiento mecánico**

El análisis numérico mediante el método de los elementos finitos (MEF) ha hecho posible visualizar y estudiar los campos de tensiones y de deformaciones plásticas que están teniendo lugar en la probeta, pudiendo de esta manera establecer las distribuciones de estas variables tanto en los fondos de entalla como en el resto de la probeta.

Se ha observado un comportamiento interno sustancialmente diferente entre las entallas tipo A y C, tanto en los ensayos de tracción como en los de flexión. Este comportamiento diferencial se ha podido ver, por ejemplo, al analizar la deformación plástica soportada por las probetas PAA y las PCC, y por ende en la densidad de energía de deformación, donde se observa como la deformación plástica de las PAA presenta una forma que se define en los primeros instantes de carga, y que una vez definida experimenta un crecimiento homotético que se mantiene hasta el instante previo a la rotura del material. Para el caso de las probetas PCC la deformación plástica presenta un cambio continuo que motiva que el material esté a lo largo de todo el ensayo en continua evolución.

Se ha puesto de manifiesto cómo las variables principales que rigen el proceso de fractura presentan una distribución evolucionada con el grado del trefilado, de modo que las estructuras tridimensionales son cada vez más complejas y definidas. Ha sido, quizás, en la tensión hidrostática donde en mayor medida se ha podido visualizar este fenómeno y fundamentalmente en las probetas de amplio radio de entalla que han sido sollicitadas a flexión (probetas tipo PC).

El análisis realizado por cada tipo de entalla en particular ha servido para esclarecer la conducta de estas variables cuando entre ellas existen pequeñas diferencias de mecanizado así



como cuantificar el nivel de susceptibilidad a las mismas. Las variables más sensibles a las pequeñas variaciones en la forma física de las entallas han sido la deformación plástica y a los desplazamientos, siendo menos acusada, aunque existente, en cuanto a la tensión hidrostática se refiere. Sin embargo, aunque la tensión hidrostática se ve afectada por la forma geométrica de la entalla, la tensión equivalente de von Mises en los fondos de entalla no se ve afectada, lo que indica que el material redistribuye sus tensiones, así como la deformación plástica, de modo que la tensión equivalente de von Mises en último instante no se ve modificada. La susceptibilidad de la tensión hidrostática a las pequeñas diferencias en la geometría de las entallas induce su correspondiente en el factor de triaxialidad (como no podía ser de otro modo), puesto que este factor relaciona la tensión hidrostática y la tensión equivalente de von Mises, denotando pequeñas diferencias que se muestran claramente en el análisis realizado a través de las secciones de rotura de la probeta.

El análisis numérico de la sección de rotura (sección neta transversal) ha permitido establecer un vínculo entre los ensayos de tracción y de flexión por cuatro puntos, tanto en cuanto a las tensiones equivalentes de von Mises como en las tensiones axiales que se están produciendo en el eje longitudinal perpendicular a la sección de rotura de la probeta. Esta relación directa entre ambos ensayos ha permitido definir factores de concentración de tensiones para cada entalla con independencia del tipo de sollicitación a que esté sometida la probeta en cuestión, así como establecer un criterio de fractura basado en la tensión equivalente de von Mises de carácter global para cada acero con independencia del proceso de sollicitación que conlleve. La tensión equivalente de von Mises ha resultado ser un marcador determinante para determinar cuándo va a detonar el proceso de fractura; tanto más exacto para el acero B4 y el B7 siendo ligeramente impreciso para el B0.

Del mismo modo que se ha establecido un criterio de fractura basado en la tensión equivalente o efectiva de von Mises, se ha observado cómo en los valores de la tensión axial (tensión axial longitudinal: tensión a lo largo del eje longitudinal de la probeta; dirección del trefilado) se presenta un comportamiento definido, de modo que en el instante de rotura la tensión axial máxima se establece en función de la entalla que presente el material y no del tipo de ensayo, manifestando un crecimiento aproximadamente lineal con el grado de trefilado. La tensión axial media tiene un comportamiento diferente a la tensión axial máxima, mostrando una conducta independiente de la forma física de la entalla y del tipo de ensayo.

Se ha establecido un factor de concentración de tensiones para las entallas tipo A-AA y para las entallas C-CC, puesto que el factor de concentración de tensiones se ha demostrado prácticamente constante e independiente de la sollicitación actuante y del tipo del material sobre el que se establezca.

## 2. ANÁLISIS DE FRACTOGRÁFICO

### 2.1. Descripción

Tanto en el análisis fractográfico como en el análisis numérico realizado se ha observado cómo la ZPF (zona de proceso de fractura) en las probetas solicitadas a tracción con entalla tipo AA se presentan entre 1/3 y 1/4 del borde exterior de la probeta junto a la entalla, mientras que en las probetas con entalla tipo CC dicha zona aparece situada en el centro de la entalla. Tanto en las probetas PAA como en las PCC se observa una elevación del porcentaje de ocupación de la ZPF con el grado de trefilado, mientras que se observa una caída paulatina de la ZI (zona intermedia) y un aumento de la CE (corona exterior o labio dúctil) para las probetas PAA. Esta característica, sin embargo, no es extrapolable para las probetas PCC, en las cuales no se observa esta tendencia.

En las probetas solicitadas a flexión (PA y PC) el comportamiento de la ZPF no presenta la correlación antes manifestada por las probetas solicitadas a tracción, puesto que en ellas se observa cómo son las probetas mecanizadas a partir de acero B4 las que presentan mayor extensión del porcentaje de ocupación de la ZPF y de la CE, mientras que presentan el menor porcentaje de ocupación de la ZI. La ZPF se localiza en estas probetas en la zona central adyacente a la entalla con independencia de la entalla que se esté analizando. En cualquier caso, se observa como la forma física de las entallas tiene una influencia en fractografía menos pronunciada para las probetas solicitadas a tracción que para aquellas solicitadas a flexión con independencia del grado de trefilado a partir del cual se hayan mecanizado.

En el capítulo IV se analizaron las secciones de rotura frente a los campos tensionales mediante la tensión equivalente de von Mises, observando una concordancia entre el estado tensional que predice el MEF y la fractografía de la probeta analizada. Este hecho se aprecia fundamentalmente en la concentración de trazas de superficies de tensión constante con el plano de entalla que tiene lugar en cada una de las zonas, así como en el valor de la tensión equivalente de von Mises. Se observa como la ZPF se va a localizar en aquellas zonas en las que concurren dos factores: una alta concentración de superficies de tensión constante con un elevado valor tensional. Las fisuras radiales enmarcadas en el área de la zona intermedia correspondiente al clivaje presentan una dirección que se manifiesta transversal a las trazas de superficie de tensión constante que aparecen en la sección de rotura, lo que indicaría que la dirección de clivaje sigue el gradiente tensional de la zona. Una vez que se ha establecido este hecho, la determinación de la forma de la superficie de fractura tridimensional resulta evidente puesto que, una vez que se establece la distribución tensional de la tensión equivalente de von Mises en forma de superficies de tensión constante en la zona, predecir la dirección de fractura supondrá calcular el gradiente de las superficies de tensión constante que

se establece mediante el análisis numérico proporcionado por el MEF, así como establecer el valor de mínima energía necesaria para inducir el proceso de rotura.

## **2.2. Triaxialidad *v s.* Micromecanismos de fractura**

El análisis numérico ha vinculado los micromecanismos de fractura con el factor de triaxialidad, de modo que se ha observado cómo el módulo del factor de triaxialidad no es, en definitiva, el factor determinante de la superficie de fractura, sino que son las máximas variaciones que suceden en el factor de triaxialidad las que condicionan la superficie de fractura. Así pues, en aquellos puntos del material donde existe una variación abrupta de los valores de triaxialidad es donde se observan los límites o fronteras entre los diversos micromecanismos de fractura. Esto permite una acotación del entorno del material en el que se presentan cada uno de los micromecanismos básicos de fractura, sobre la base del análisis numérico previo. Los distintos planos de estudio, distribuidos a lo largo de las diferentes secciones que constituyen la sección de rotura de la probeta, determinan en su conjunto un mapa de triaxialidad en el que quedan, de un modo gráfico, acotados los entornos donde se manifiestan los distintos micromecanismos básicos de fractura, pudiendo ser determinadas con relativa precisión la ZPF, la ZI y la CE.

## BIBLIOGRAFÍA

---

ALBELLA, J.M., CINTAS, A.M., MIRANDA, T., SERRATOSA, J.M. (1993)

*Introducción a la ciencia de materiales.*

Csic, Madrid.

ASM (1995a)

*ASM Handbook (Vol. 9: Metallography and Microstructures).*

ASM International, Materials Park, OH.

ASM (1995b)

*ASM Handbook (Vol. 12: Fractography).*

ASM International, Materials Park, OH.

ASTIZ, M.A. (1976)

*Estudio de la estabilidad de una fisura superficial en un alambre de acero de alta Resistencia.*

Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

AYASO F.J. (2001)

*Fractura de alambres entallados de acero eutectoide progresivamente trefilado.*

Tesis Doctoral, Universidad de A Coruña.

BEREMIN, F.M. (1980a)

Calculs élastoplastiques par la méthode des éléments finis d'éprouvettes axisymétriques entaillées circulairement.

Journal of the Mechanics and Physics of Solids **36**, 317-351.

BEREMIN, F.M. (1980b)

Influence de la triaxialité des contraintes sur la rupture par déchirement ductile et la rupture fragile par clivage d'un acier doux.

Journal of the Mechanics and Physics of Solids **4(3)**, 327-342.

BORESI, A.P., SCHMIDT, R.J., (2003)

*Advanced mechanics of materials.*

John Wiley & Sons, Inc.

BRIDGMAN, P.W. (1952)

*Studies in Large Plastic Flow and Fracture.*

McGraw Hill, New York.

BROEK, D. (1991)

*Elementary Engineering Fracture Mechanics.*

Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

CASTELLÓ, W.B., FLORES, F.G., 2006)

Análisis bidimensional de sólidos con grandes deformaciones aplicando un elemento con deformaciones impuestas.

*Mecánica Computacional Vol XXV*, 329-349.

EMBURY, J.D, FISHER, R.M.. (1966)

The structure and properties of drawn pearlite.

*Acta Metallurgica* **14**, 147-159.

GALILEI G. (1638)

*Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze.*

In Leida.

GIL SEVILLANO, J. (1993)

Fractura de aceros perlíticos.

*Anales de Mecánica de Fractura* **10**, 43-55.

GRIFFITH, A. A., (1920)

The Phenomena of Rupture and Flow in Solids.

*Philosophical Transactions, Royal Society (Londres), Serie A* **221**, 163-19.

HANCOCK, J.W., BROWN, D.K., (1983)

On the role of strain and stress state in ductile failure.

*Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **31**, 1-24.

HYZAK, J.M., BERNSTEIN, I.M. (1976)

The role of microstructure on the strength and toughness of fully pearlitic steels.

*Metallurgical Transactions* **7A**, 1217-1224.

IRWIN, G.R., (1957)

Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate.

*Journal of Applied Mechanics* **24**, 361-364.

IRWIN, G.R., (1960)

Plastic zone near a crack and fracture toughness.

*Proceedings of the Seventh Sagamore Ordnance Materials Conference, Syracuse University, IV-63-IV-78.*

KAVISHE, F.P.L., BAKER, T.J. (1986)

Effect of prior austenite grain size and pearlite interlamellar spacing on strength and fracture toughness of eutectoid rail steel.

*Materials Science and Technology* **2**, 816-822.

LANCHA, A.M. (1987)

*Influencia del trefilado en la corrosión bajo tensión de aceros eutectoides.*

Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

LIU F. ALAN (2005)

*Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction.*

ASM International, Materials Park, OH.

LIU, G.R., QUEK, S.S. (2013)

*The finite element method.*

Butterwoth Heinemann.

MARTÍN, A., MARTÍNEZ, J.M. (2003)

*Mecánica de la Fractura.*

Tecnun, Universidad de Navarra.

MCMECKING, R. M., RICE, J.R., (1977)

Finite-Element Formulations for Problems of Large Elastic-Plastic Deformation.

*International Journal of Solids and Structures* **11**, 601-616.

MILLER, L.E., SMITH, G.C. (1970)

Tensile fractures in carbon steels.

*Journal of the Iron and Steel Institute* **208**, 998-1005.

MSC. MARC MENTAT (2005)

User's Guide.

MSC. MARC MENTAT (2005)

Volume A: Theory and User Information.

OVEJERO, E. (1998)

*Fractura en ambiente agresivo de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado.*

Tesis Doctoral, Universidad de A Coruña.

PINEAU, A. (1981)

Review of fracture micromechanisms and a local approach to predicting crack resistance in low strength steels.

*Proc. 5th Int. Conf. Fracture (D. Francois, Ed.), Cannes, France, pp. 553-577.*

SMALLMAN, R.E., NGAN, A.H.W (2007)

*Physical metallurgy and advanced materials.*

Butterwoth Heinemann.

TOLEDANO, M. (1998)

*Fatiga y fractura de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado.*

Tesis Doctoral, Universidad de A Coruña.

TORIBIO, J. (1992)

On the intrinsic character of the stress-strain curve of a prestressing steel.

*Journal of Testing and Evaluation* **20**, 357-362.

TORIBIO, J., OVEJERO, E., TOLEDANO, M. (1998)

Microstructural bases of anisotropic fracture behavior of heavily drawn steel.

*International Journal of Fracture* **87**, L83-L88.

VALIENTE, A. (1980)

*Criterios de fractura para alambres.*

Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

VALIENTE, A. (2001)

On Bridgman's stress solution for a tensile neck applied to axisymmetrical blunt notched tension bars.

*Journal of Applied Mechanics* **68**, 412-419.

WEIBULL, W. (1939)

Statistical theory of the strength of materials.

*Ingeniors Vetenskaps Akad. Handl.* **151**, 1-45.

ZIENKIEWICZ O. C. (1994)

*El método de los elementos finitos.*

Reverté S.A.



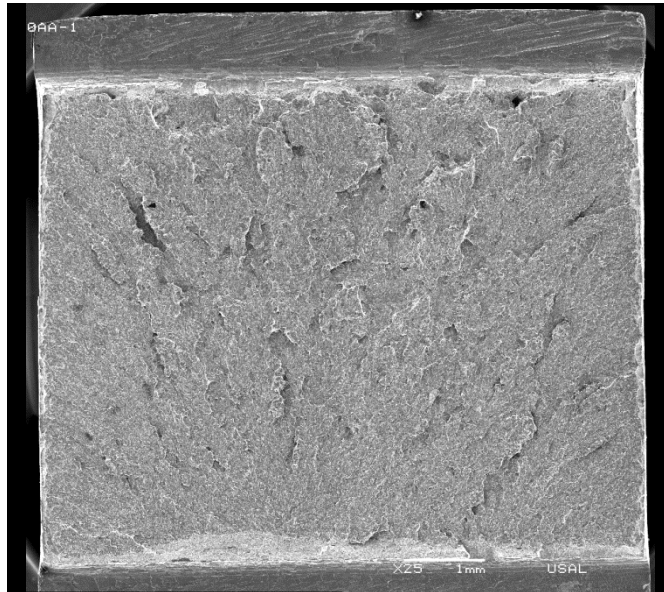
## **ANEXO I: SUPERFICIES DE FRACTURA DE LAS DISTINTAS PROBETAS ENSAYADAS**

---

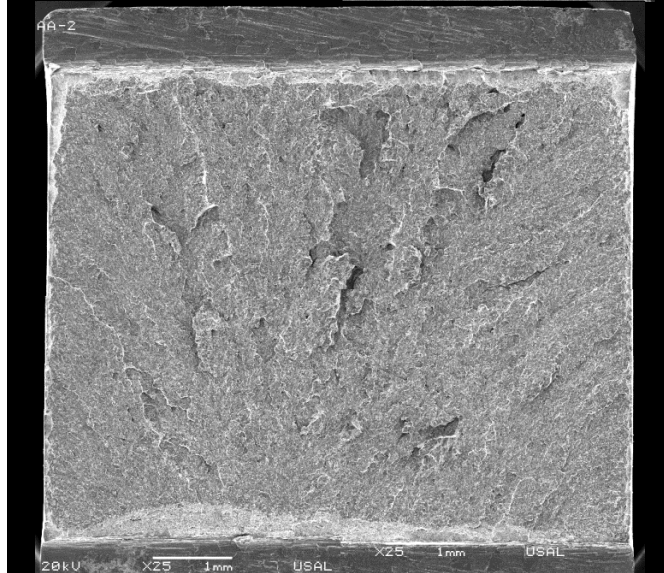
**SUPERFICIES DE FRACTURA DE LA MUESTRA B0-AA**

**B0-AA**

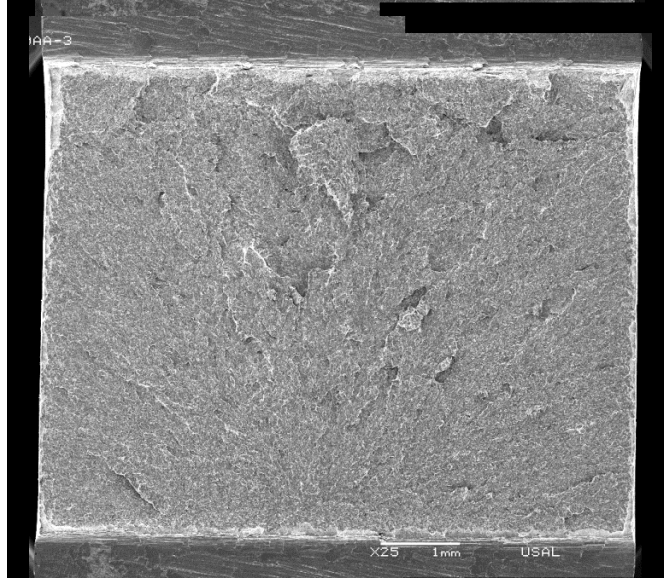
**B0-AA-1**



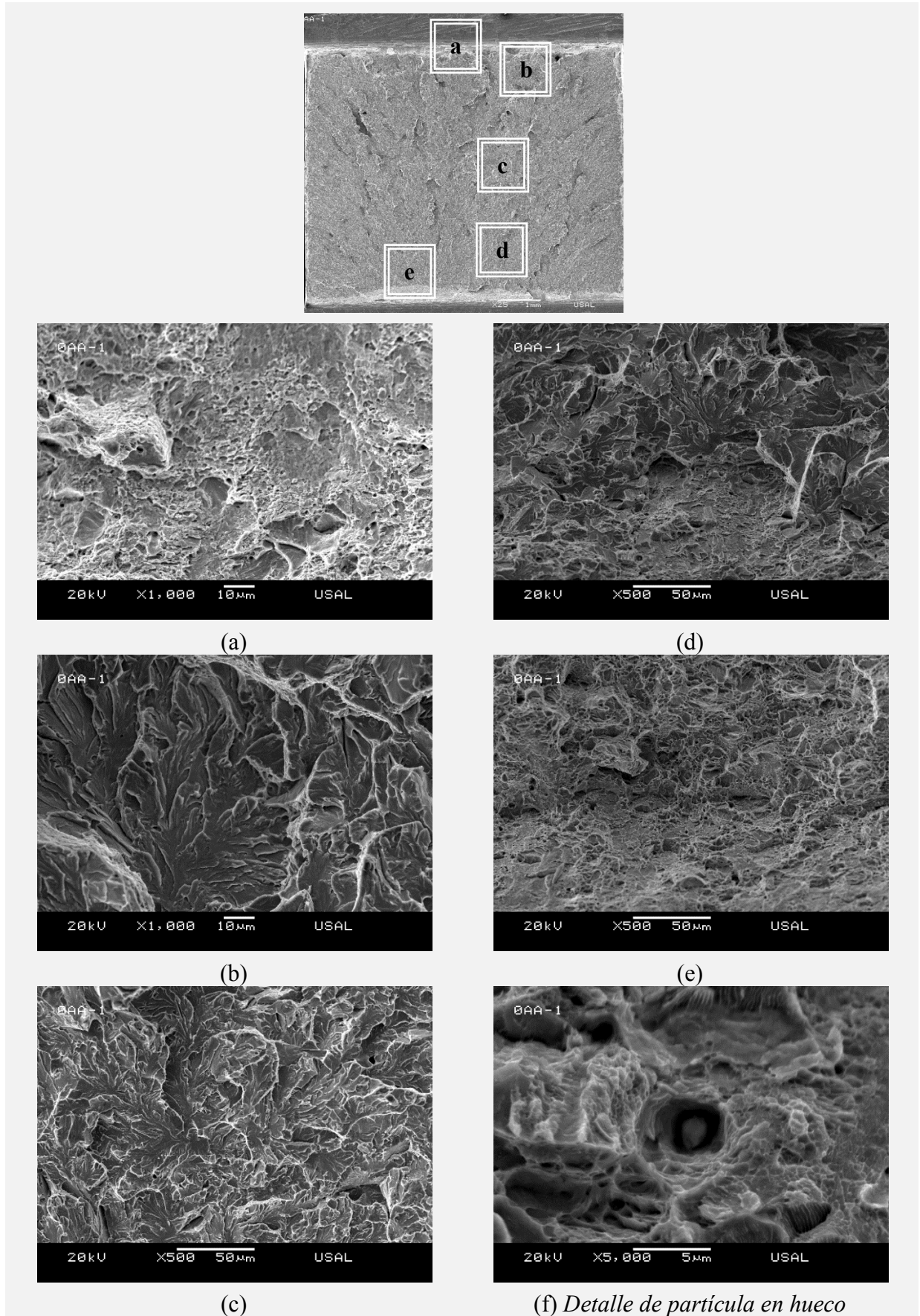
**B0-AA-2**



**B0-AA-3**



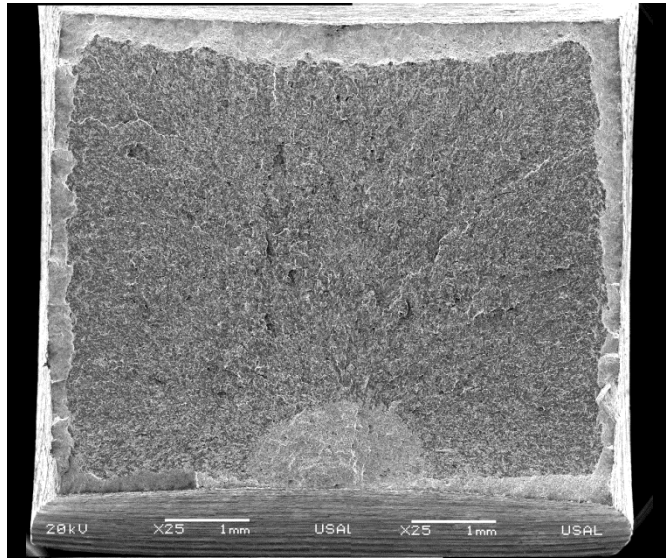
### FRACTOGRAFÍA DE LA PROBETA B0-AA-1



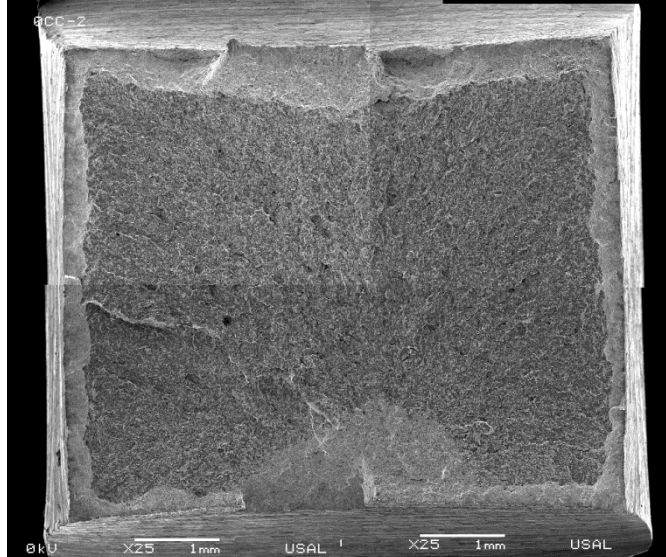
**SUPERFICIES DE FRACTURA DE LA MUESTRA B0-CC**

**B0-CC**

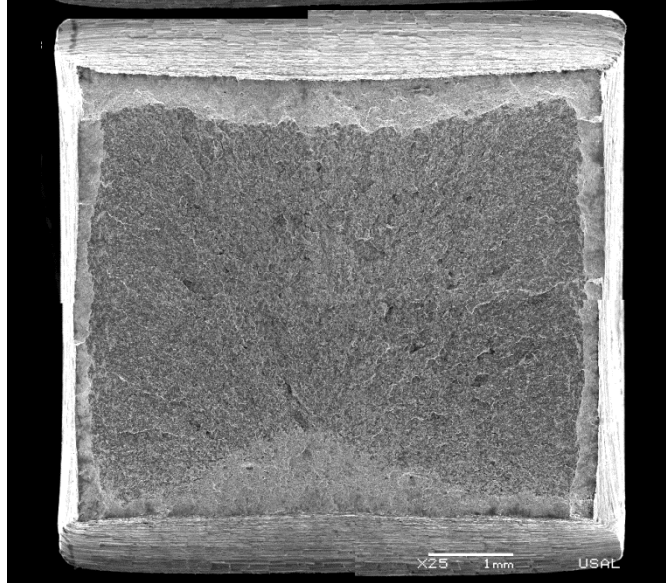
**B0-CC-1**



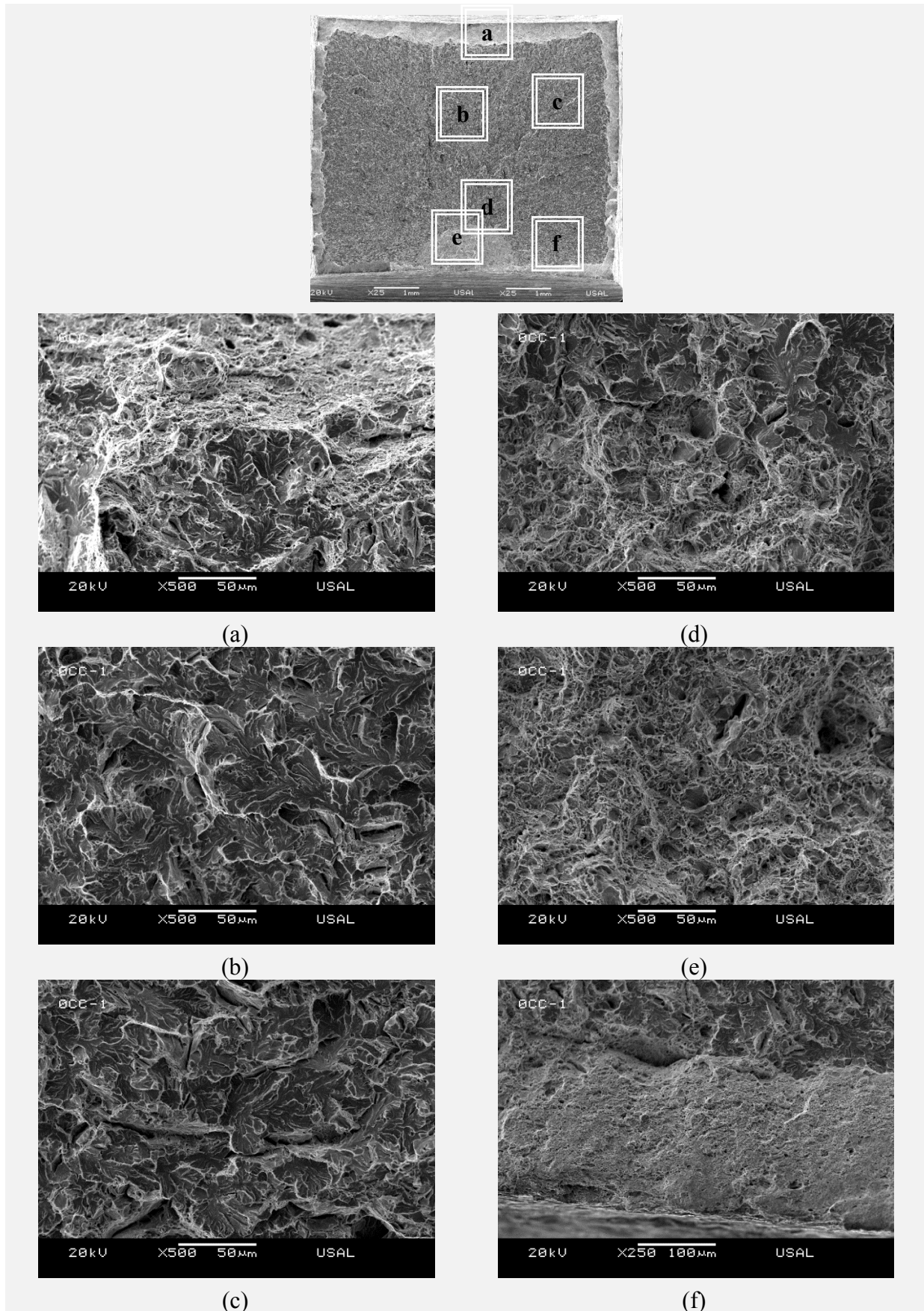
**B0-CC-2**



**B0-CC-3**



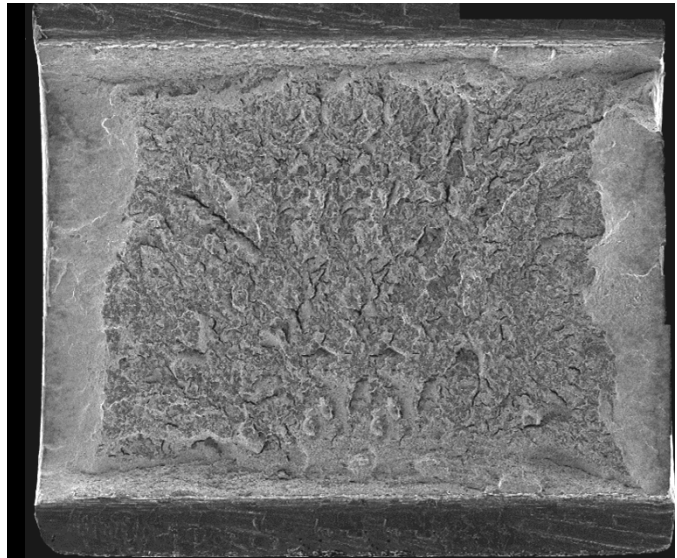
### FRACTOGRAFÍA DE LA PROBETA B0-CC



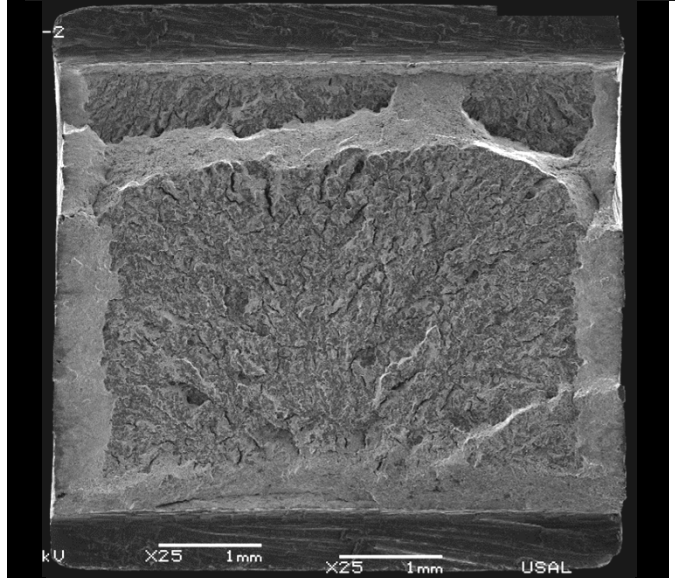
**SUPERFICIES DE FRACTURA DE LA MUESTRA B4-AA**

**B4-AA**

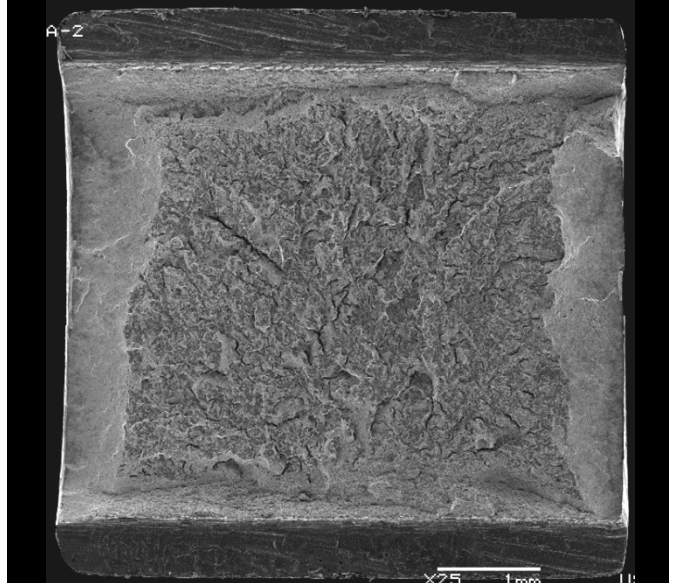
**B4-AA-1**



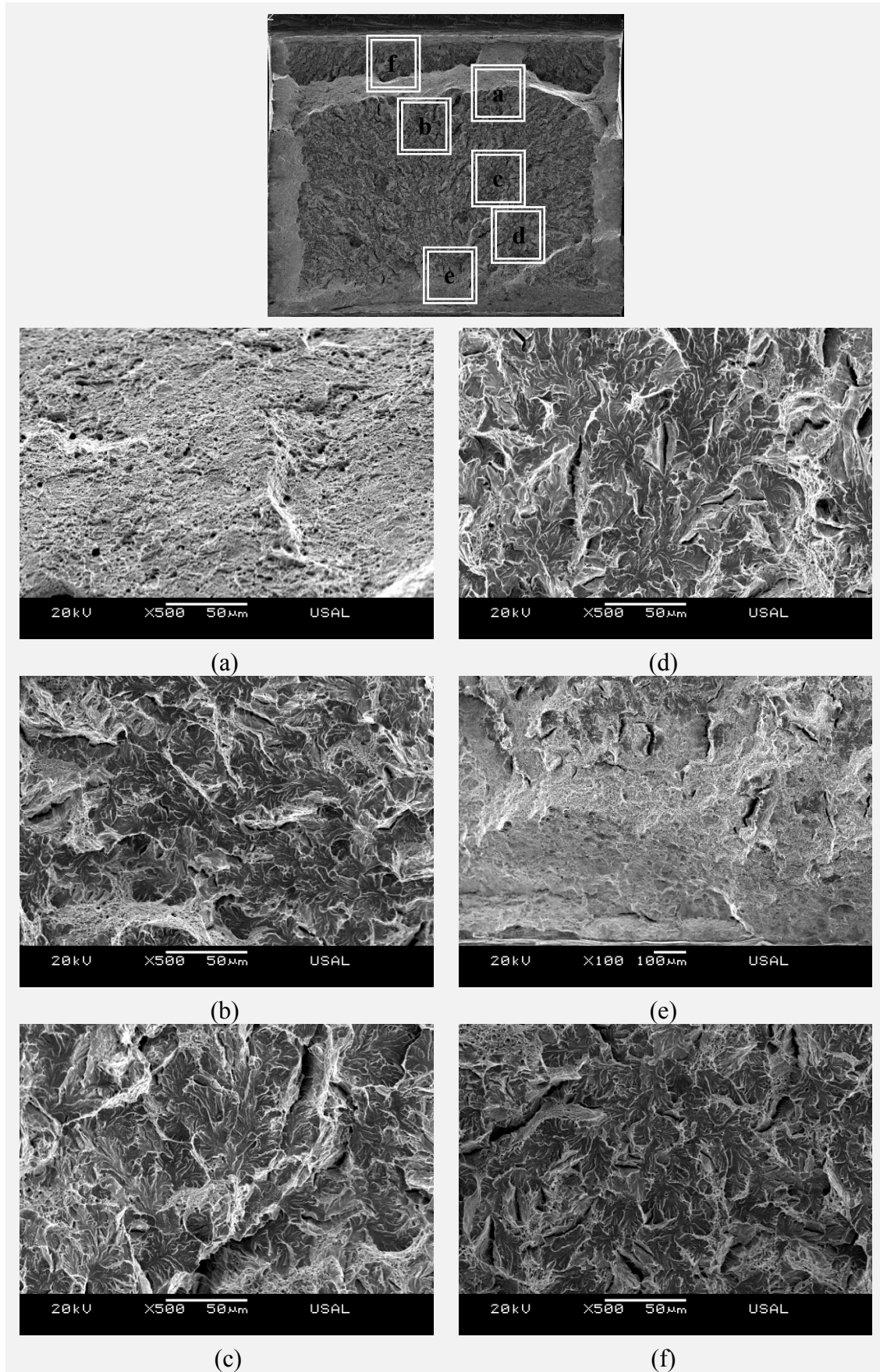
**B4-AA-2**



**B4-AA-3**



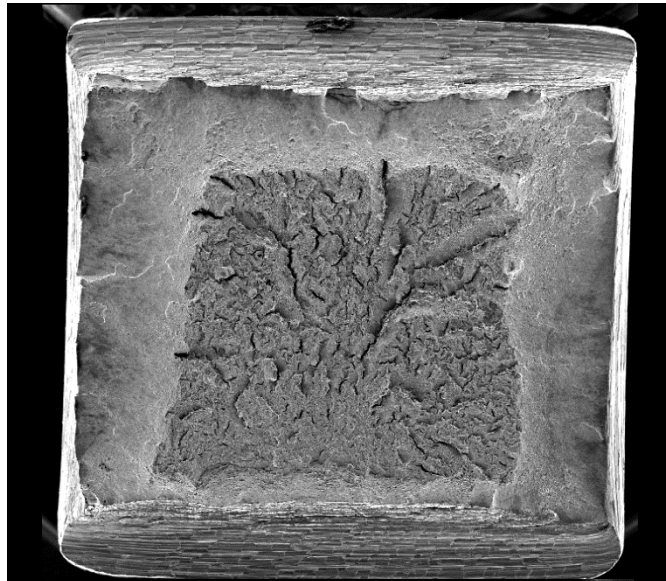
**ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B4-AA-2**



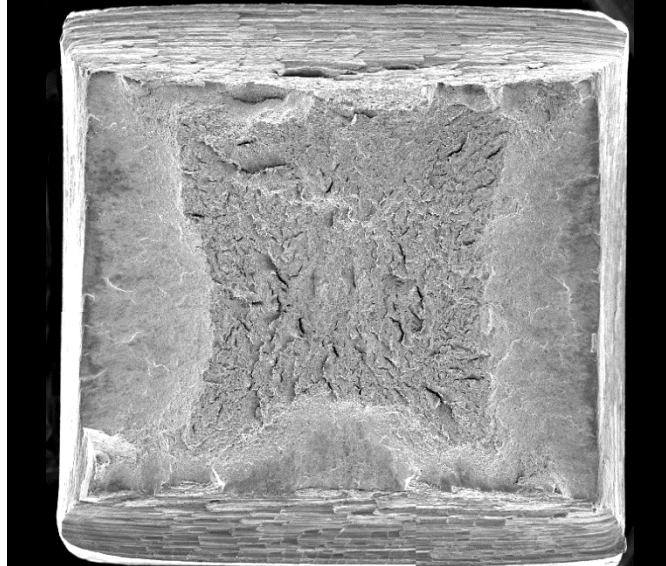
**SUPERFICIES DE FRACTURA DE LA MUESTRA B4-CC**

**B4-CC**

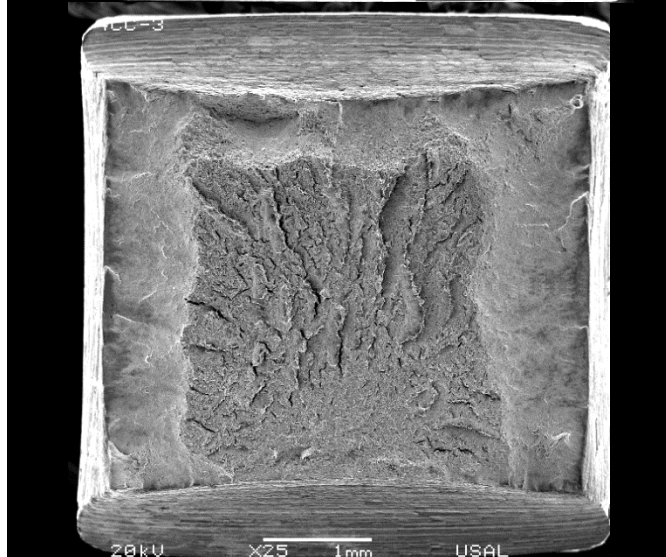
**B4-CC-1**



**B4-CC-2**

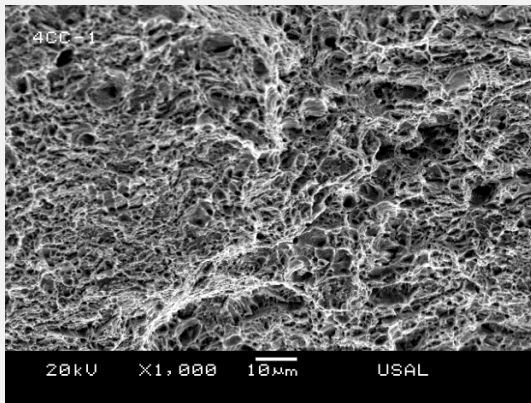
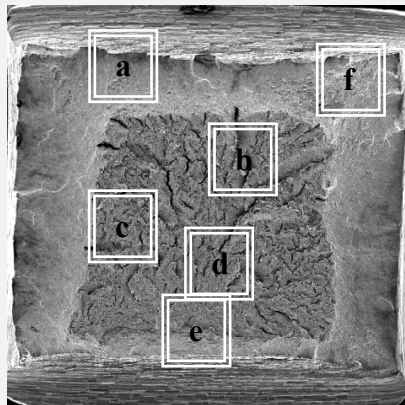


**B4-CC-3**

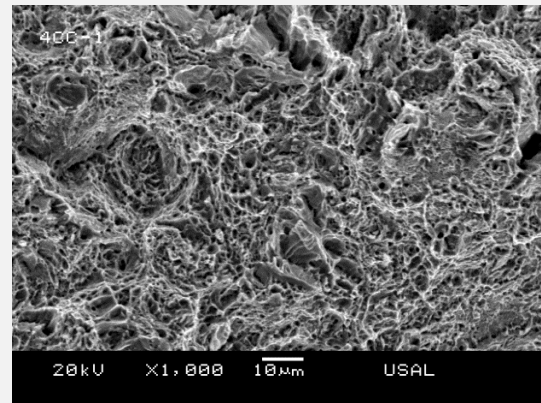




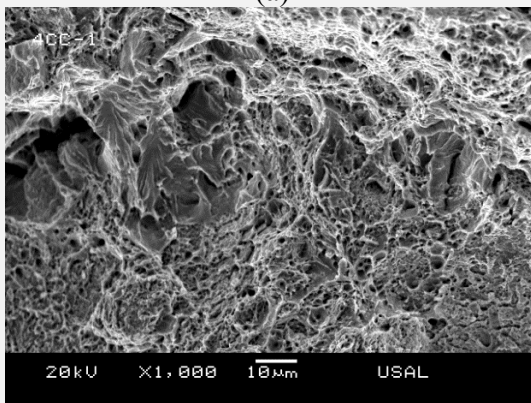
### ESTUDIO FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B4-CC-1



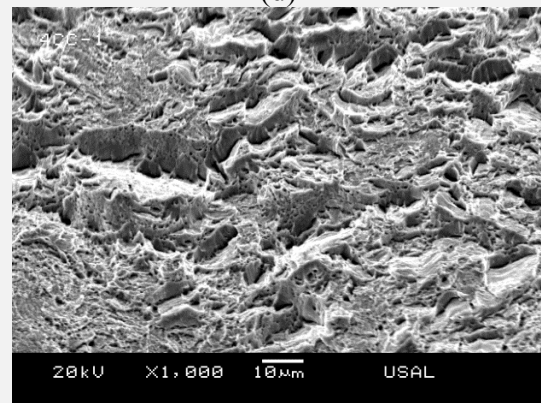
(a)



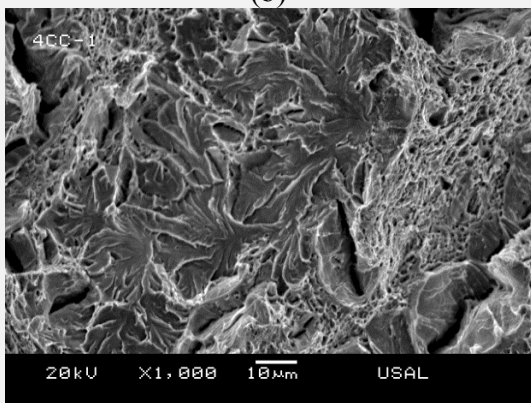
(d)



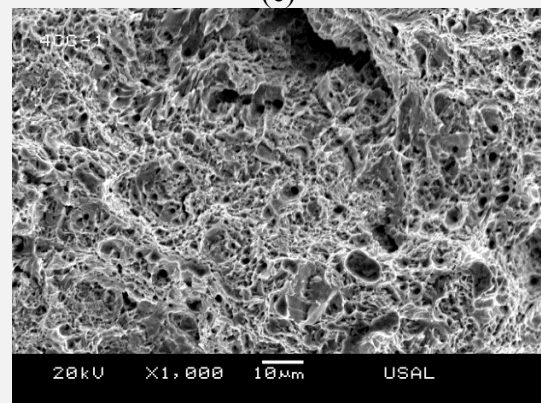
(b)



(e)



(c)

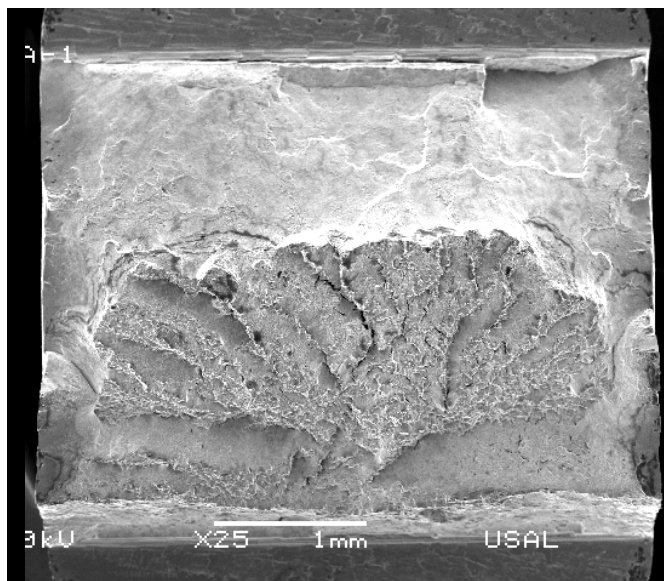


(f)

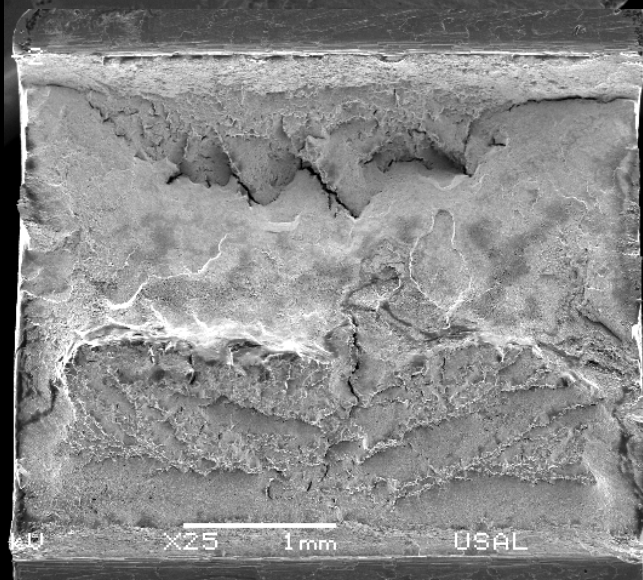
**SUPERFICIES DE FRACTURA DE LA MUESTRA B7-AA**

**B7-AA**

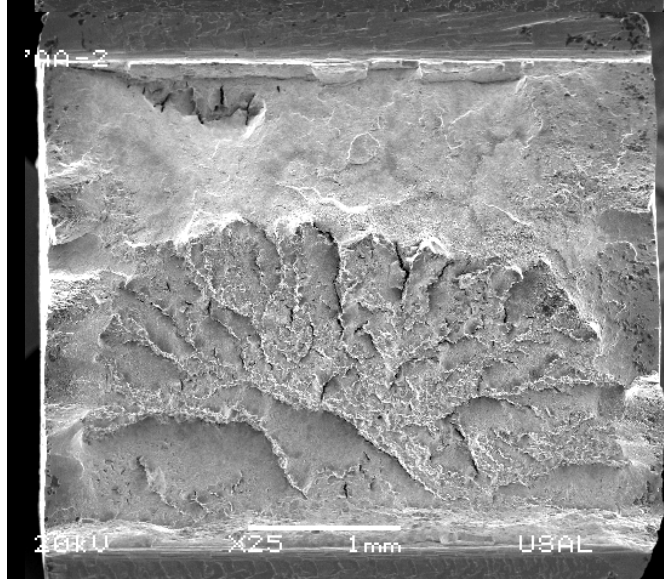
**B7-AA-1**



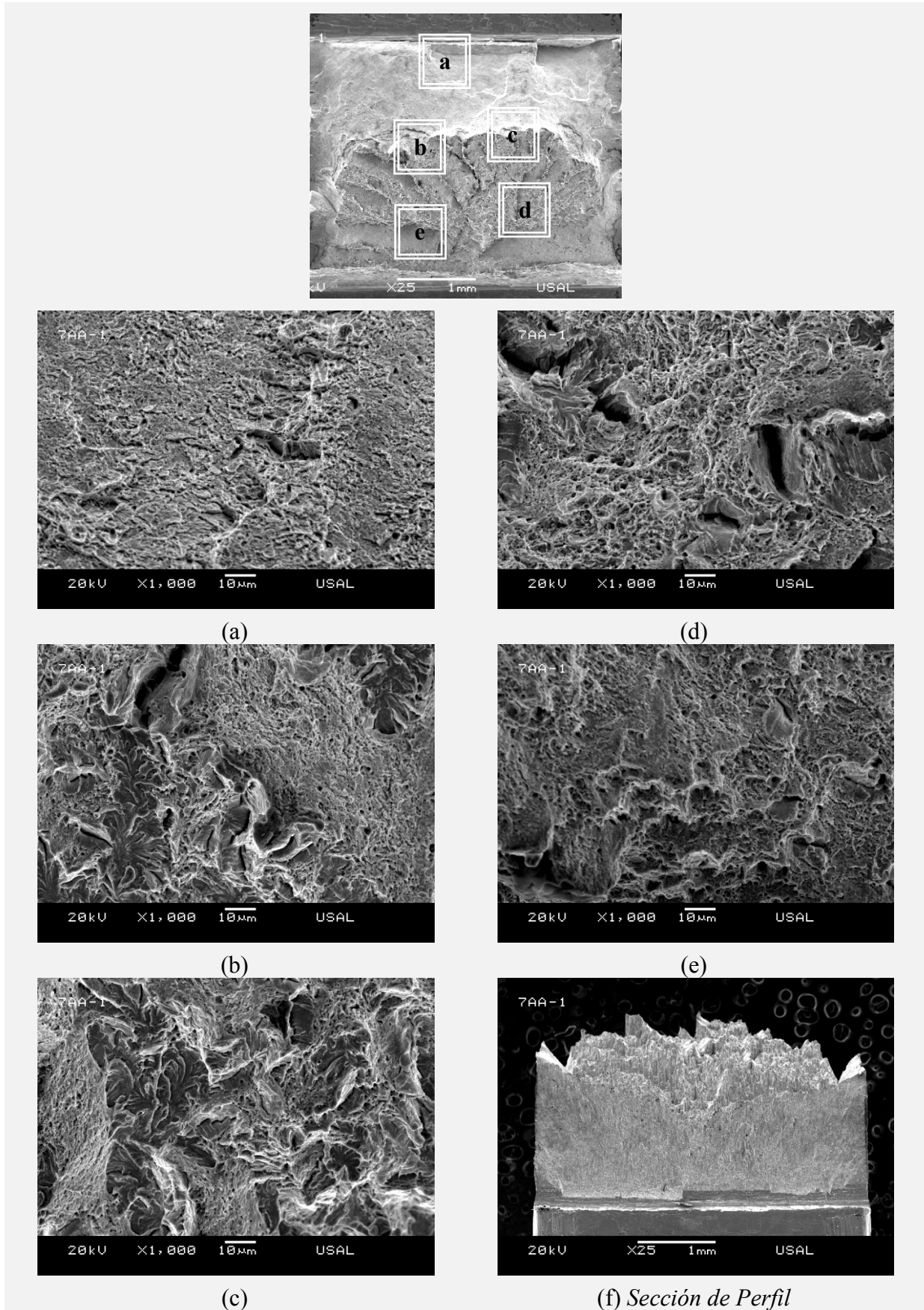
**B7-AA-2**



**B7-AA-3**



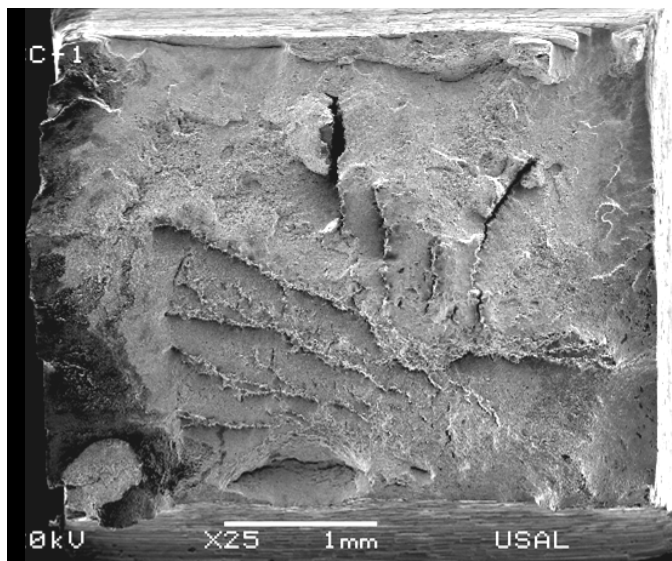
**ESTUDIO FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B7-AA-1**



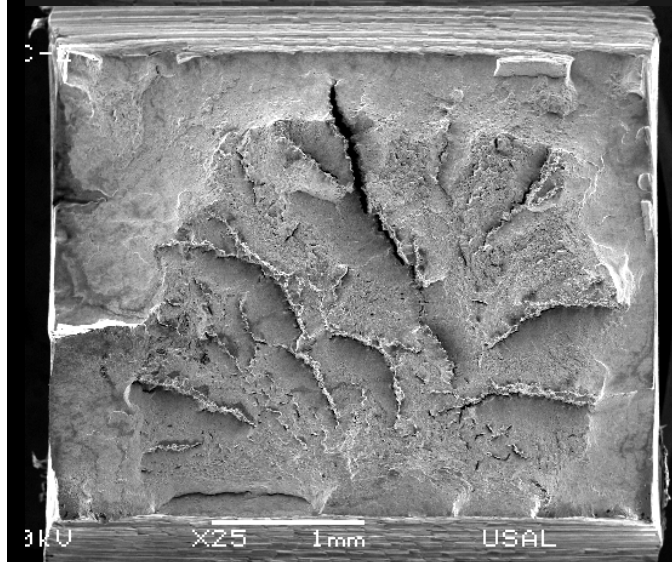
**SUPERFICIES DE FRACTURA DE LA MUESTRA B7-CC**

**B7-CC**

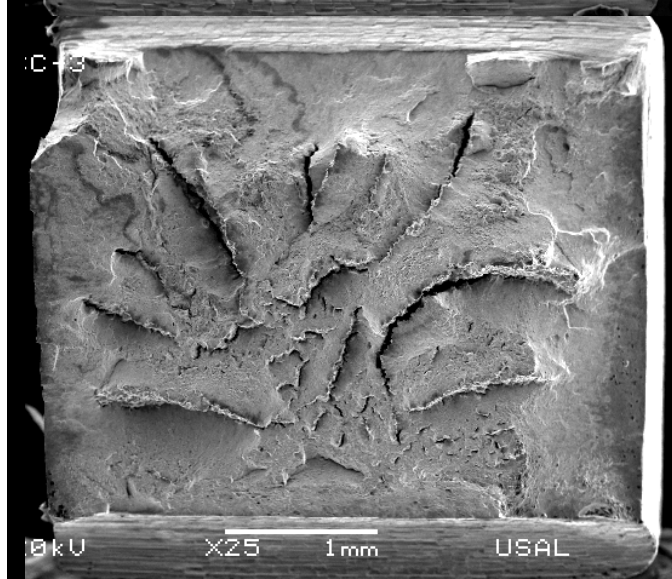
**B7-CC-1**



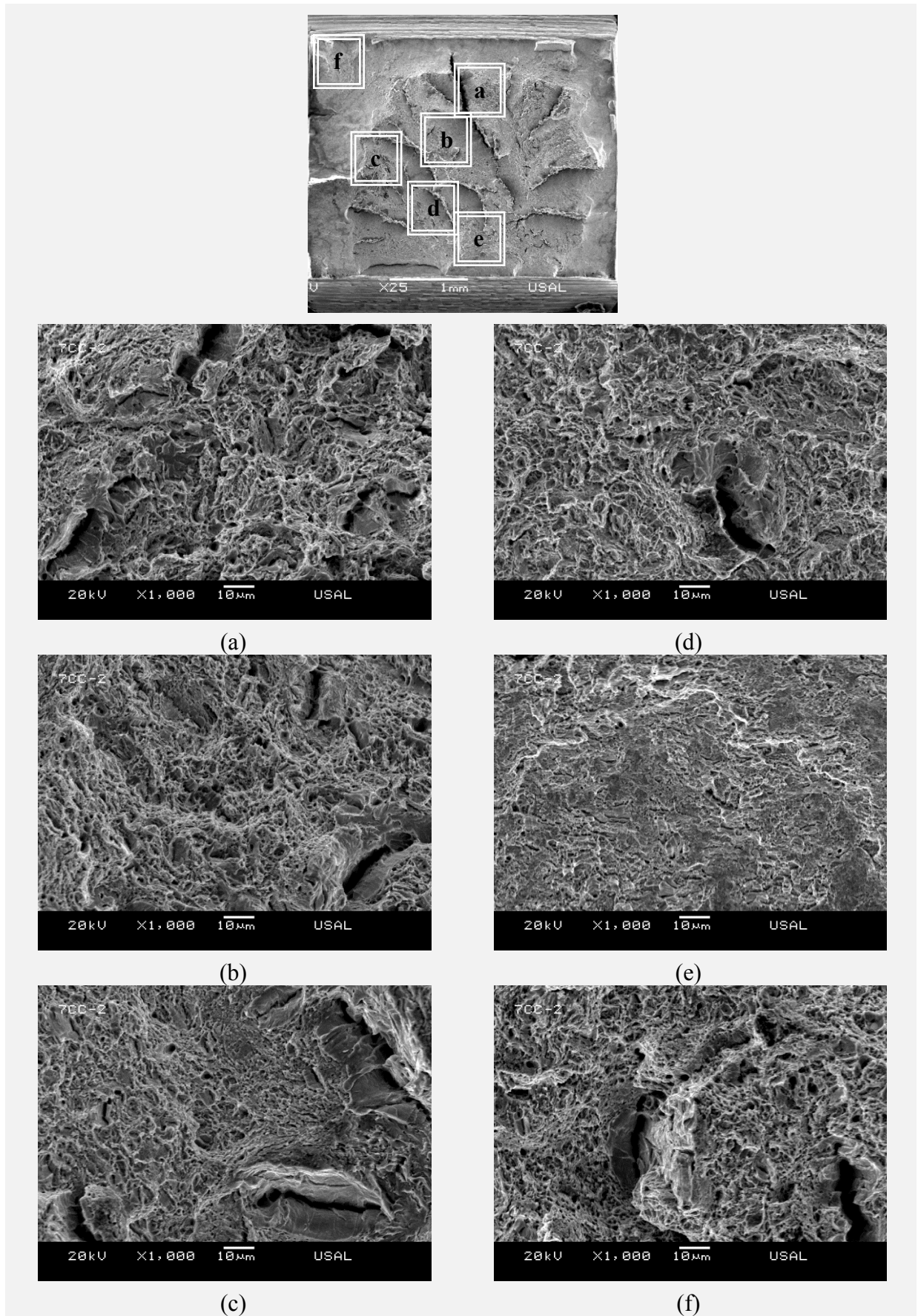
**B7-CC-2**



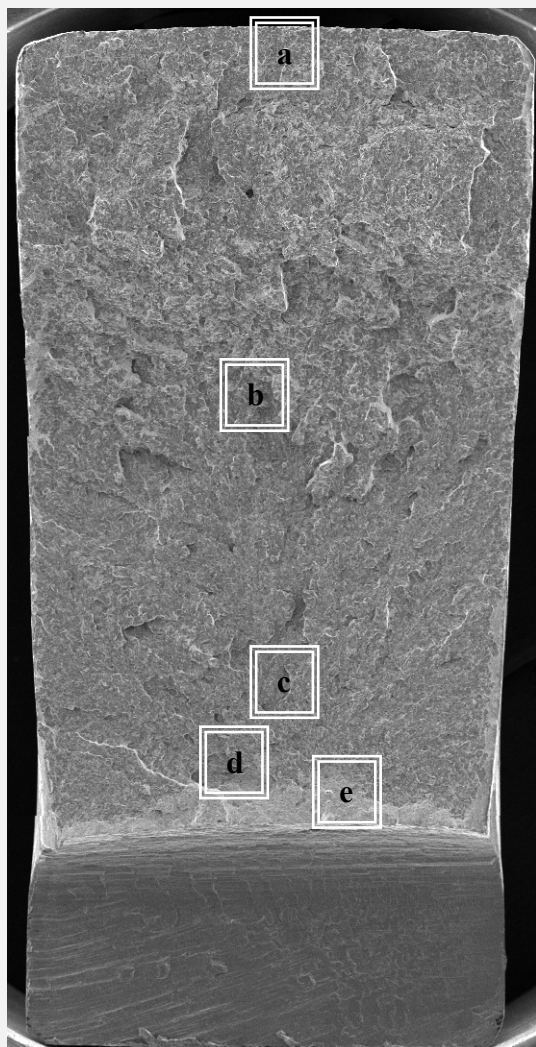
**B7-CC-3**



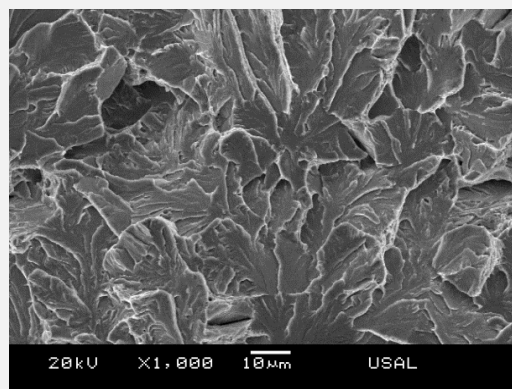
ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B7-CC-2



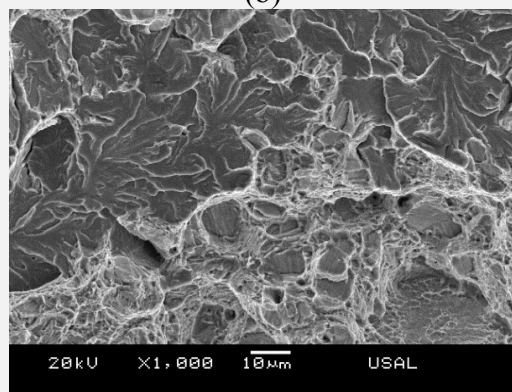
### ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B0-A-1



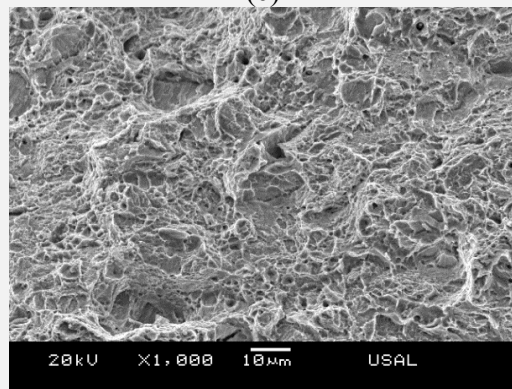
*Probeta B0-A-1*



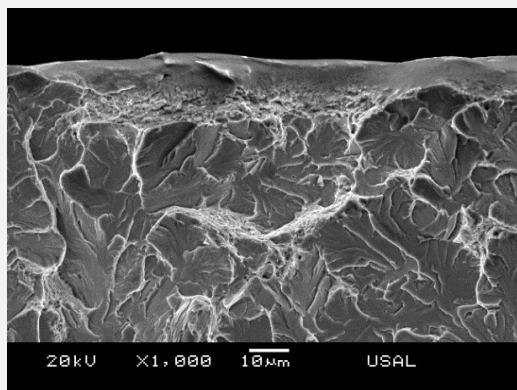
(b)



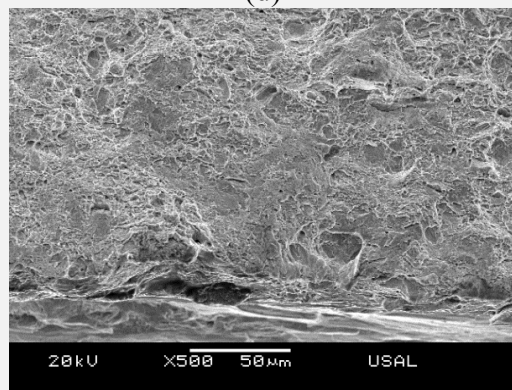
(c)



(d)

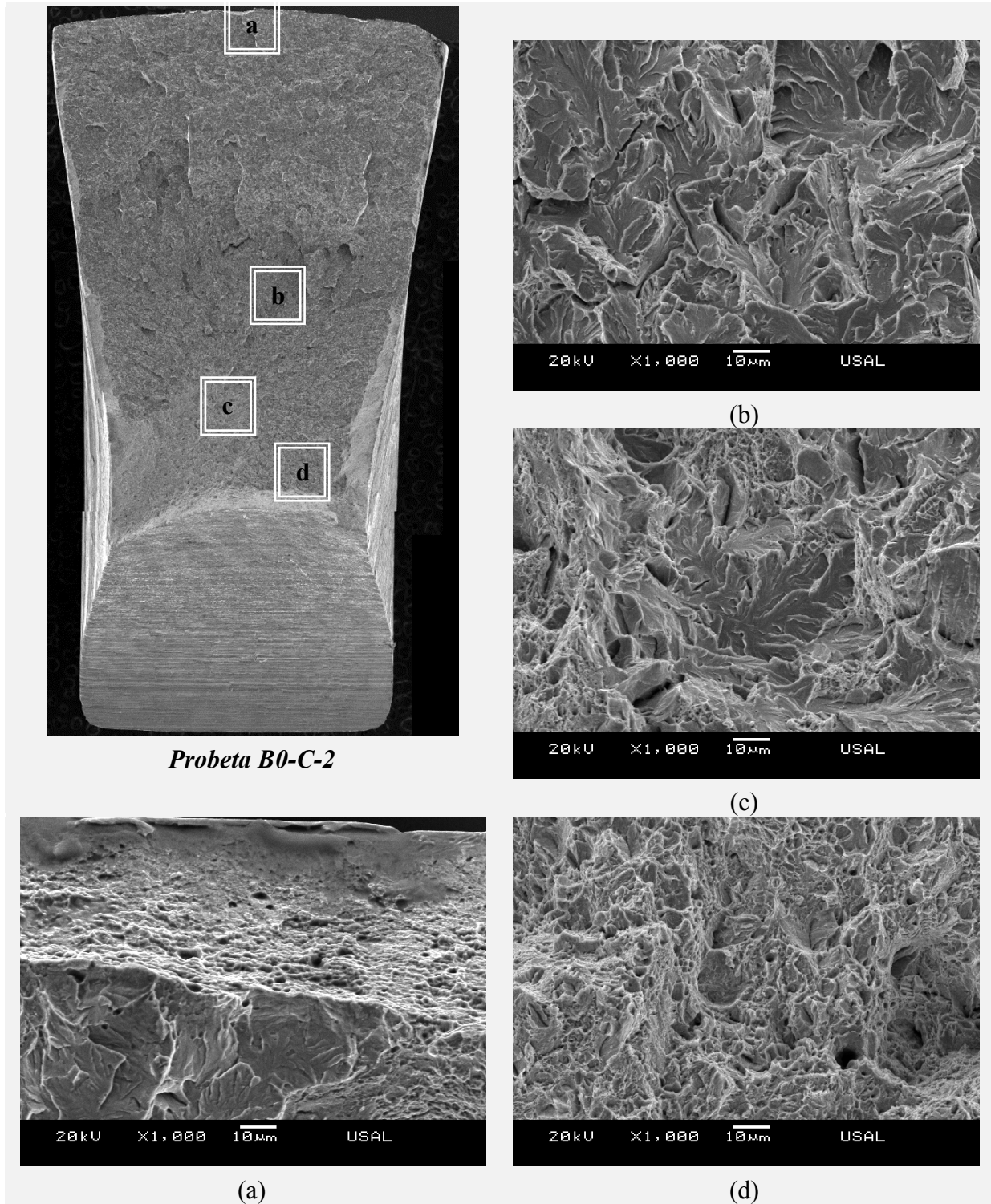


(a)

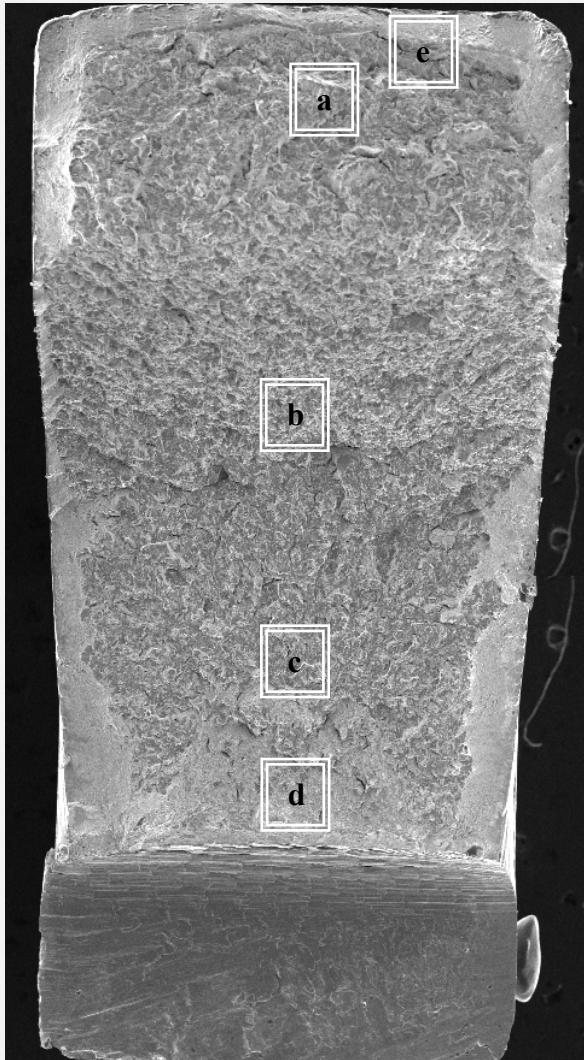


(e)

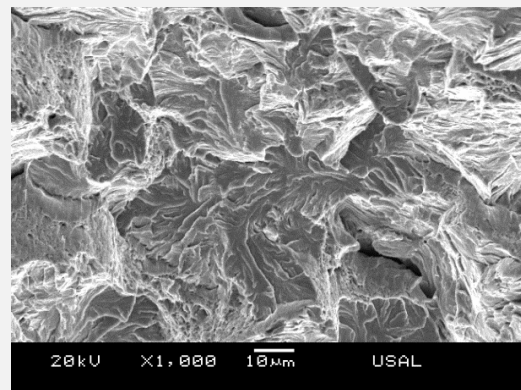
**ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B0-C-2**



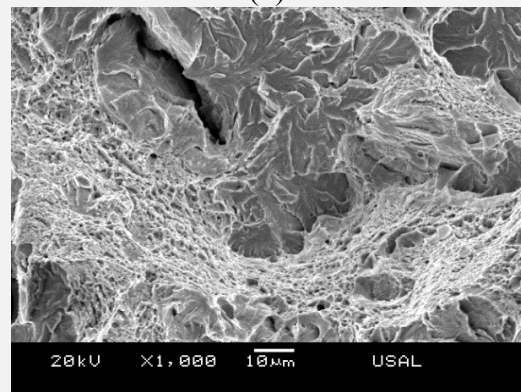
### ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B4-A-2



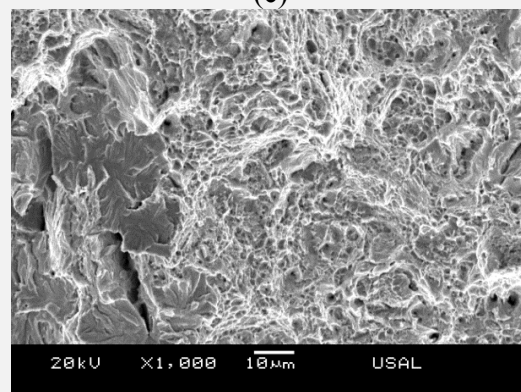
*Probeta B4-A-2*



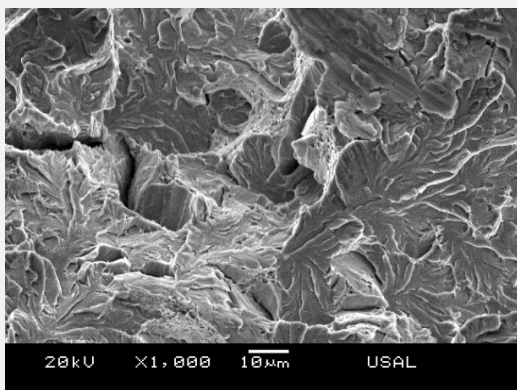
(b)



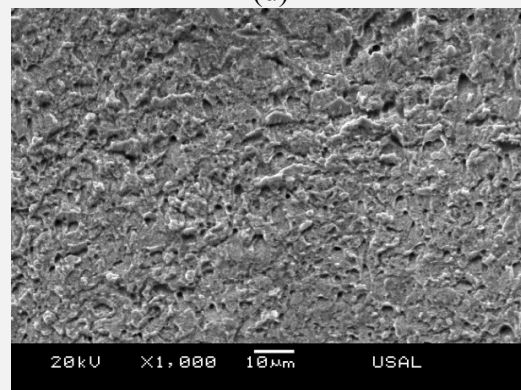
(c)



(d)



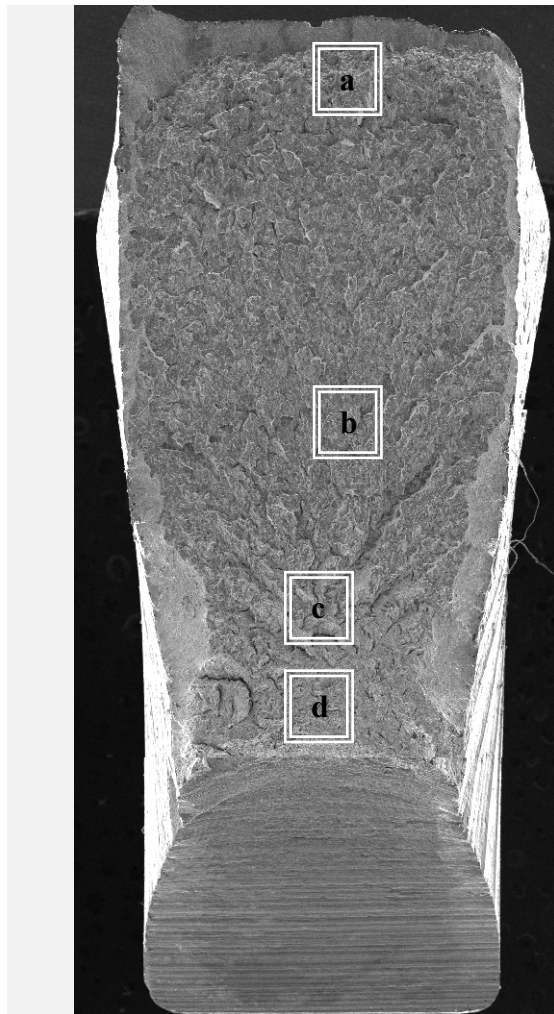
(a)



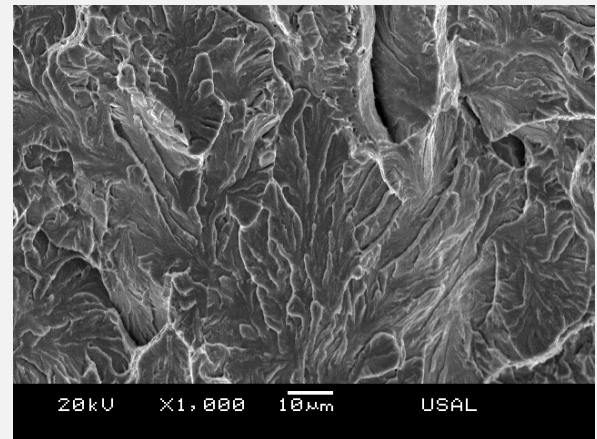
(e)



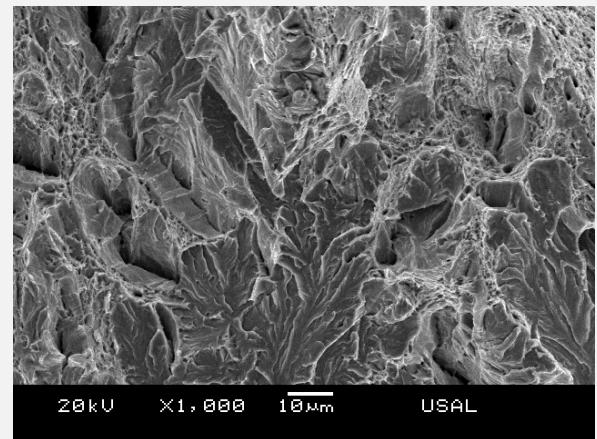
**ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B4-C-3**



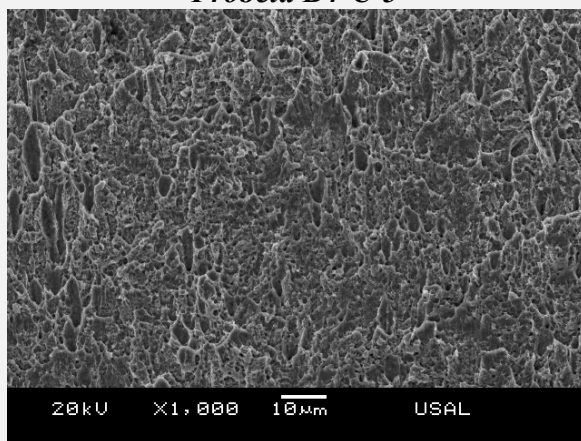
**Probeta B4-C-3**



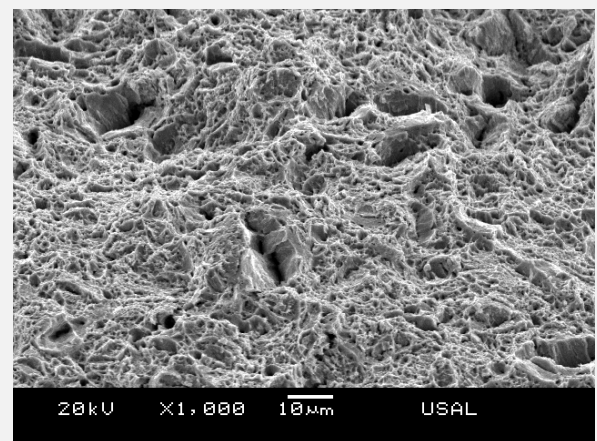
(b)



(c)

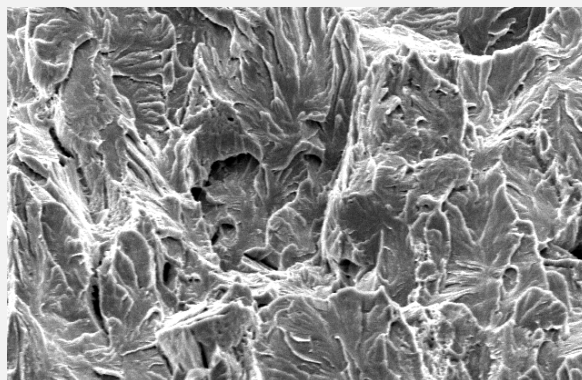


(a)

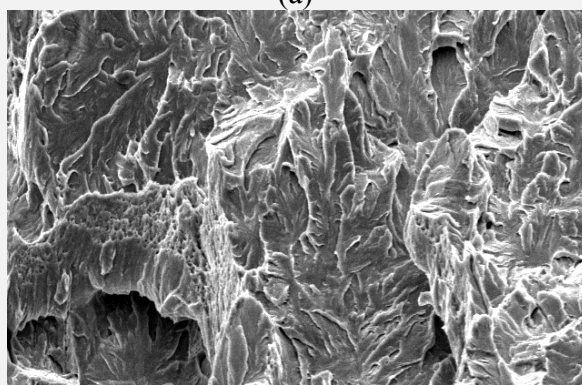


(d)

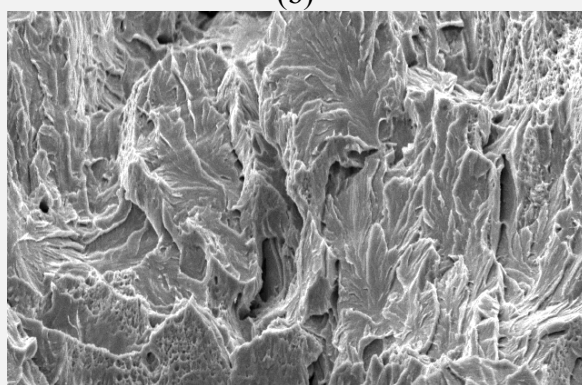
### ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B4-C-3



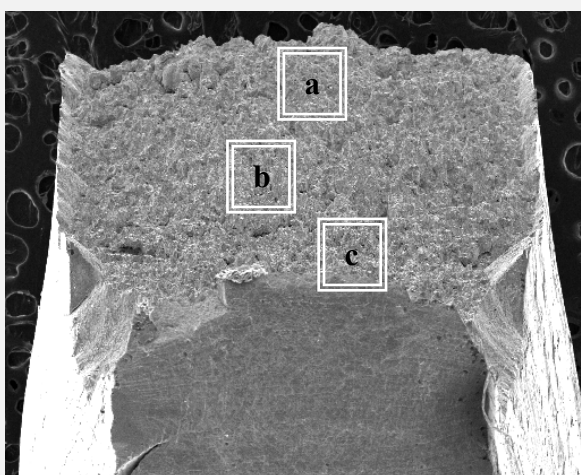
(a)



(b)

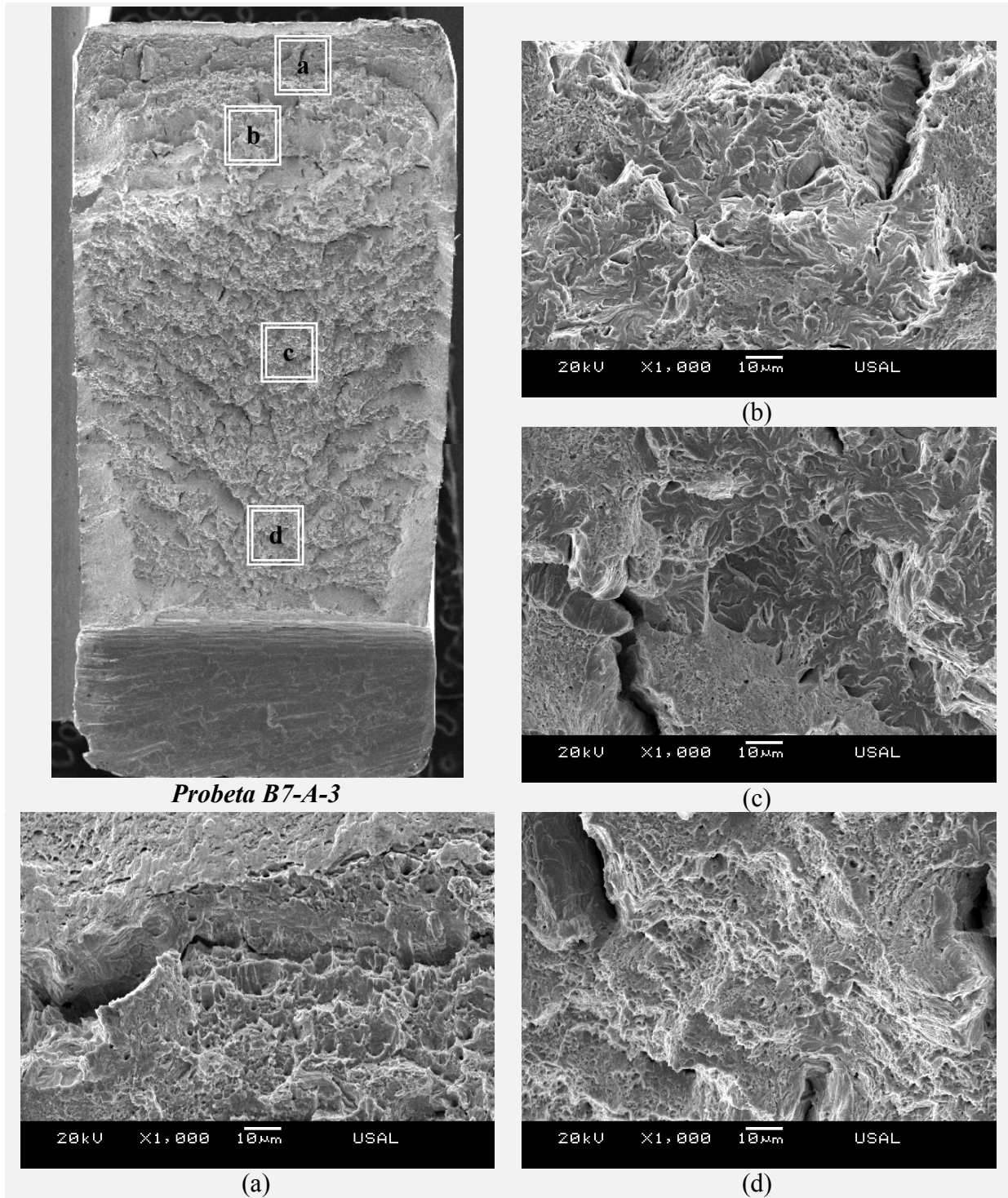


(c)

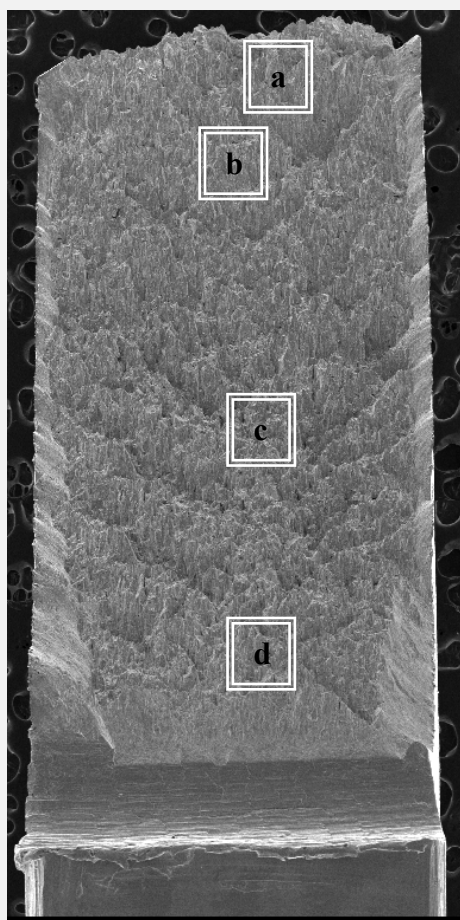


*Sección de perfil de la probeta B4-C-3*

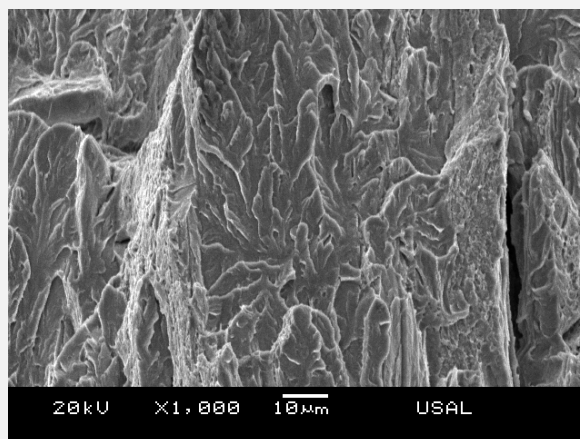
**ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B7-A-3**



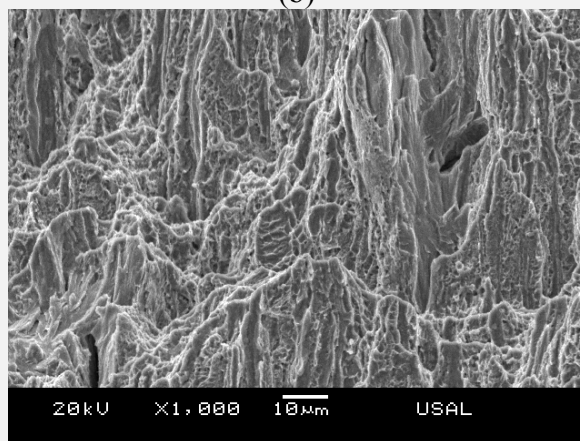
### ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B7-A-3



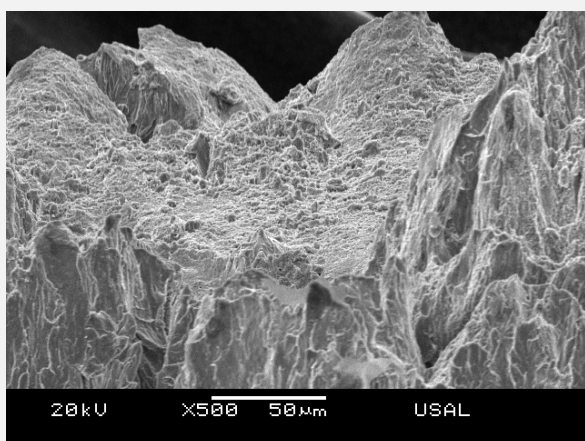
*Sección de perfil B7-A-3*



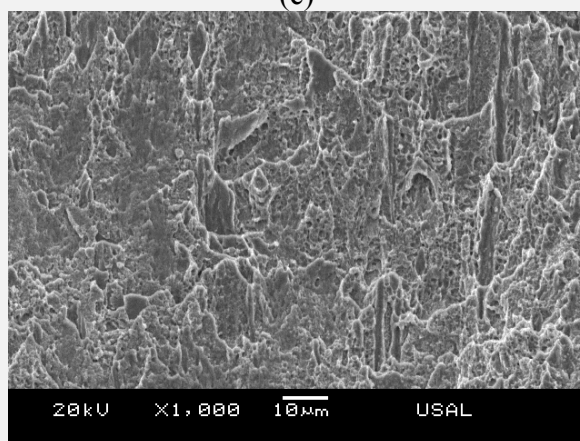
(b)



(c)

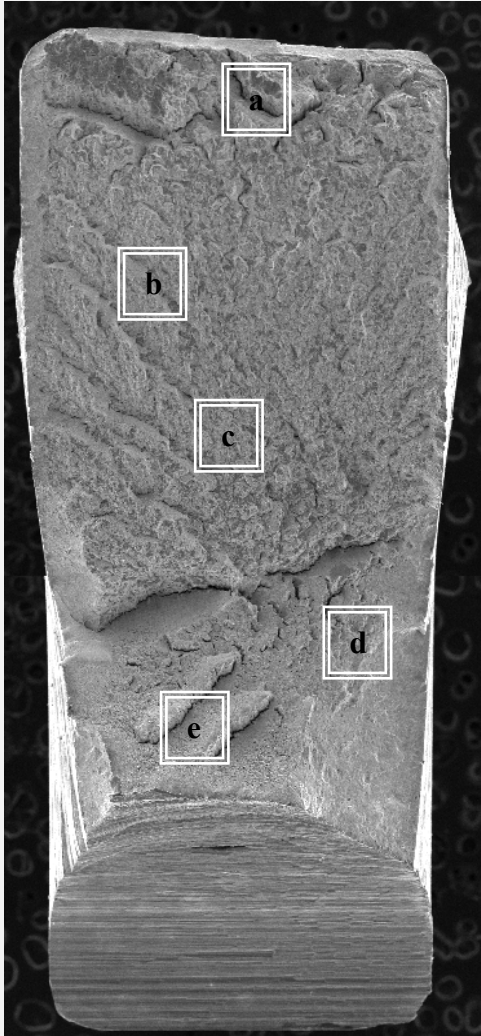


(a)

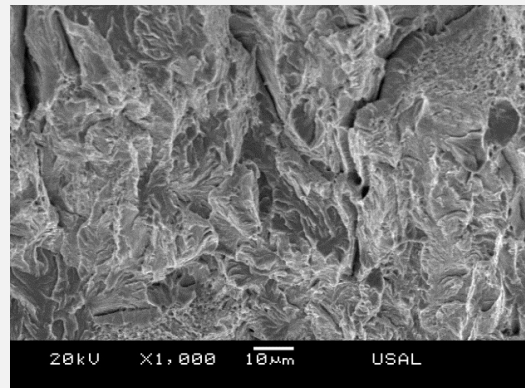


(d)

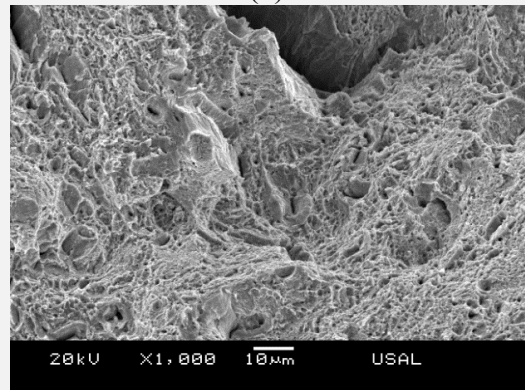
**ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B7-C-3**



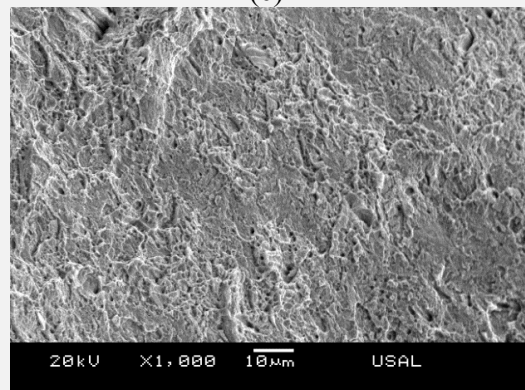
***Probeta B7-C-3***



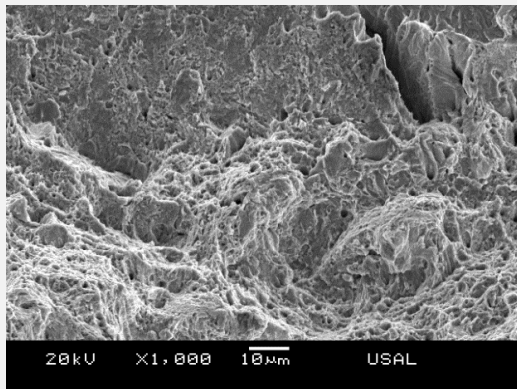
**(b)**



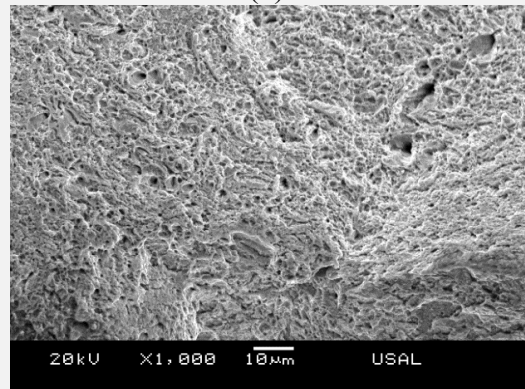
**(c)**



**(d)**

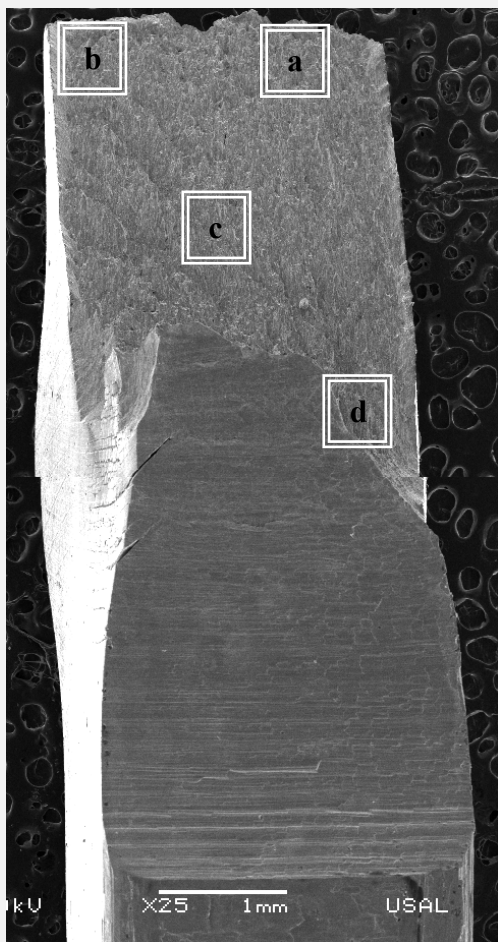


**(a)**

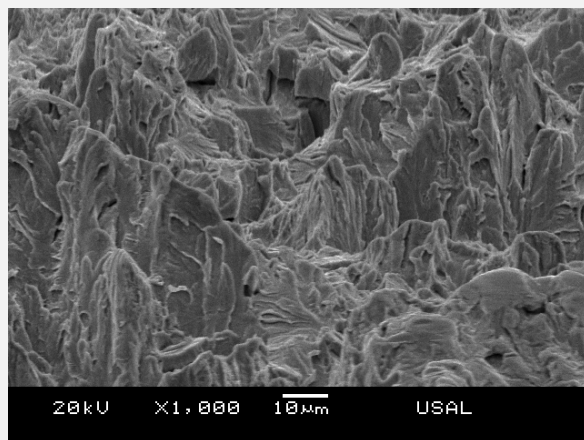


**(e)**

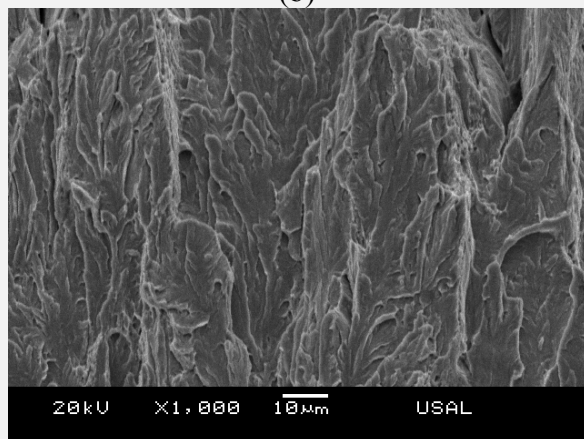
### ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA PROBETA B7-C-3.



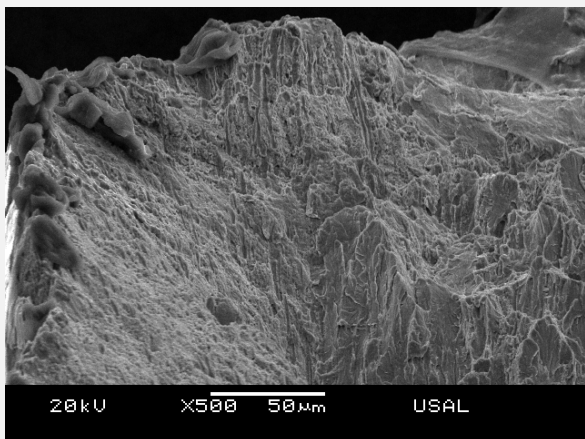
*Sección de perfil B7-C-3*



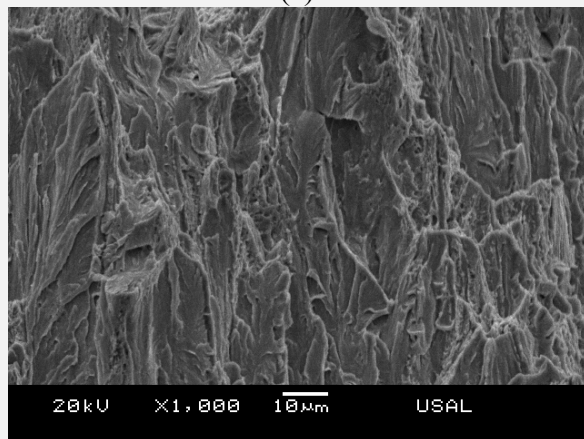
(b)



(c)



(a)

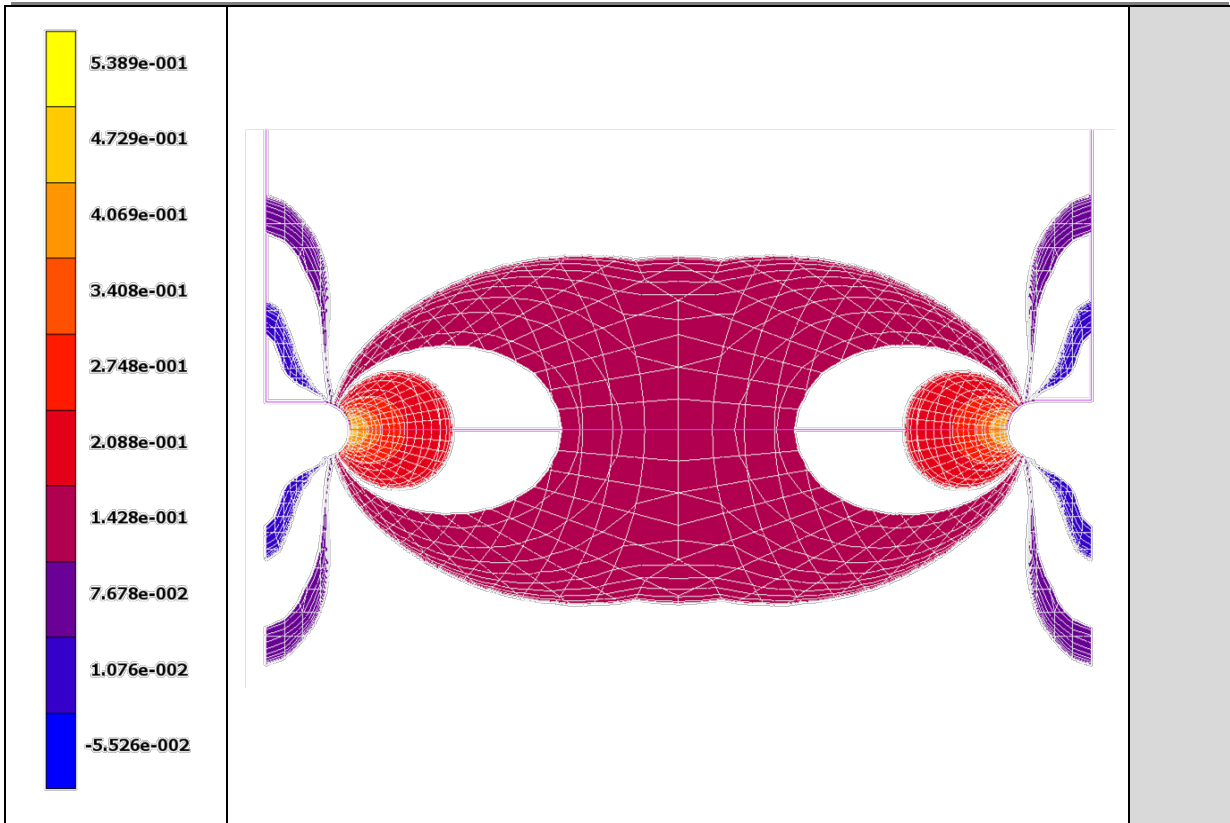


(d)

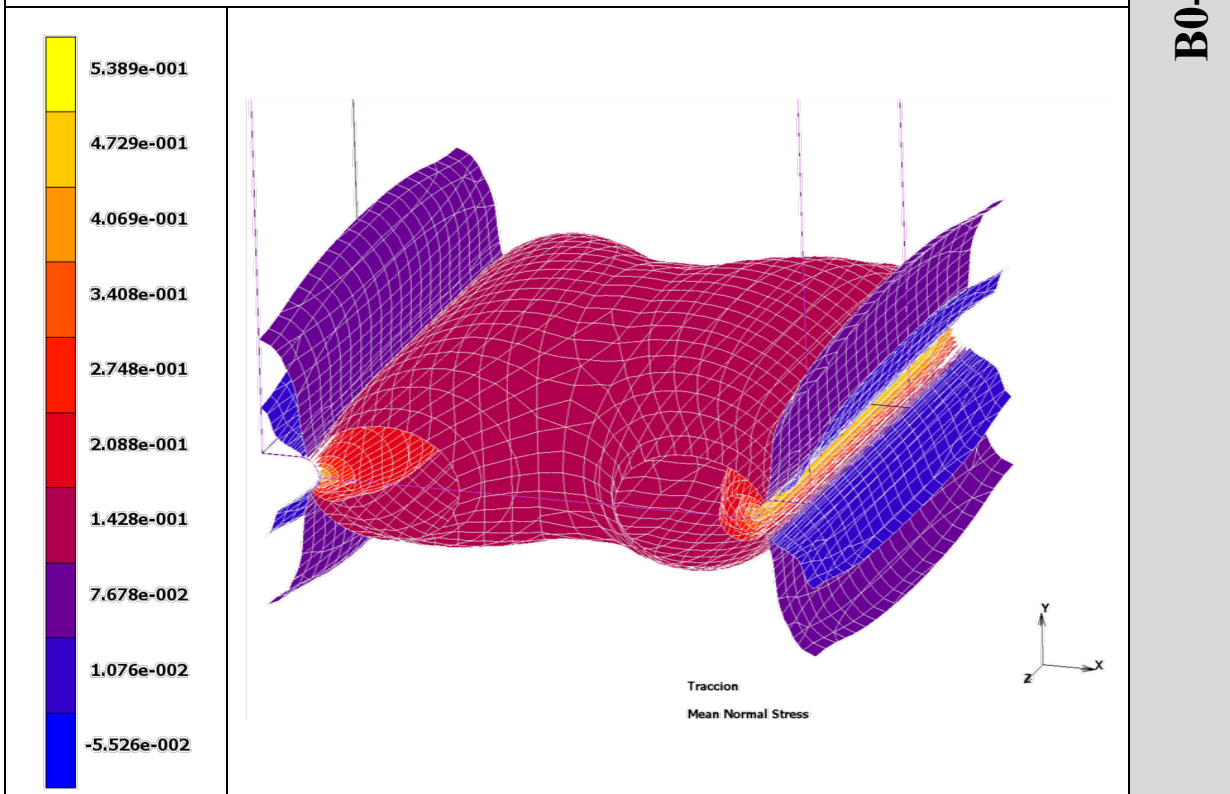
**ANEXO II: CAMPOS DE TENSIÓN  
HIDROSTÁTICA, DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN  
HIDROSTÁTICA Y DESPLAZAMIENTO EN LOS  
FONDOS DE ENTALLA**

---

### CAMPOS DE TENSIÓN HIDROSTÁTICA



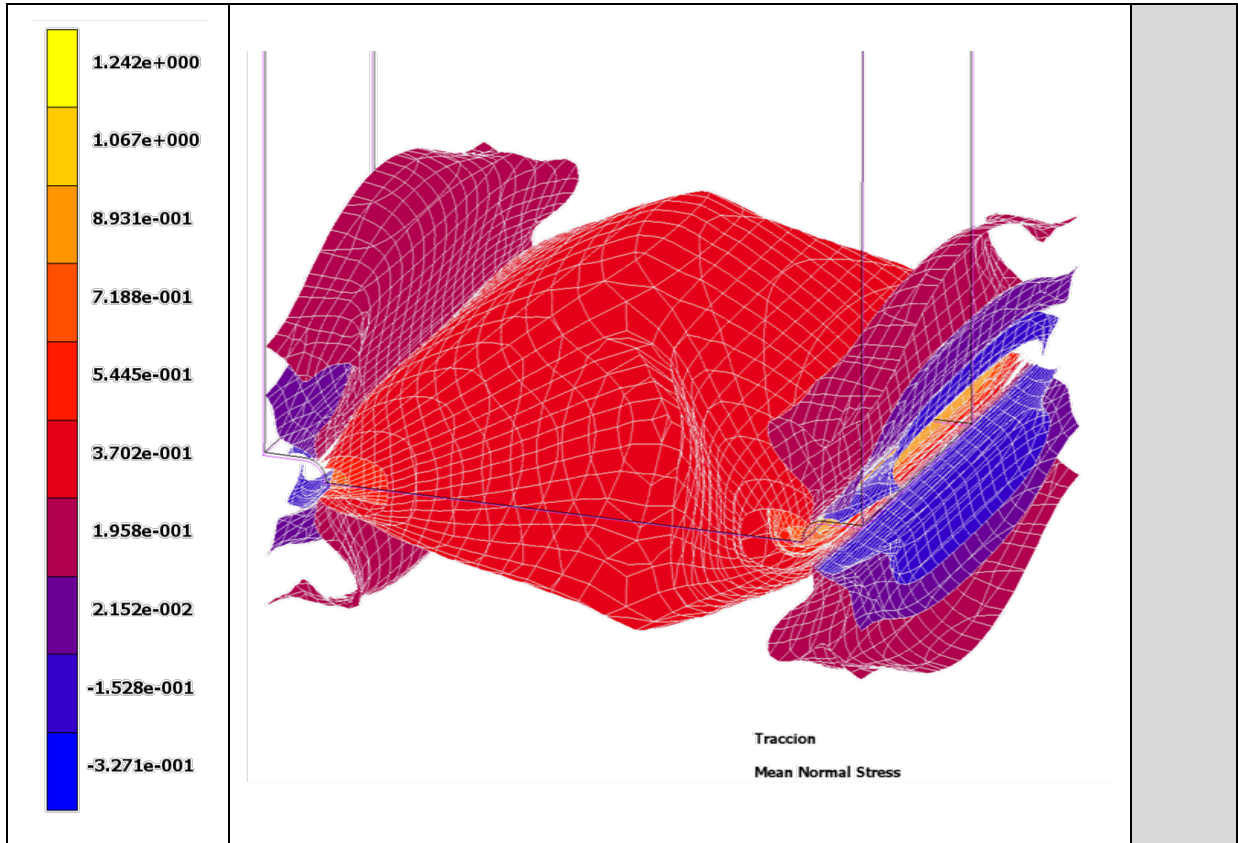
Vista frontal de la Tensión hidrostática en el INC 15, probeta B0-AA.



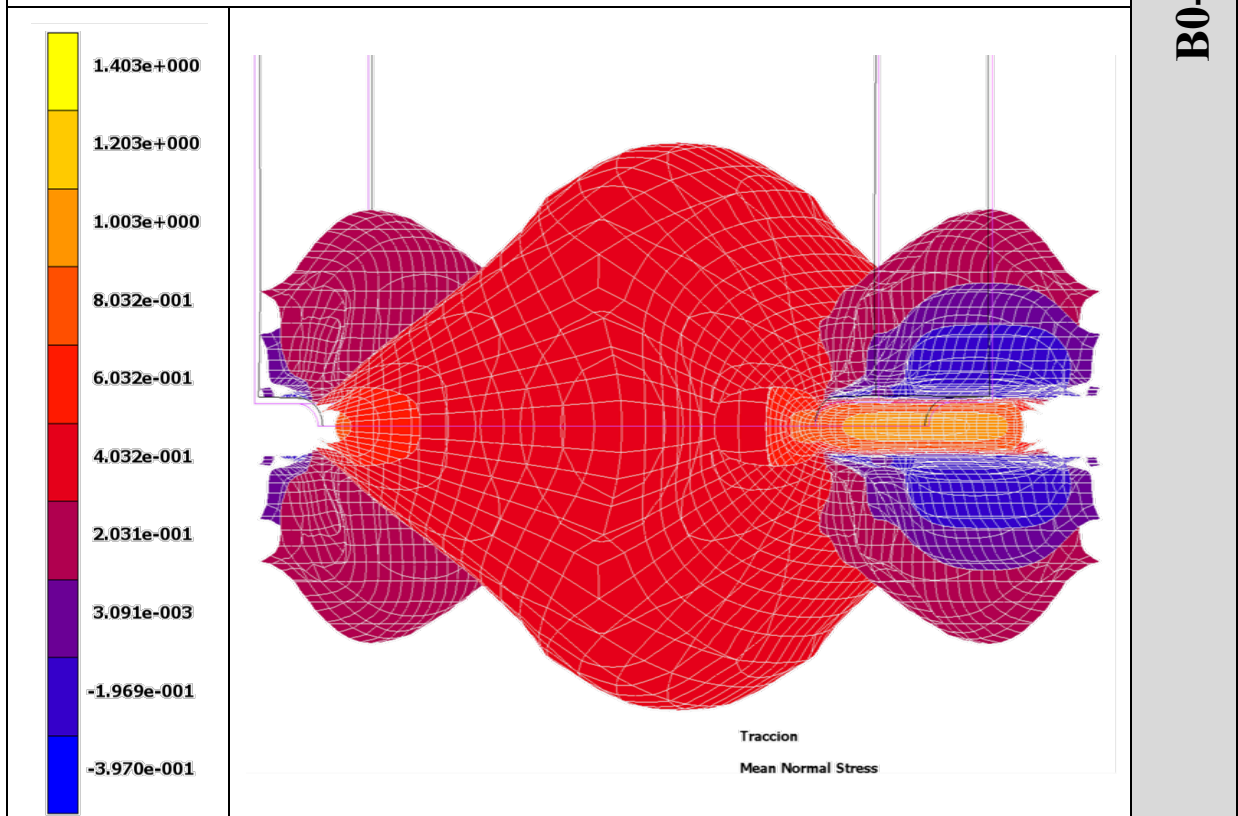
Tensión hidrostática en el INC 15, probeta B0-AA, vista en perspectiva.

**B0-AA**



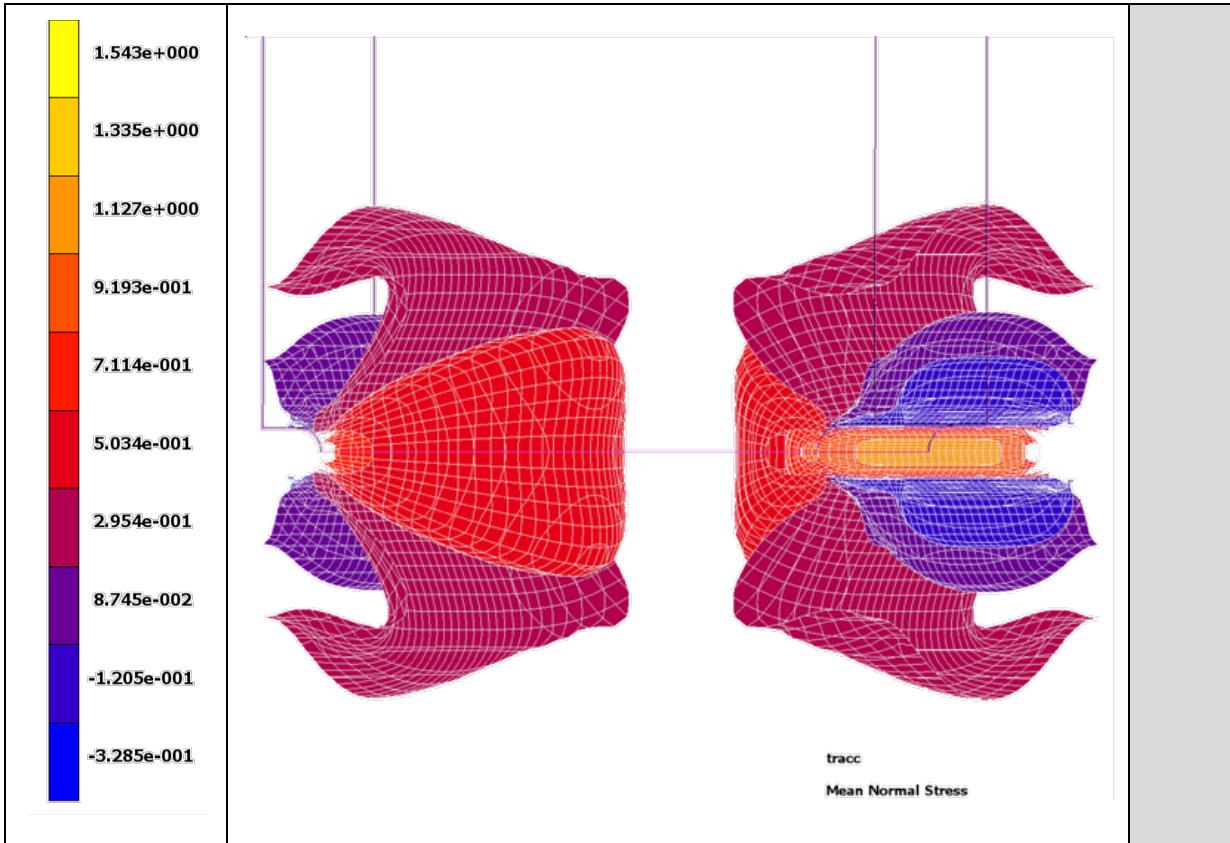


Tensión hidrostática en el INC 102, probeta B0-AA.

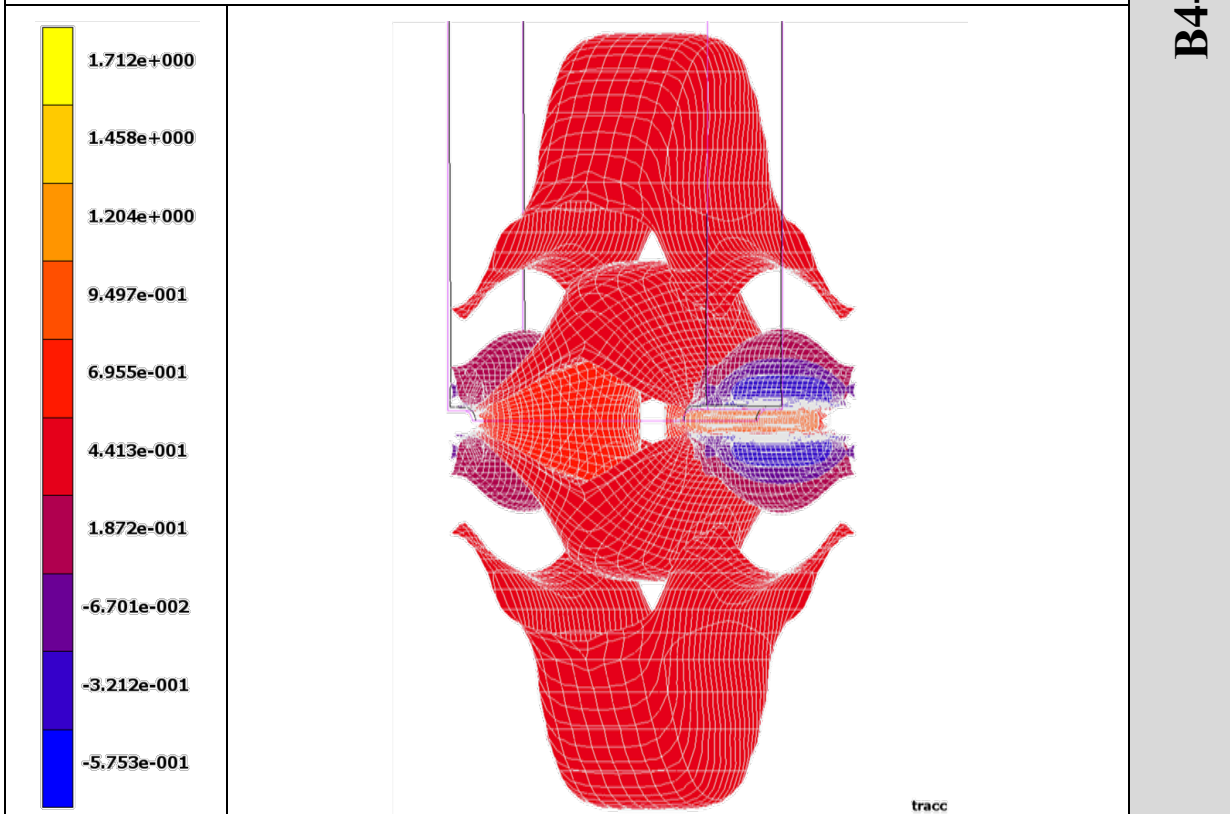


Tensión hidrostática en el INC 200, probeta B0-AA (fractura final).

B0-AA

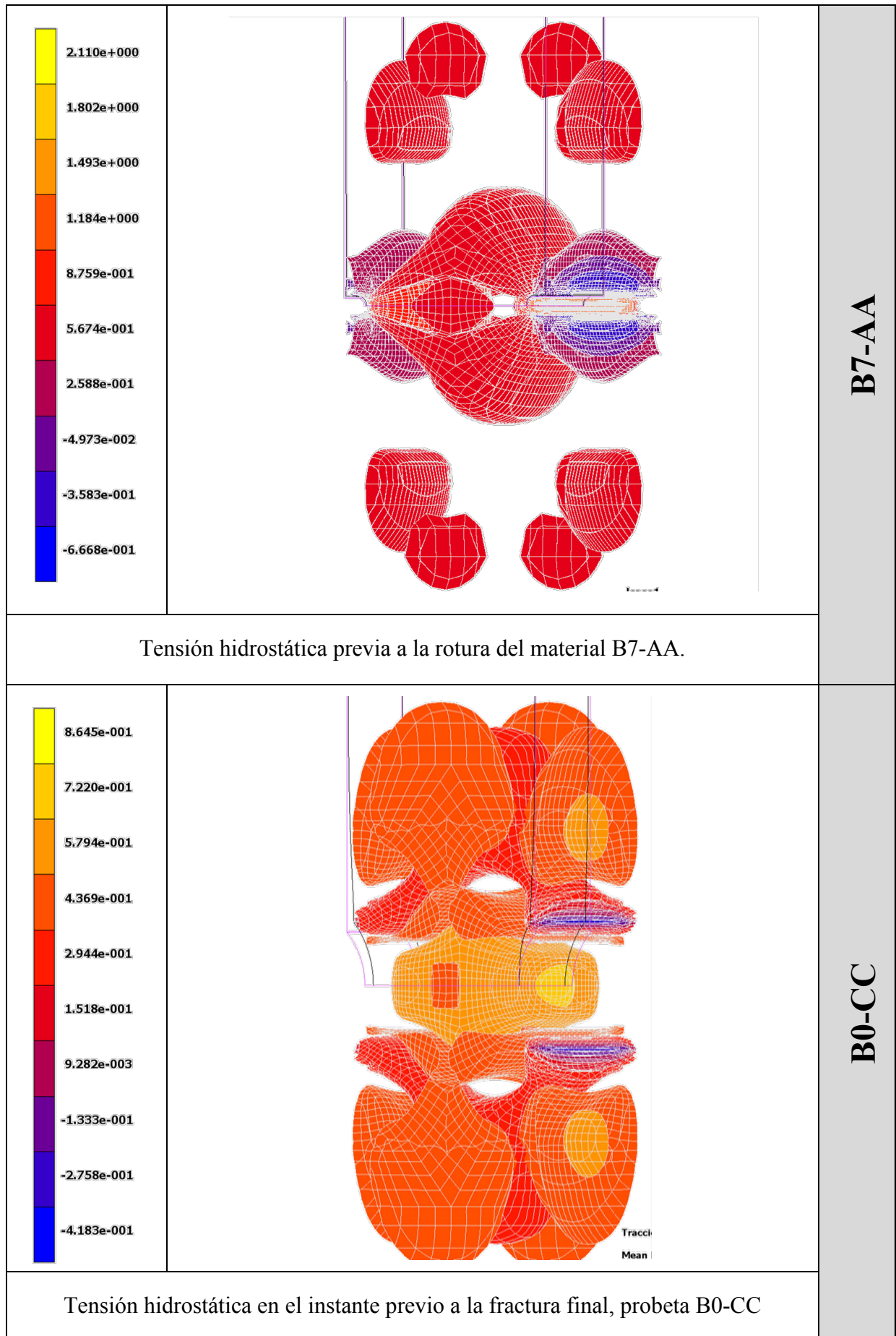


Tensión hidrostática en el INC 82, probeta B4-AA.

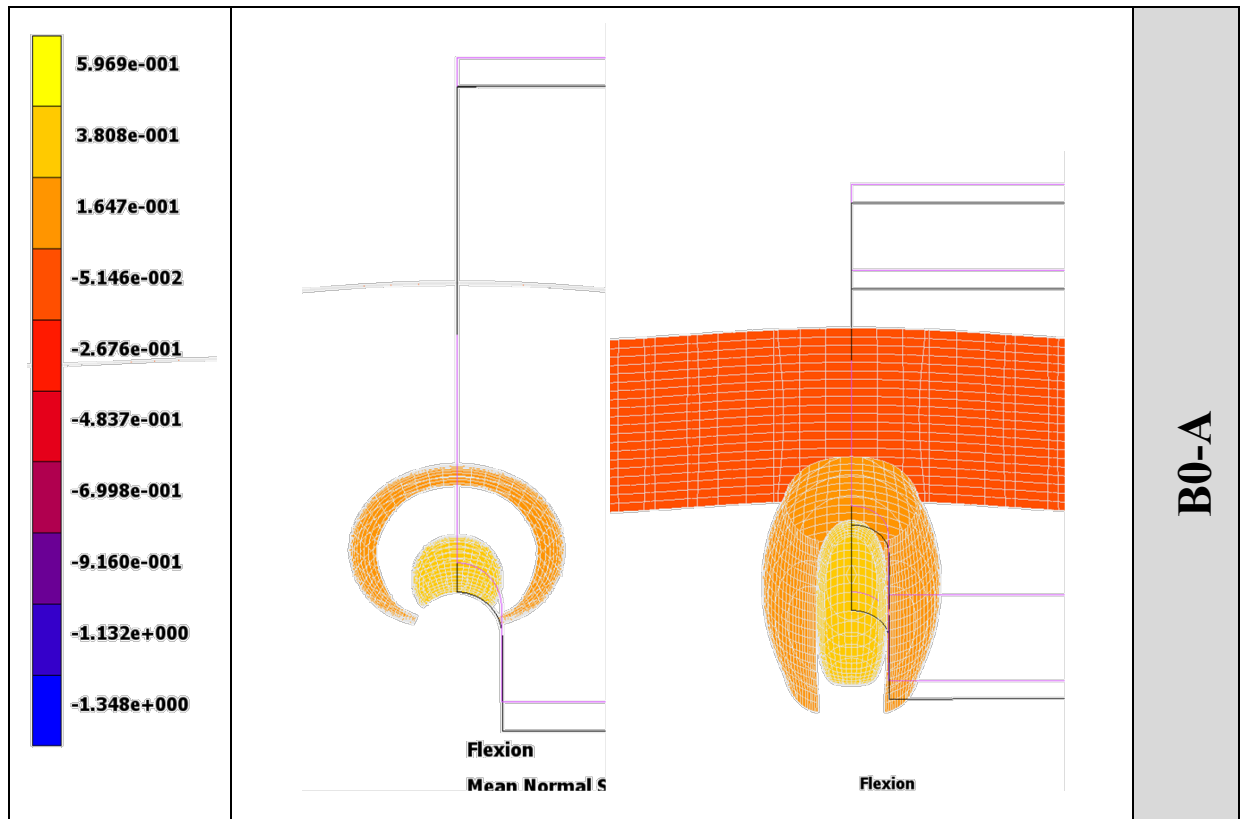


Tensión hidrostática en el INC previo a la rotura del material, probeta B4-AA.

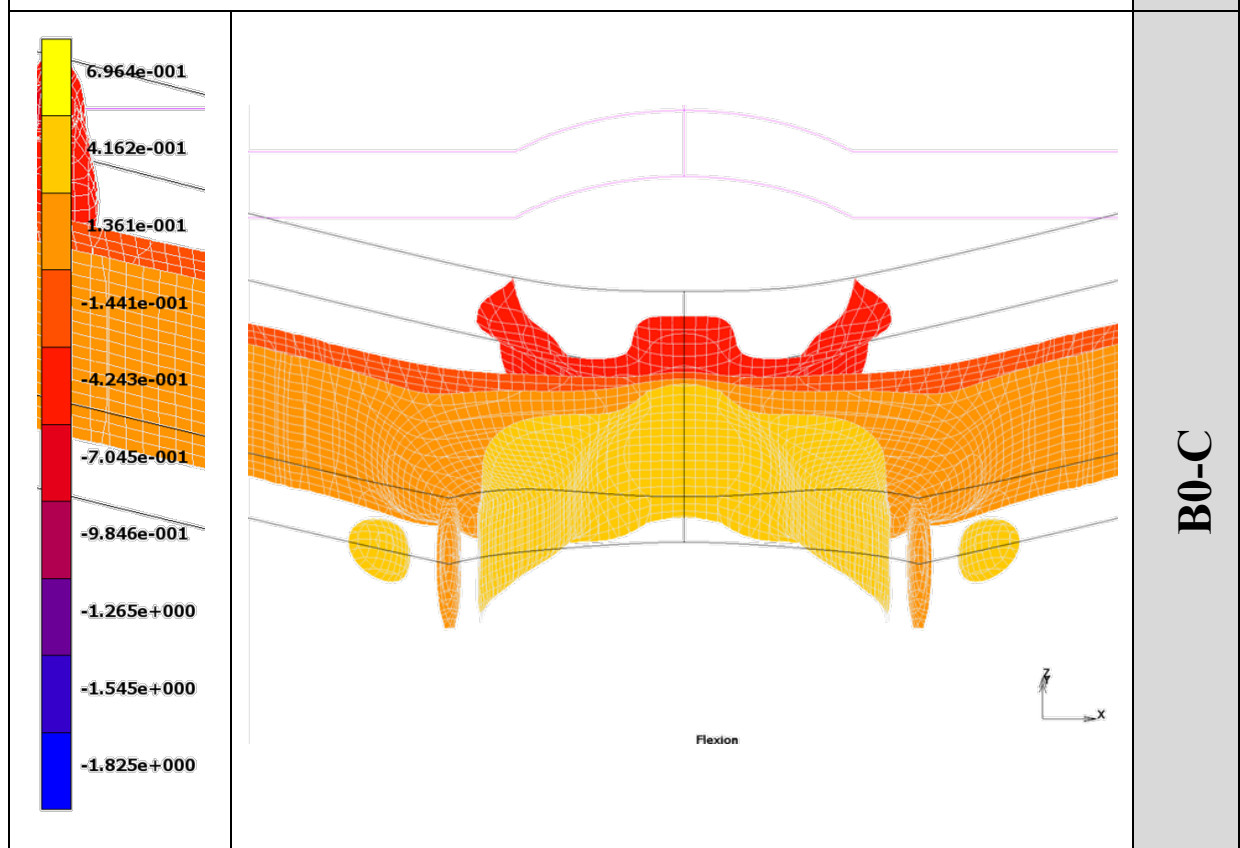
B4-AA



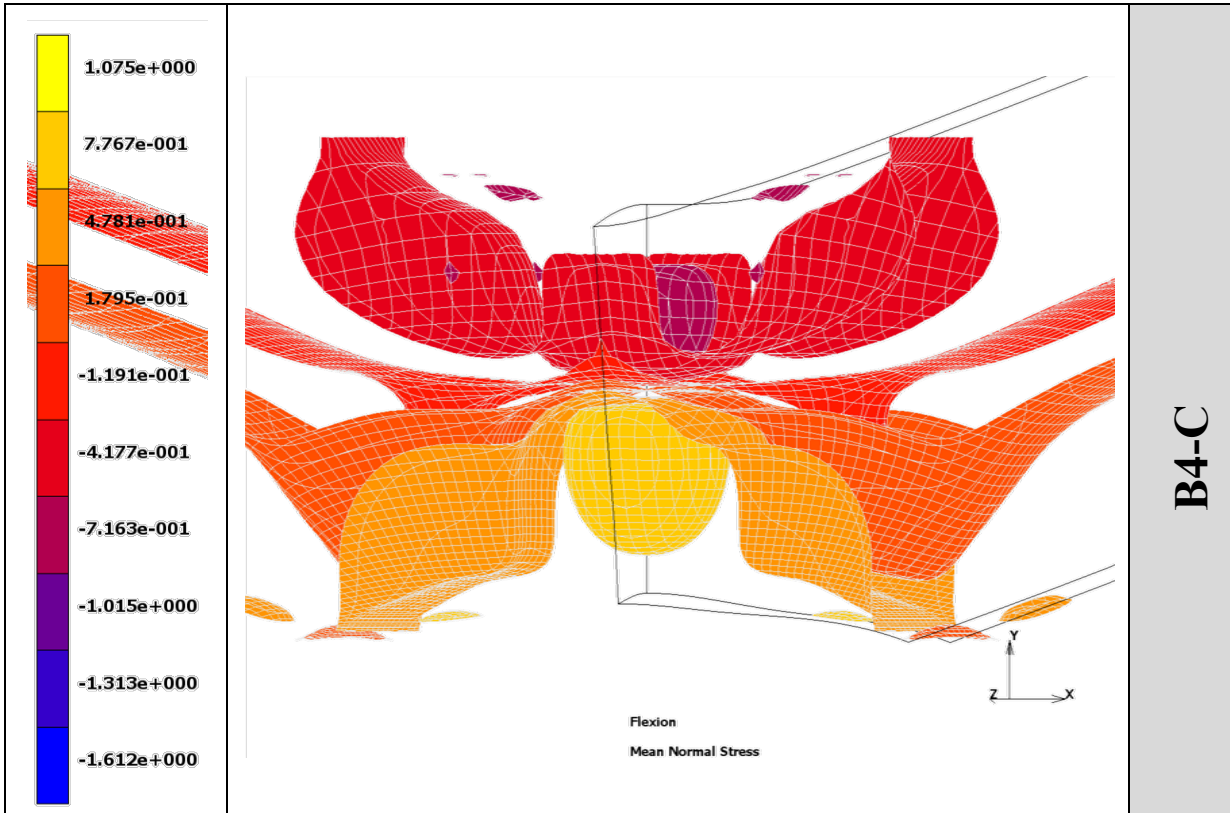
<p>1.283e+000 1.091e+000 9.001e-001 7.088e-001 5.174e-001 3.261e-001 1.347e-001 -5.661e-002 -2.480e-001 -4.393e-001</p>	<p>lcase1</p>	<p><b>B4-CC</b></p>
<p>Distribución de la tensión hidrostática de la probeta B4-CC-3: instante de rotura.</p>		
<p>1.247e+000 1.051e+000 8.557e-001 6.602e-001 4.646e-001 2.690e-001 7.346e-002 -1.221e-001 -3.177e-001 -5.133e-001</p>	<p>lcase1</p>	<p><b>B7-CC</b></p>
<p>Tensión hidrostática, probeta B7-CC, en el instante previo a la fractura final</p>		



Tensión hidrostática en el INC 20, probeta B0-A. Vista dos perspectivas distintas.

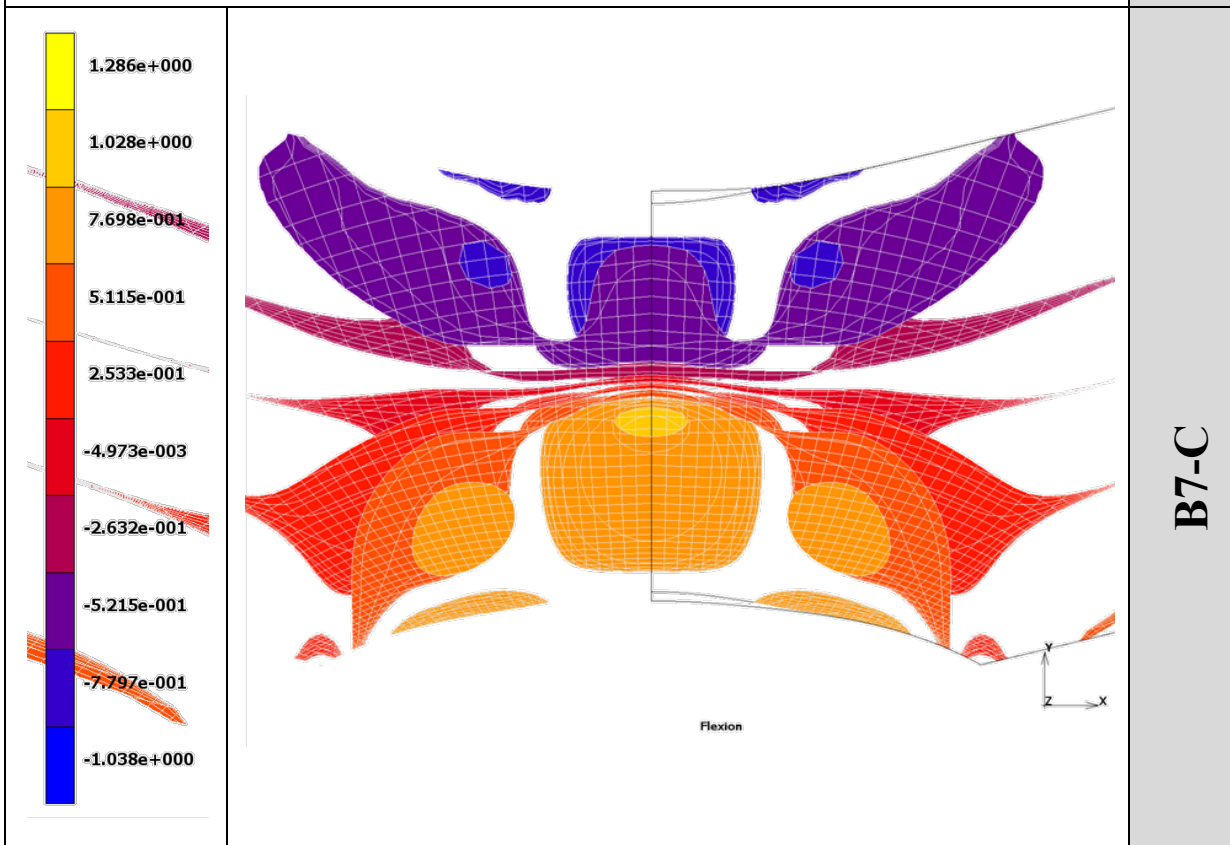


Tensión hidrostática en el instante previo a la rotura de la probeta B0-C.



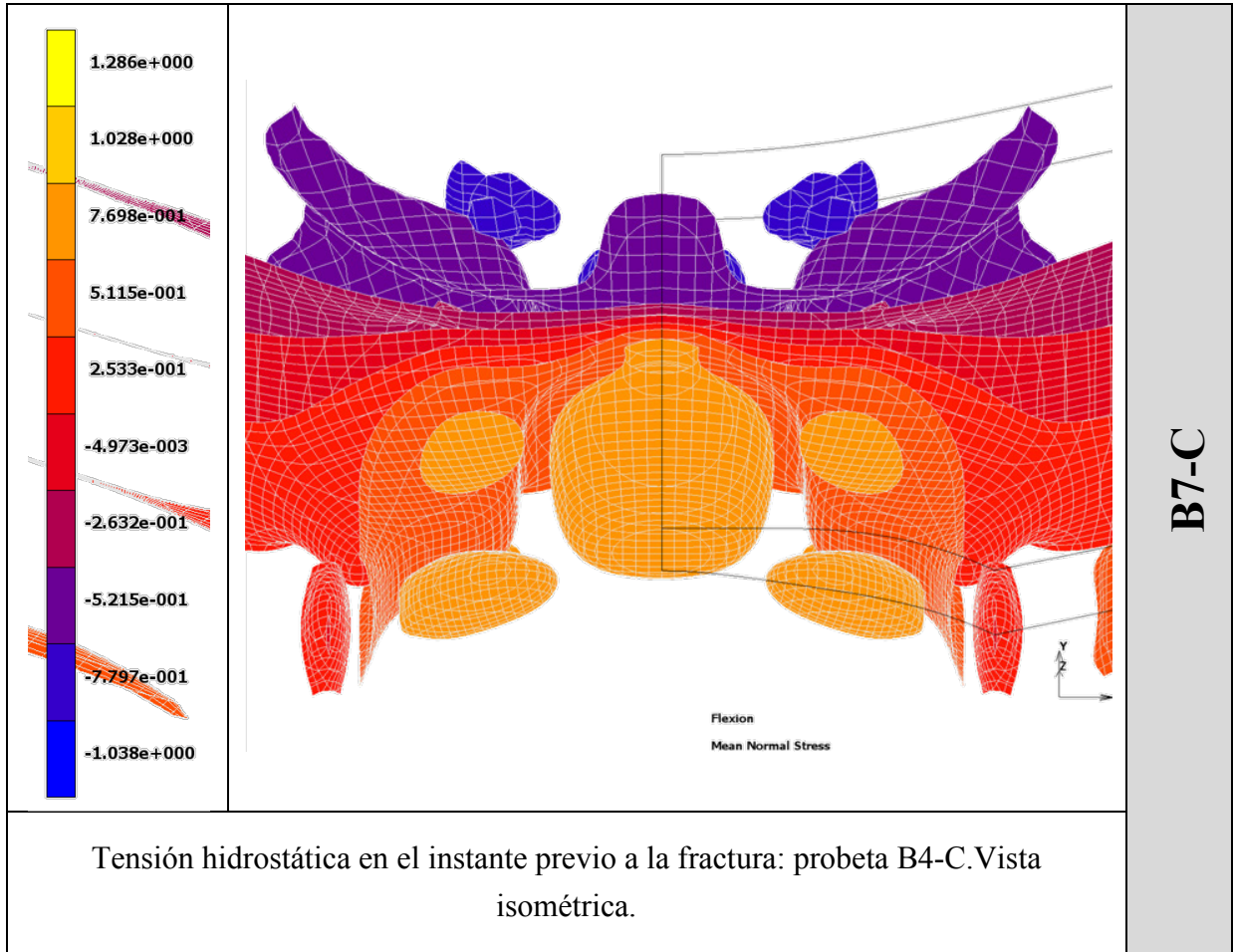
**B4-C**

Tensión hidrostática en el instante previo a la fractura: probeta B4-C.



**B7-C**

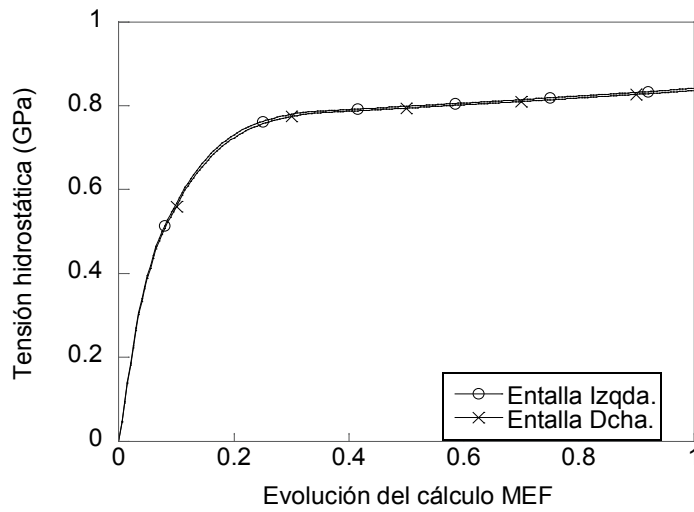
Tensión hidrostática en el instante previo a la rotura de la probeta B7-C *Vista frontal*.



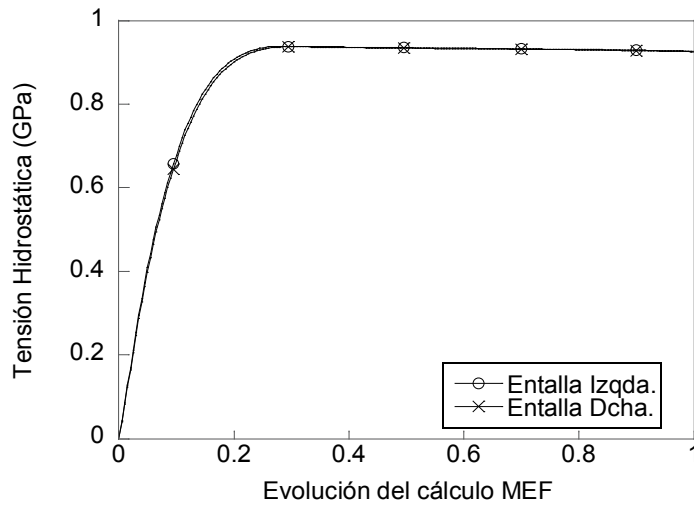
**EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN HIDROSTÁTICA Y EL DESPLAZAMIENTO  
EN LOS FONDOS DE ENTALLA**

---

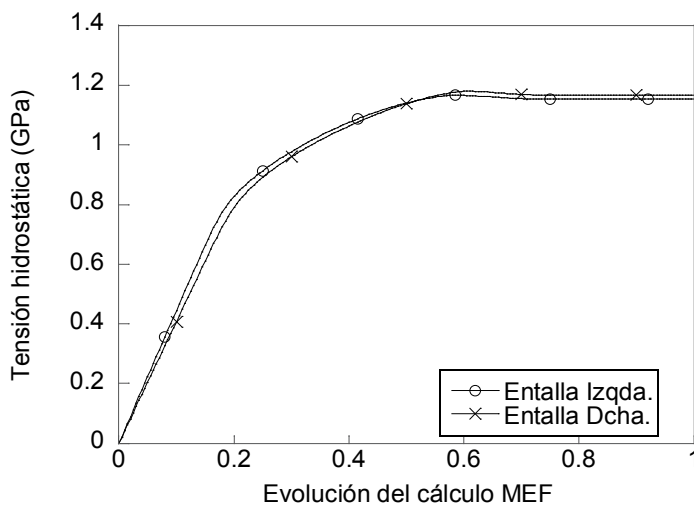




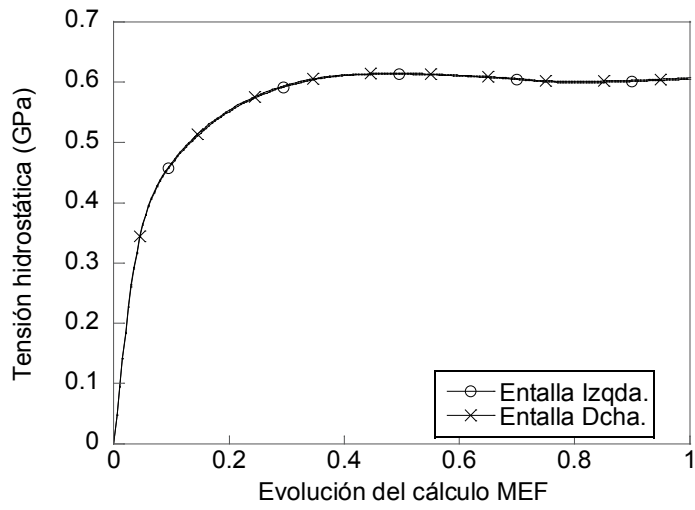
Evolución de la tensión hidrostática: fondo de entalla, probeta B0-AA.



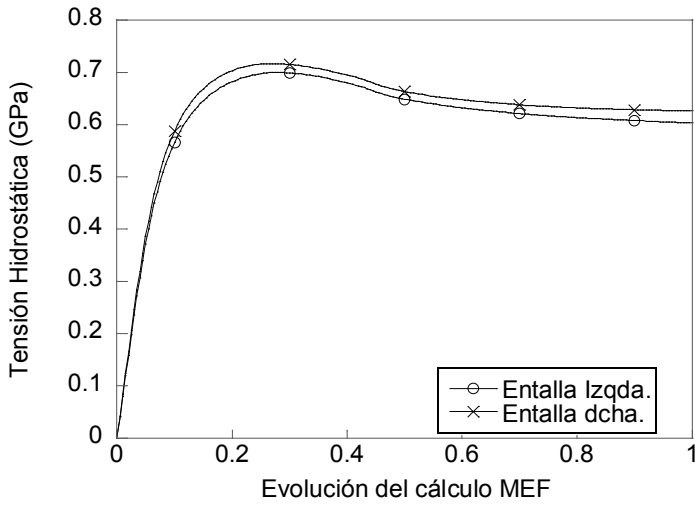
Evolución de la tensión hidrostática: fondo de entalla, probeta B4-AA.



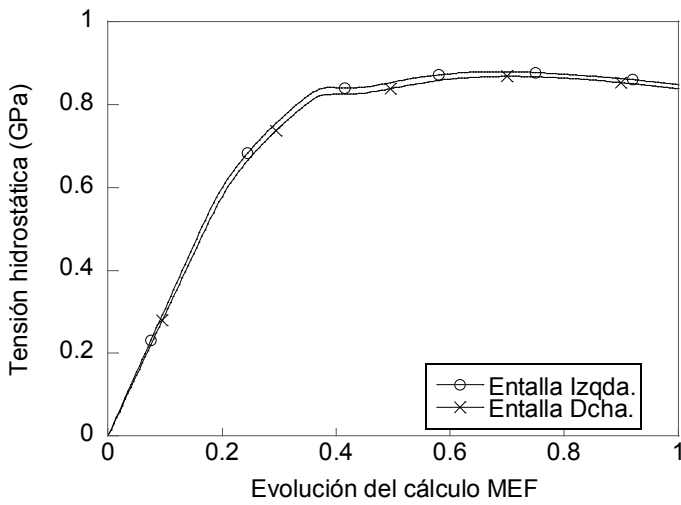
Evolución de la tensión hidrostática: fondo de entalla, probeta B7-AA.



Evolución de la tensión hidrostática: fondo de entalla, probeta B0-CC.

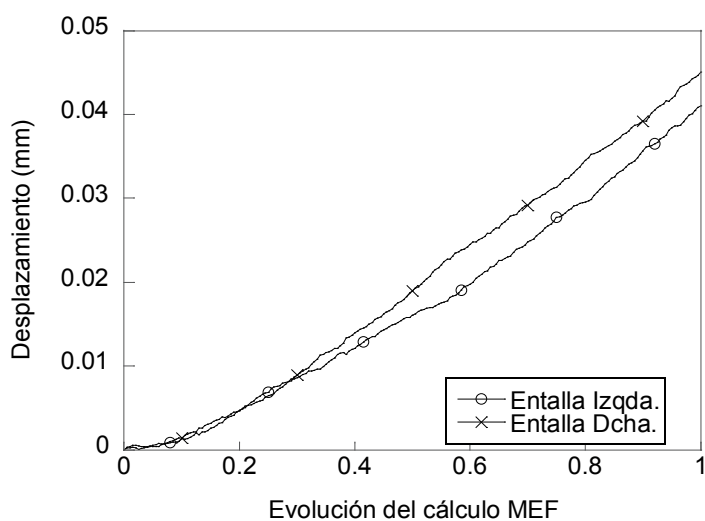


Evolución de la tensión hidrostática: fondo de entalla, probeta B4-CC.

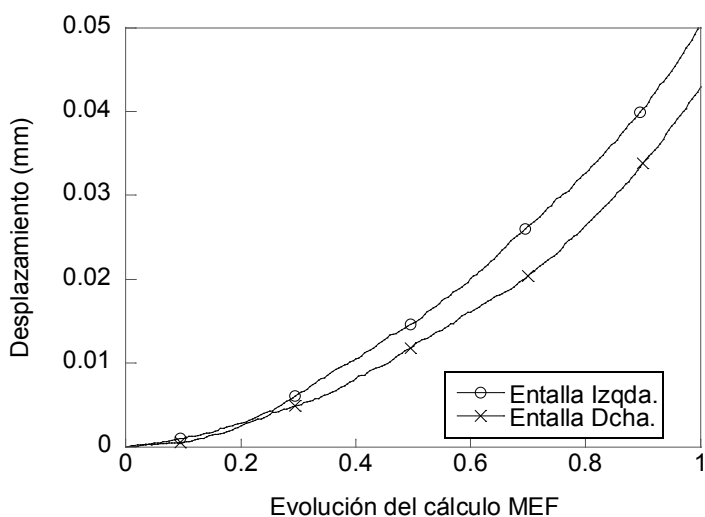


Evolución de la tensión hidrostática: fondo de entalla, probeta B7-CC.

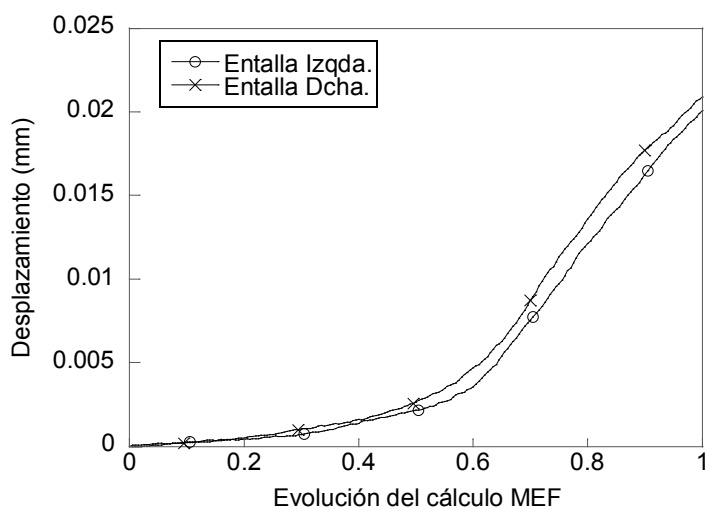
**B-CC**



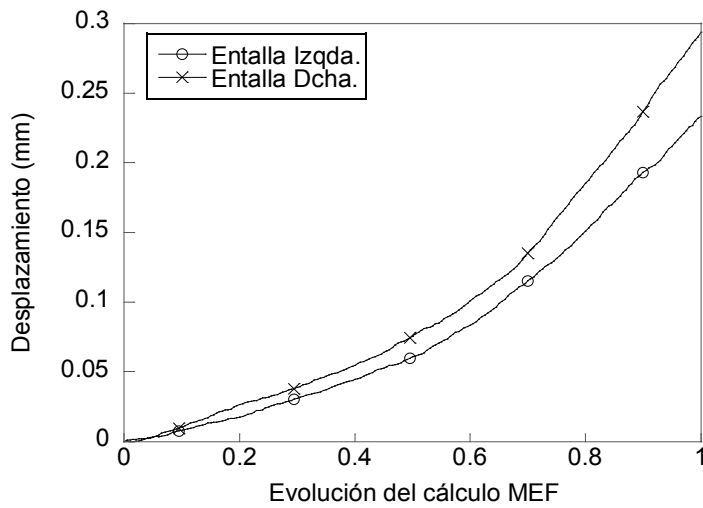
Evolución de los desplazamientos: fondo de entalla, probeta B0-AA.



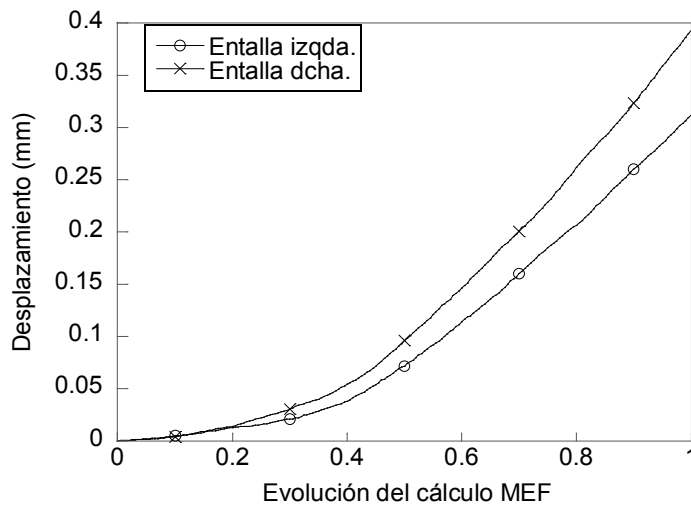
Evolución de los desplazamientos: fondo de las entallas, probeta B4-AA.



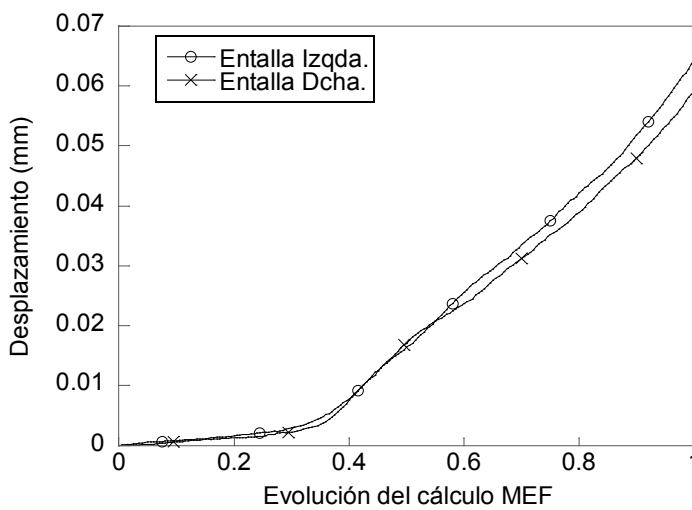
Evolución de los desplazamientos: fondo de entalla, probeta B7-AA.



Evolución de los desplazamientos: fondo de entalla, probeta B0-CC.



Evolución de los desplazamientos: fondo de entalla, probeta B4-CC.



Evolución de los desplazamientos: fondo de entalla, probeta B7-CC.

**ANEXO III: DISTRIBUCIÓN DE LAS  
VARIABLES PRINCIPALES A LO LARGO DEL  
PERFÍL DEL FONDO DE ENTALLA**

---

**ANÁLISIS MEF DEL PERFIL DE LOS FONDOS DE LAS ENTALLAS DE LAS PROBETAS  
SOLICITADAS A TRACCIÓN Y FLEXIÓN**

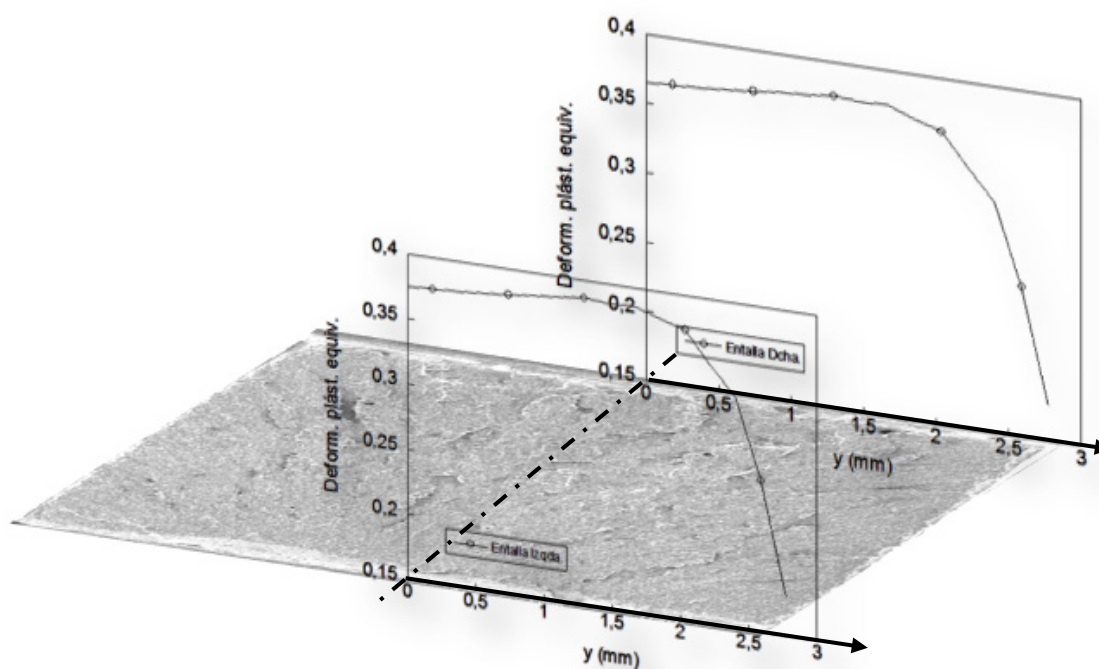


Diagrama básico para la interpretación de las gráficas referentes al estudio de las variables principales en los fondos de entalla izquierdo y derecho, en el IRP. (Anexo III).

**ANÁLISIS MEF DEL FLANCO DE ENTALLA DE LA PROBETA B0-AA**

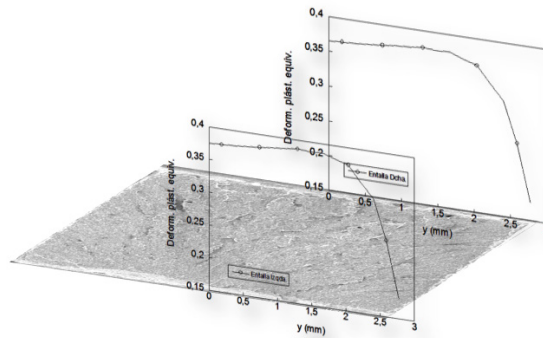
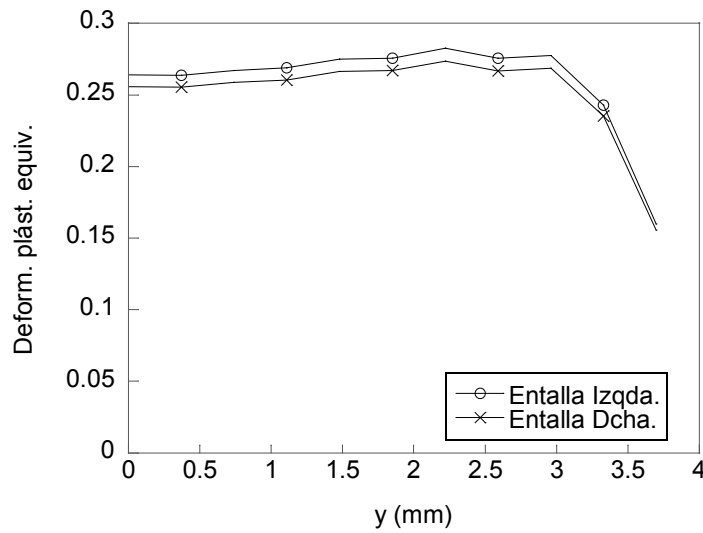
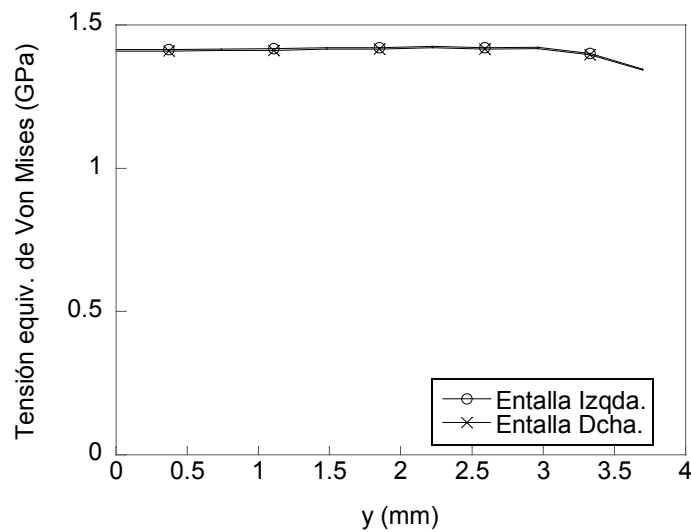


Diagrama de interpretación.

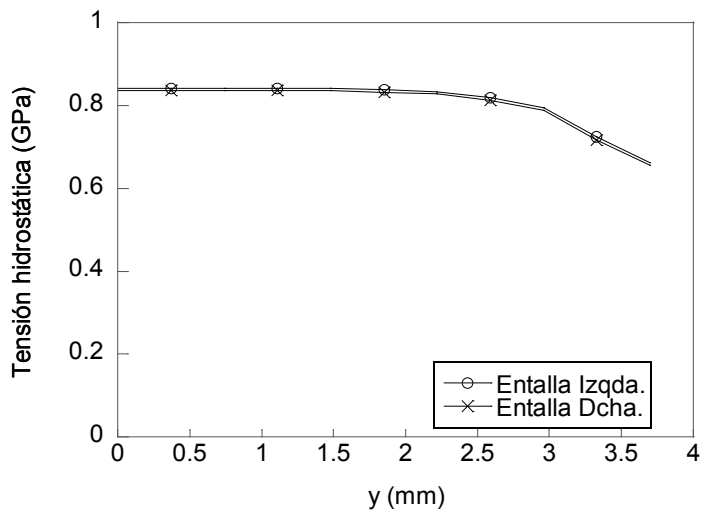


Deformación plástica total equivalente, en el IRP.

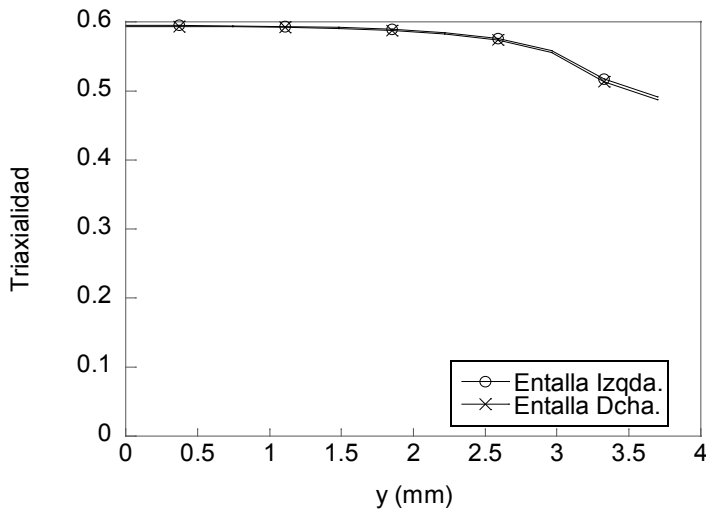


Tensión equivalente de von Mises, en el IRP.

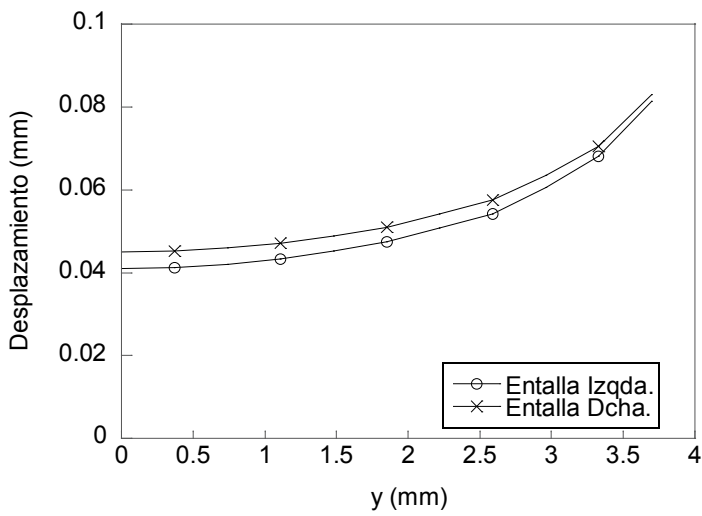
**B0-AA**



Tensión hidrostática, en el IRP.



Triaxialidad, en el IRP.



Desplazamiento, en el IRP.

**B0-AA**



**ANÁLISIS MEF DEL FLANCO DE ENTALLA DE LA PROBETA B4-AA**

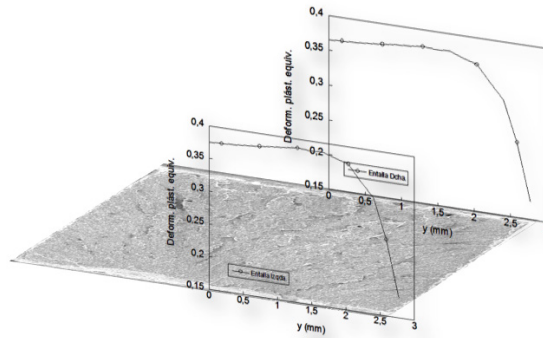
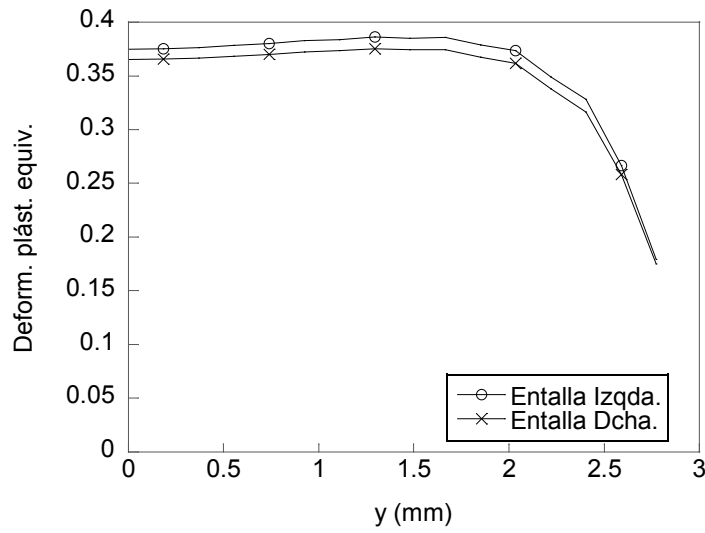
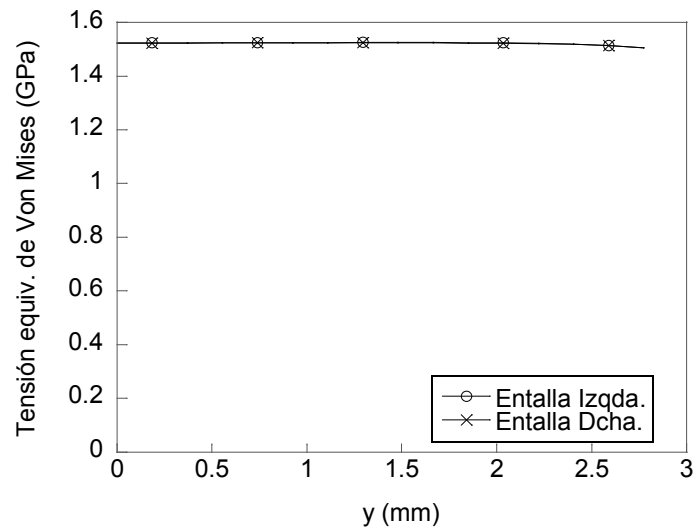


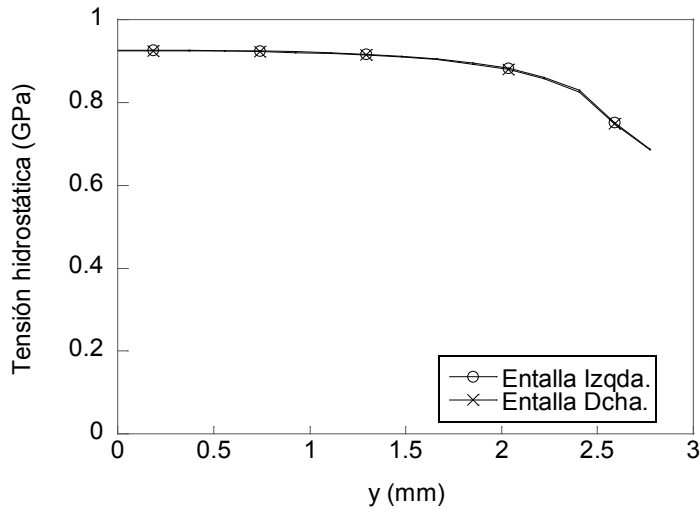
Diagrama de interpretación.



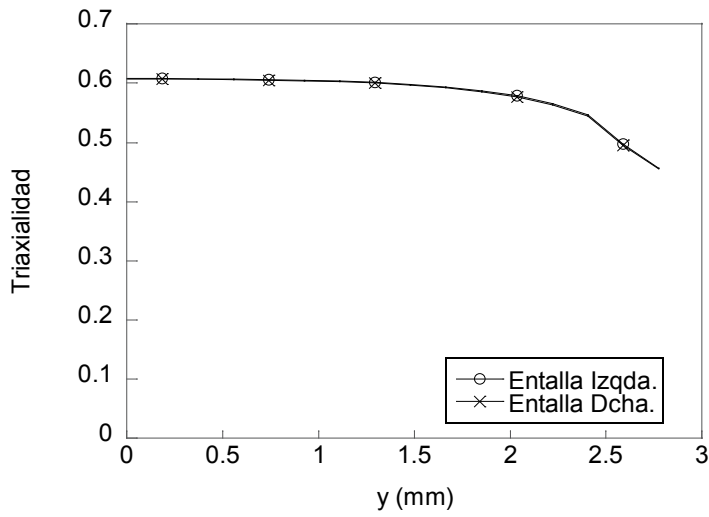
Deformación plástica total equivalente, en el IRP.



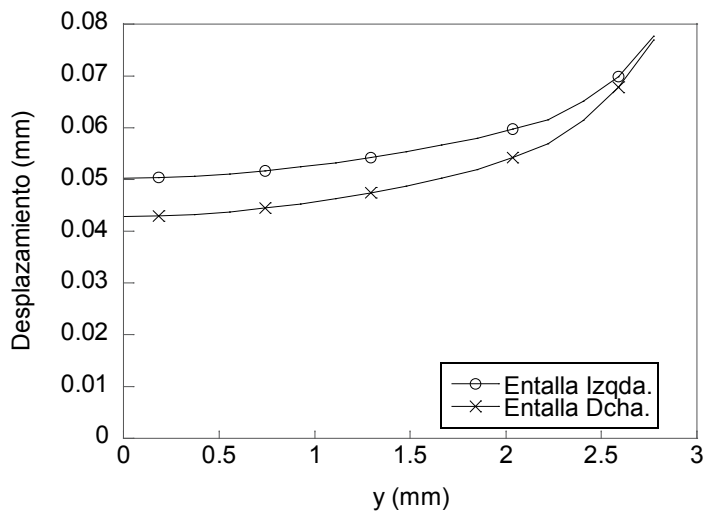
Tensión equivalente de von Mises, en el IRP.



Tensión hidrostática, en el IRP.



Triaxialidad, en el IRP.



Desplazamiento, en el IRP.

**ANÁLISIS MEF DEL FLANCO DE ENTALLA DE LA PROBETA B7-AA**

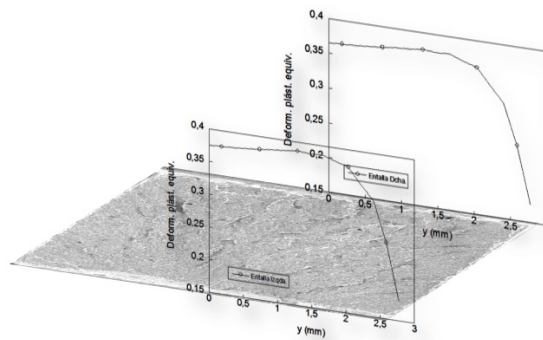
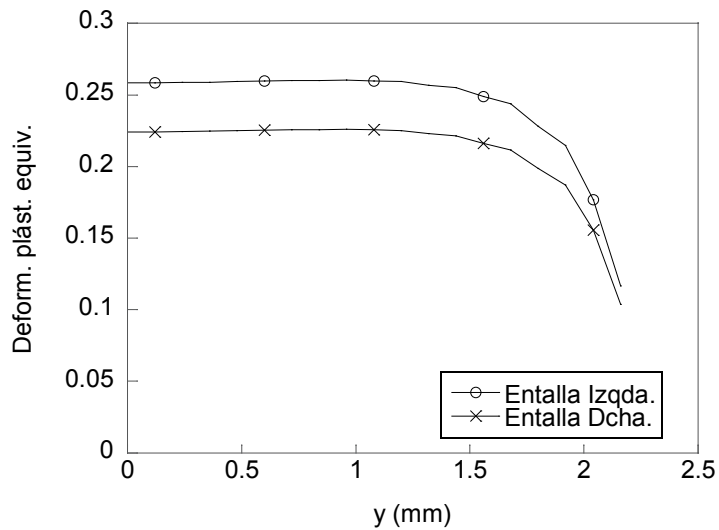
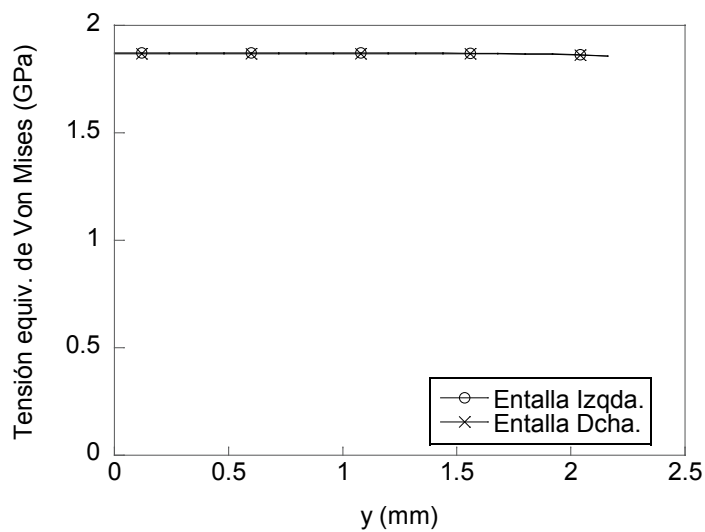


Diagrama de interpretación.

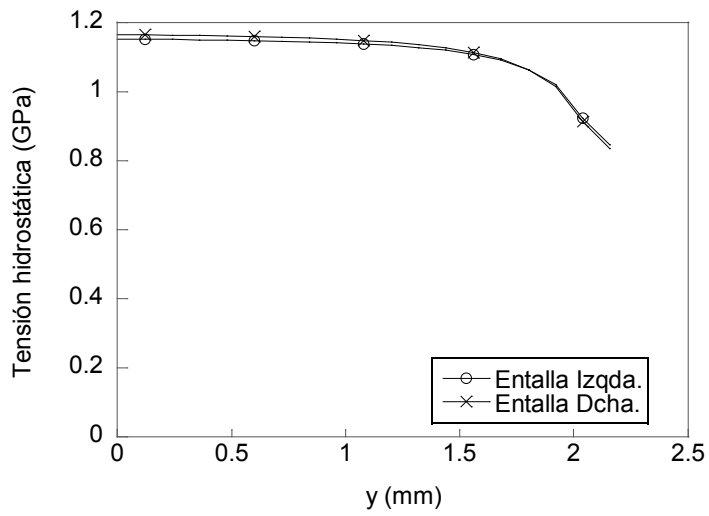


Deformación plástica total equivalente, en el IRP.

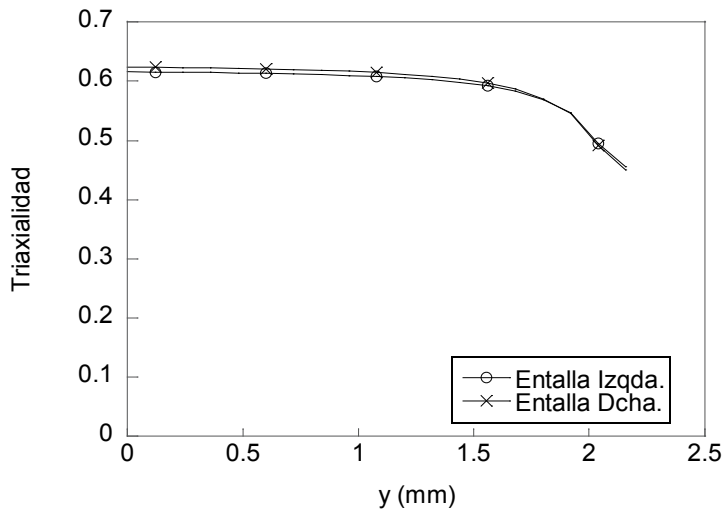


Tensión equivalente de von Mises, en el IRP.

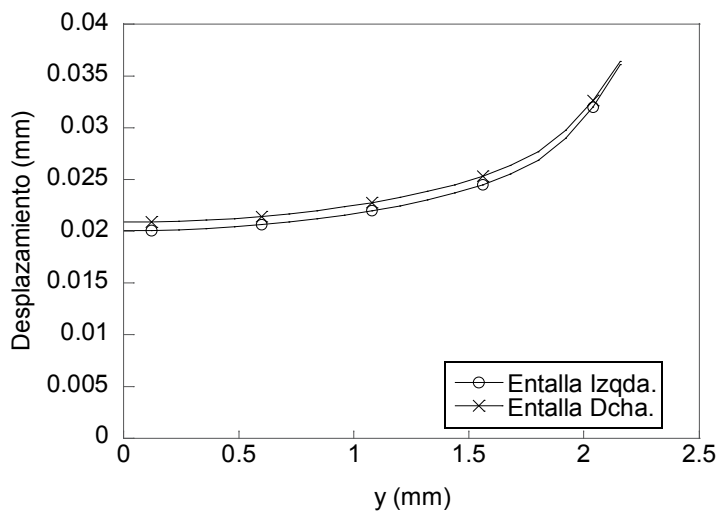
**B7-AA**



Tensión hidrostática, en el IRP.



Triaxialidad, en el IRP.



Desplazamiento, en el IRP.

**ANÁLISIS MEF DEL FLANCO DE ENTALLA DE LA PROBETA B0-CC**

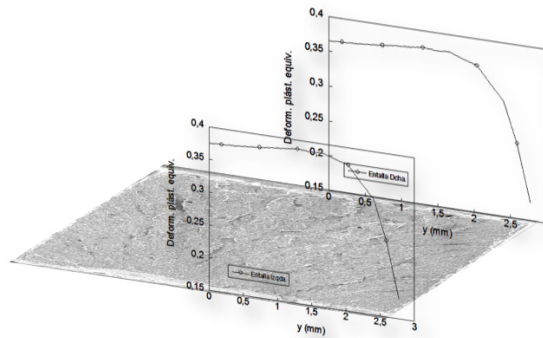
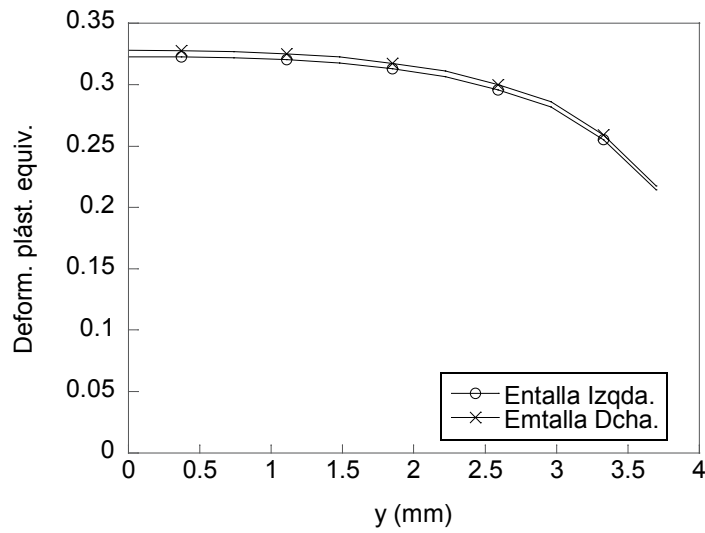
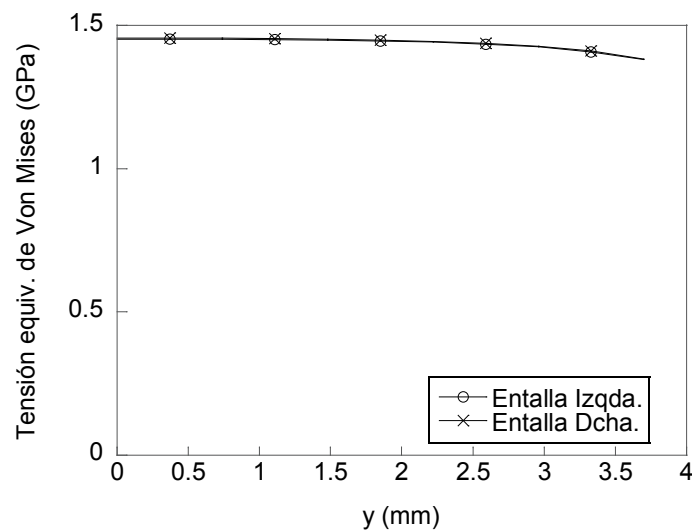


Diagrama de interpretación.

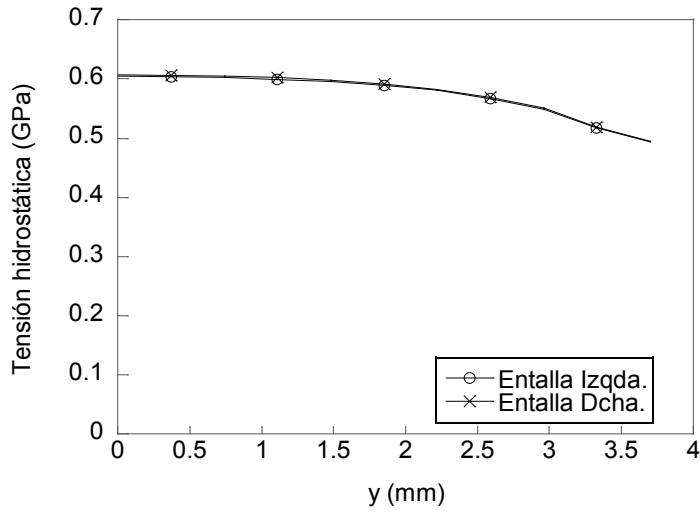


Deformación plástica total equivalente, en el IRP.

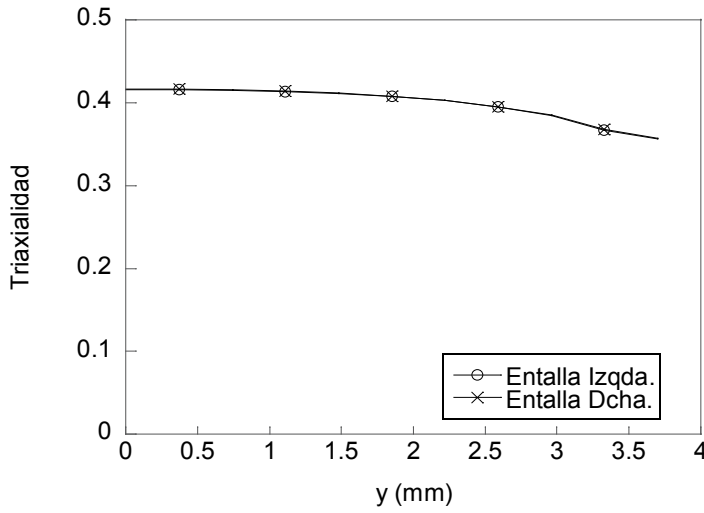


Tensión equivalente de von Mises, en el IRP.

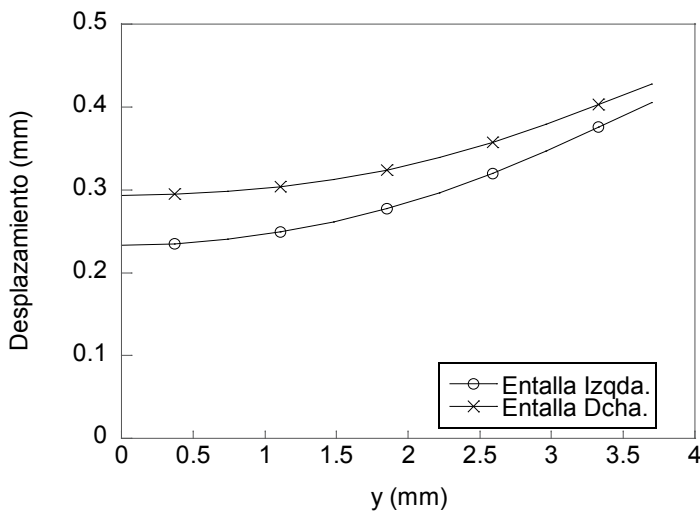
**B0-CC**



Tensión hidrostática, en el IRP.



Triaxialidad, en el IRP.



Desplazamiento, en el IRP.

**ANÁLISIS MEF DEL FLANCO DE ENTALLA DE LA PROBETA B4-CC**

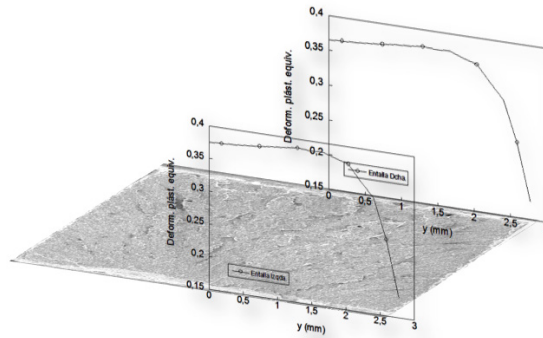
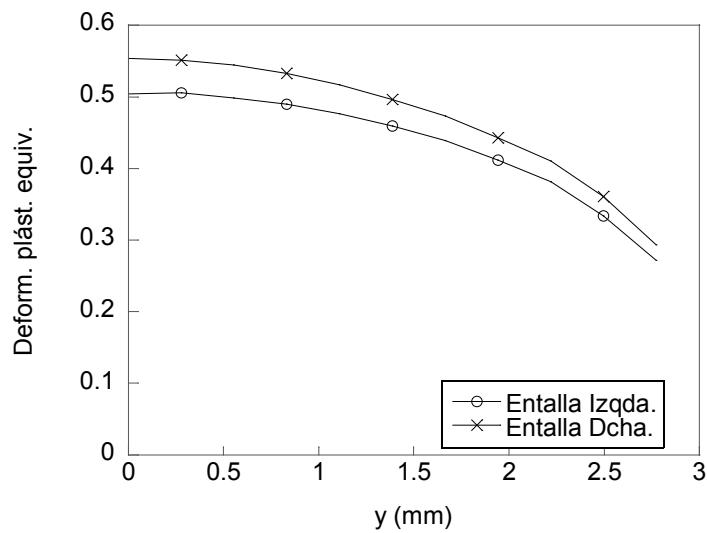
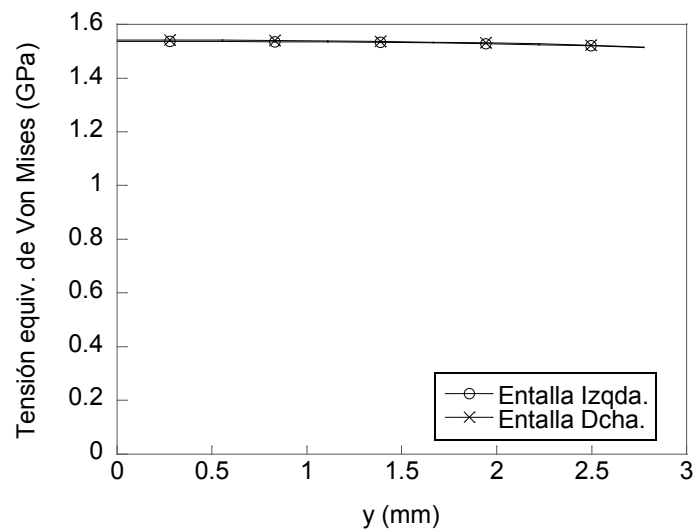


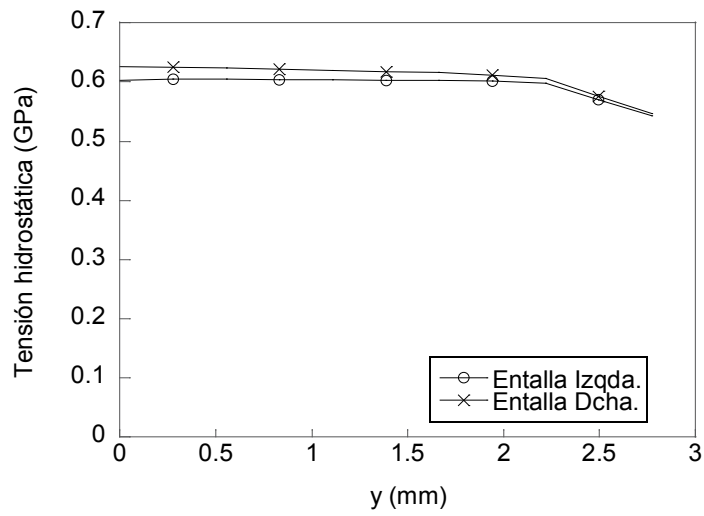
Diagrama de interpretación.



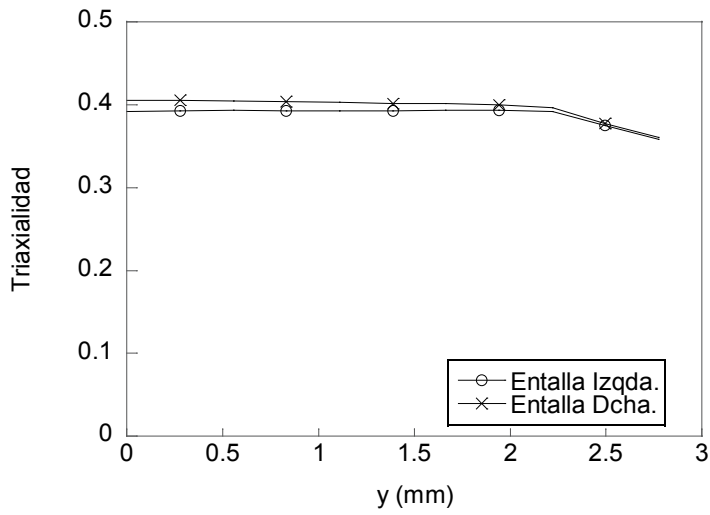
Deformación plástica total equivalente, en el IRP.



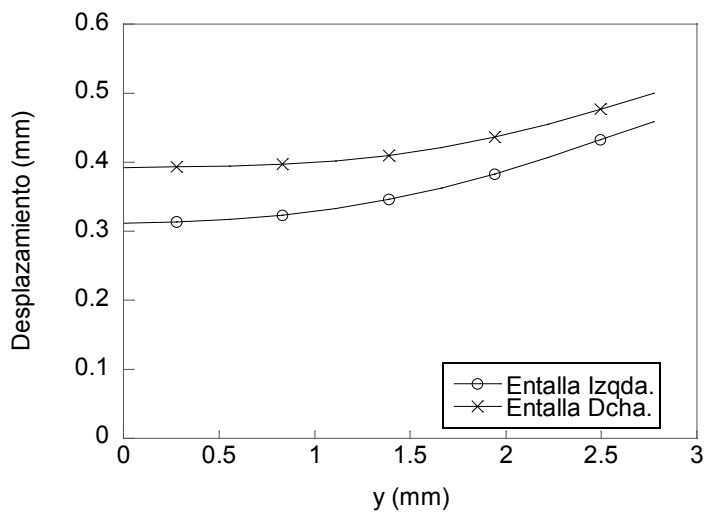
Tensión equivalente de von Mises, en el IRP.



Tensión hidrostática, en el IRP.



Triaxialidad, en el IRP.



Desplazamiento, en el IRP.



**ANÁLISIS MEF DEL FLANCO DE ENTALLA DE LA PROBETA B7-CC**

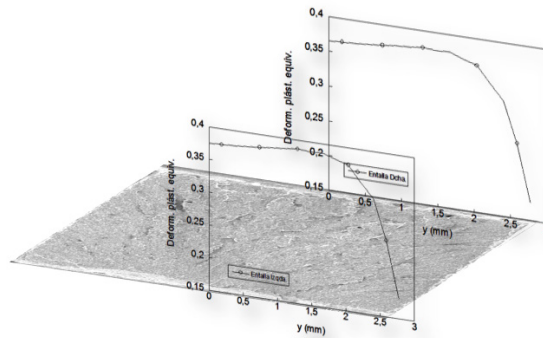
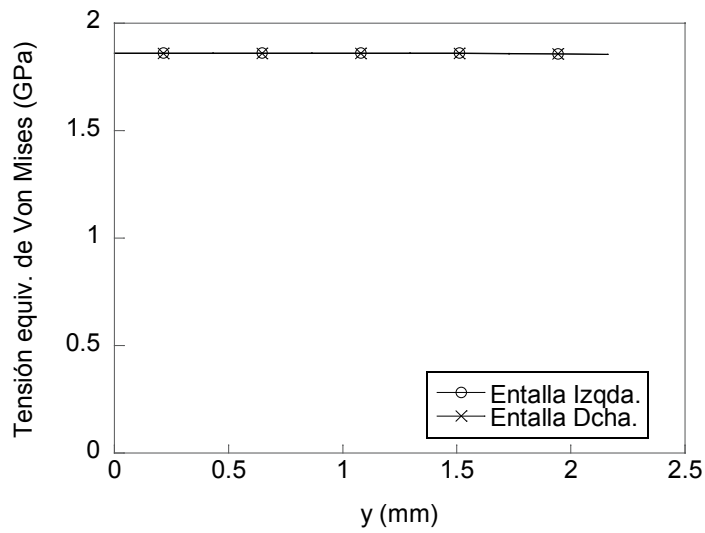
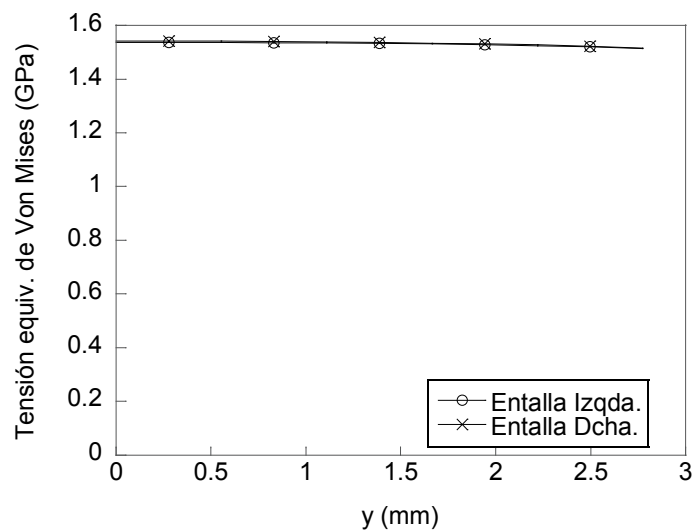


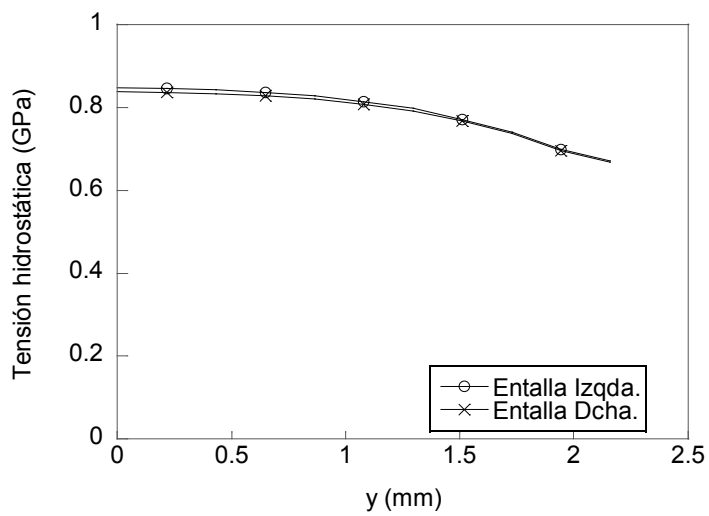
Diagrama de interpretación.



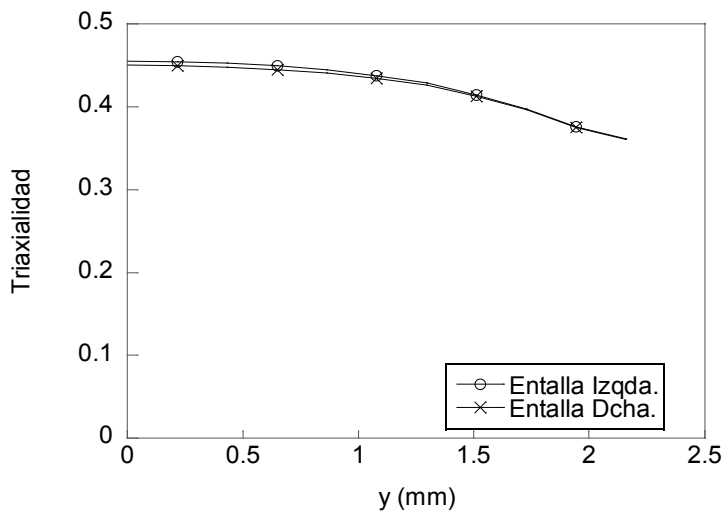
Deformación plástica total equivalente, en el IRP.



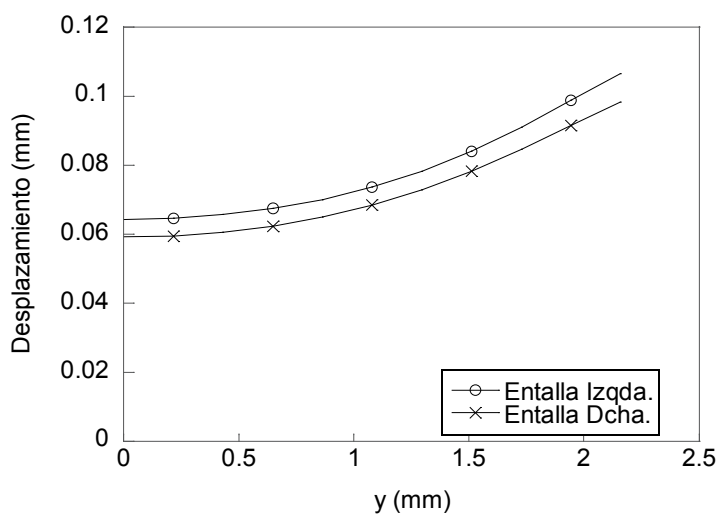
Tensión equivalente de von Mises, en el IRP.



Tensión hidrostática, en el IRP.



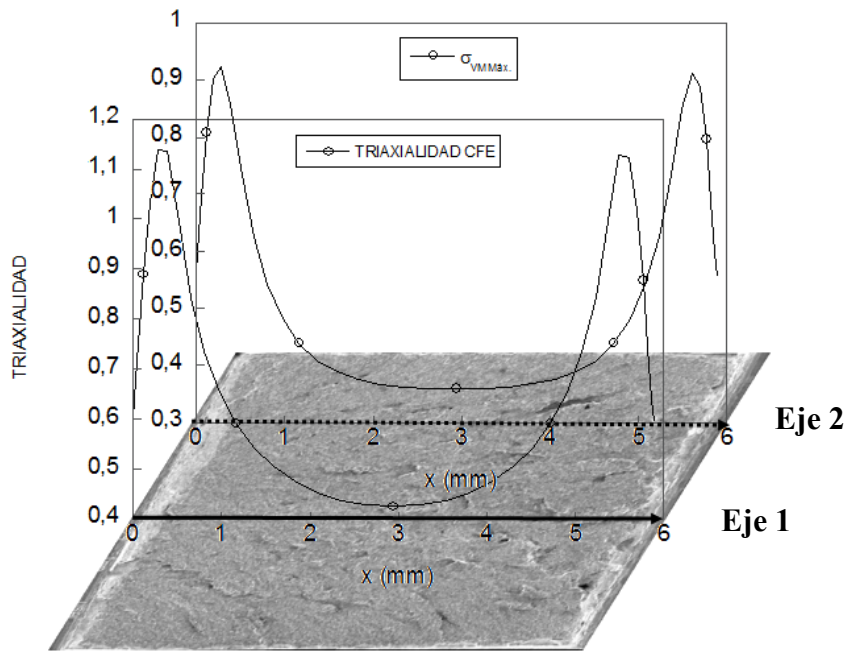
Triaxialidad, en el IRP.



Desplazamiento, en el IRP.

## **ANEXO IV: TRIAXIALIDAD VS FRACTOGRAFÍA**

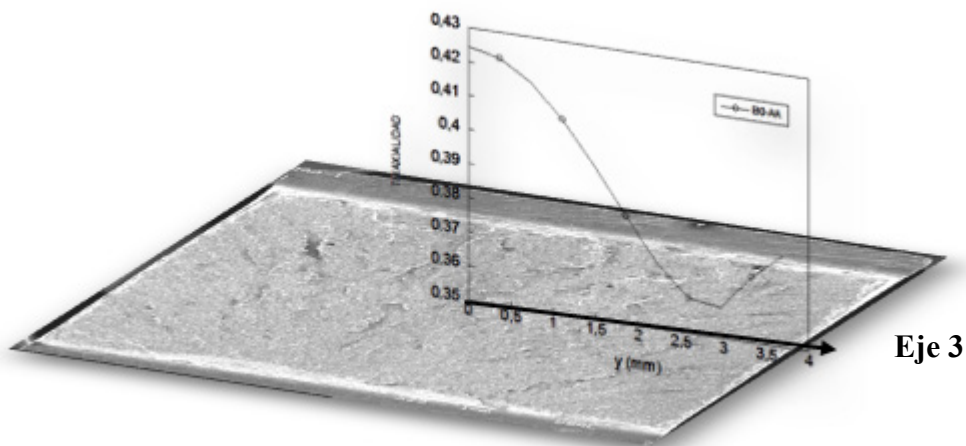
---



**Eje 1:** parte del punto central del fondo de entalla, (FE).

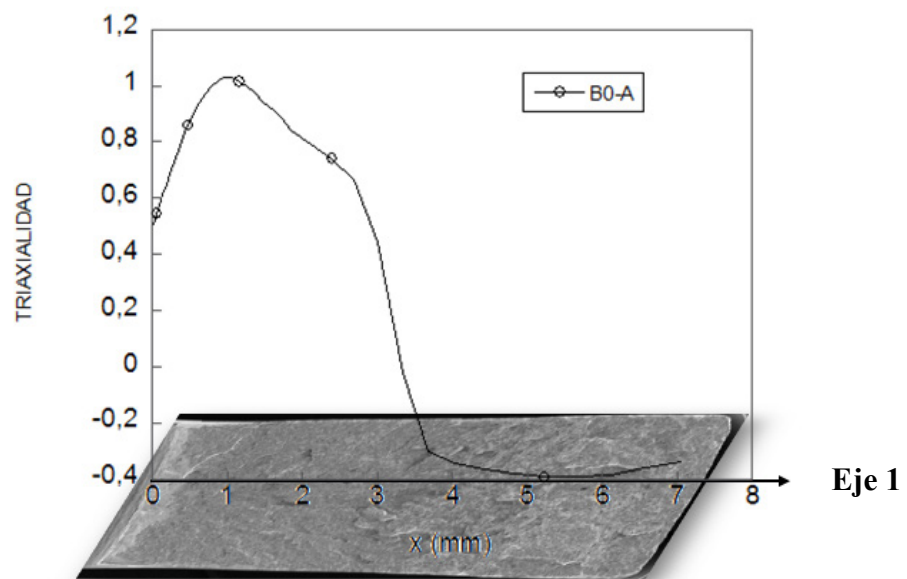
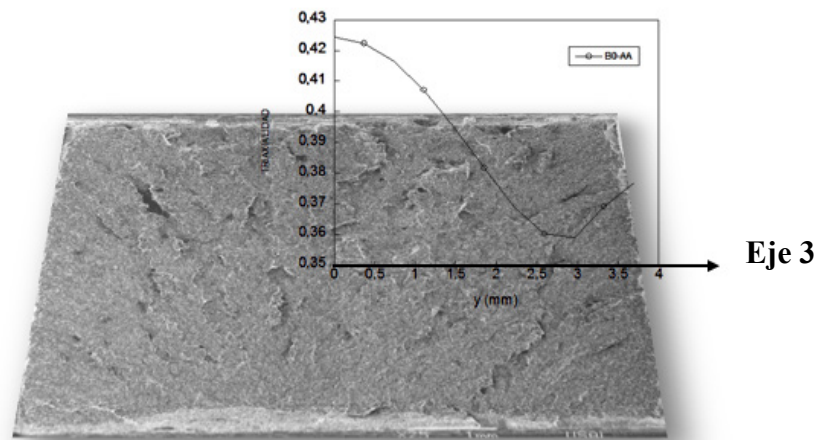
**Eje 2:** parte del punto del fondo de entalla en que se presentan valores máximos de la tensión equivalente de von Mises.

Diagrama básico para la interpretación de las gráficas referentes al estudio de la triaxialidad de las probetas solicitadas a tracción.



**Eje 3:** parte del punto medio de la sección de rotura y se distribuye paralelamente al fondo de entalla.

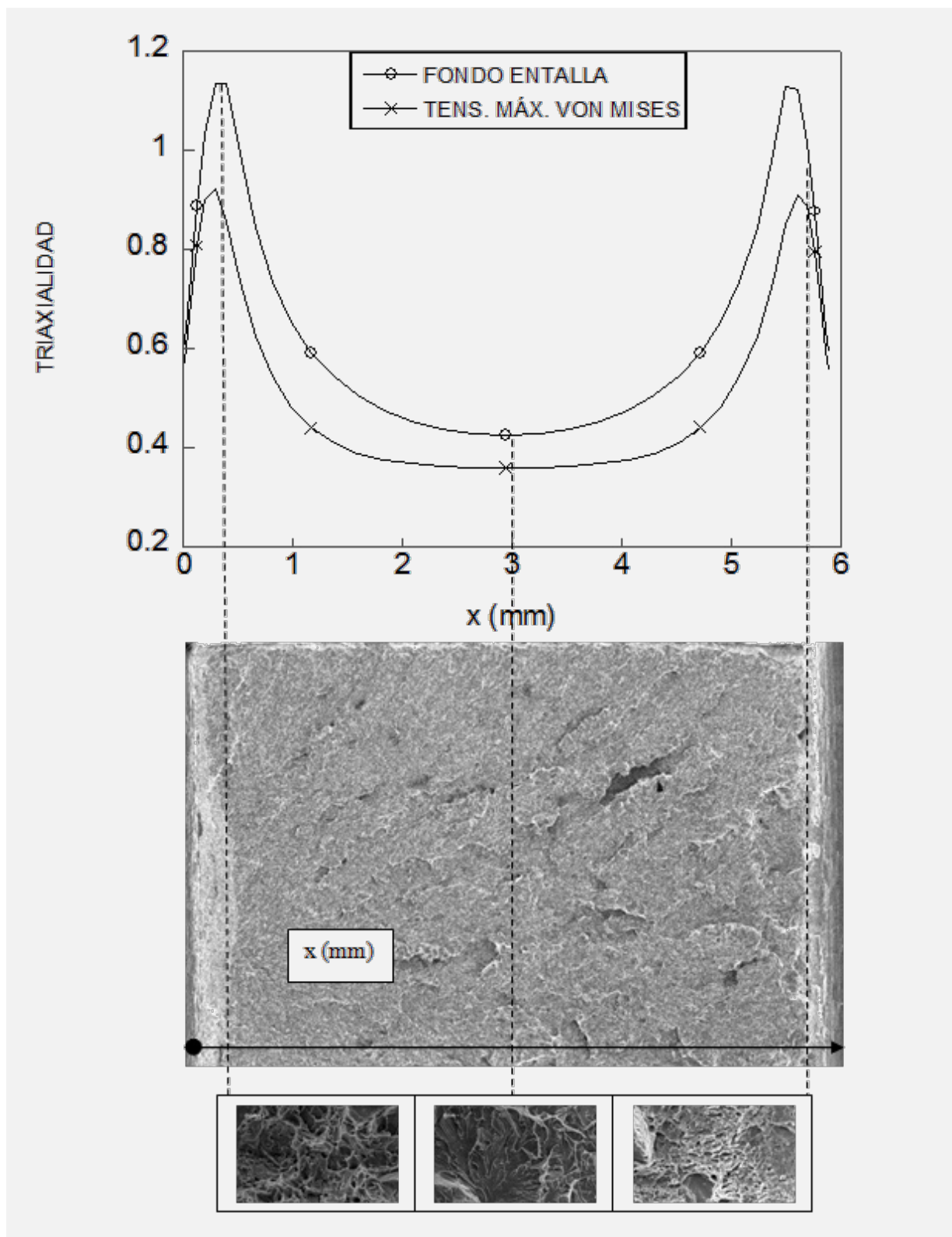
Diagrama básico para la interpretación de las gráficas referentes al estudio de triaxialidad de las probeta B0-AA.



**Eje 1:** parte del punto central del fondo de entalla, (FE), y se distribuye perpendicularmente hasta el borde superior de la probeta, (probetas solicitadas a flexión).

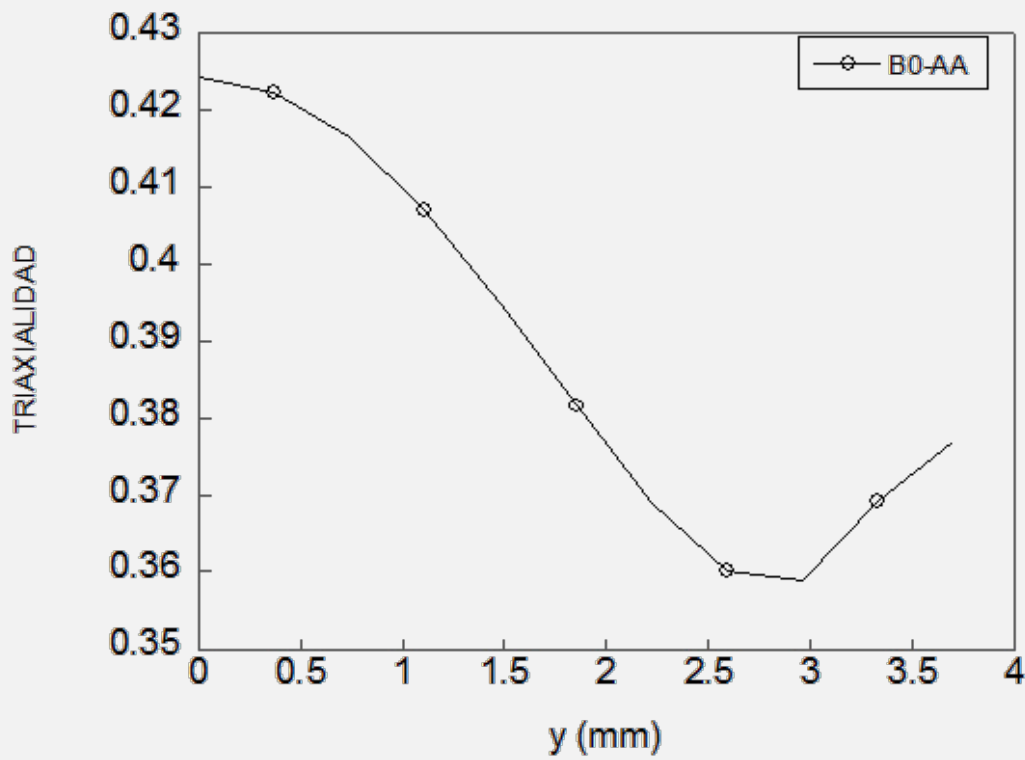
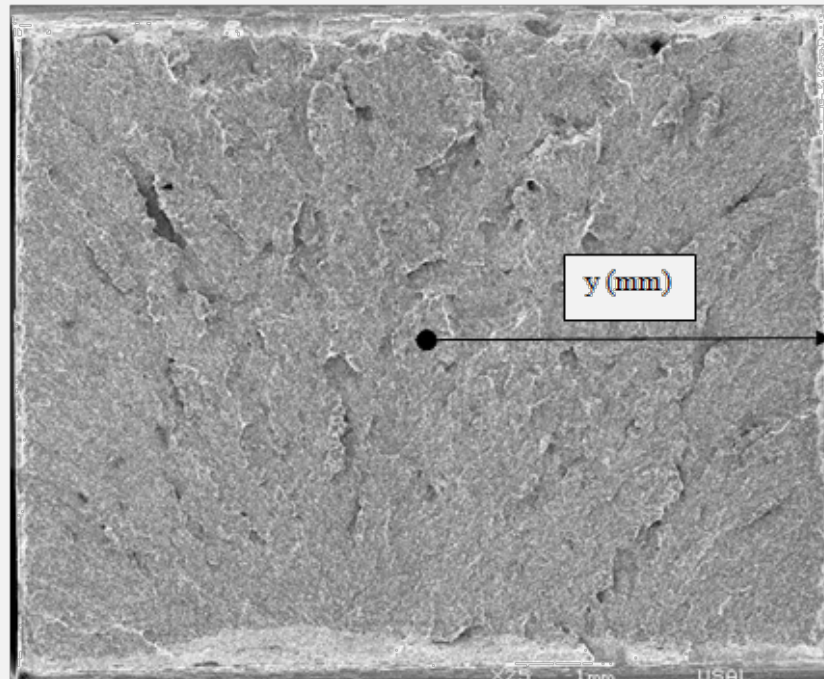
Diagrama básico para la interpretación de las gráficas referentes al estudio de la triaxialidad en aquellas probetas solicitadas a flexión.

### TRIAxIALIDAD B0-AA



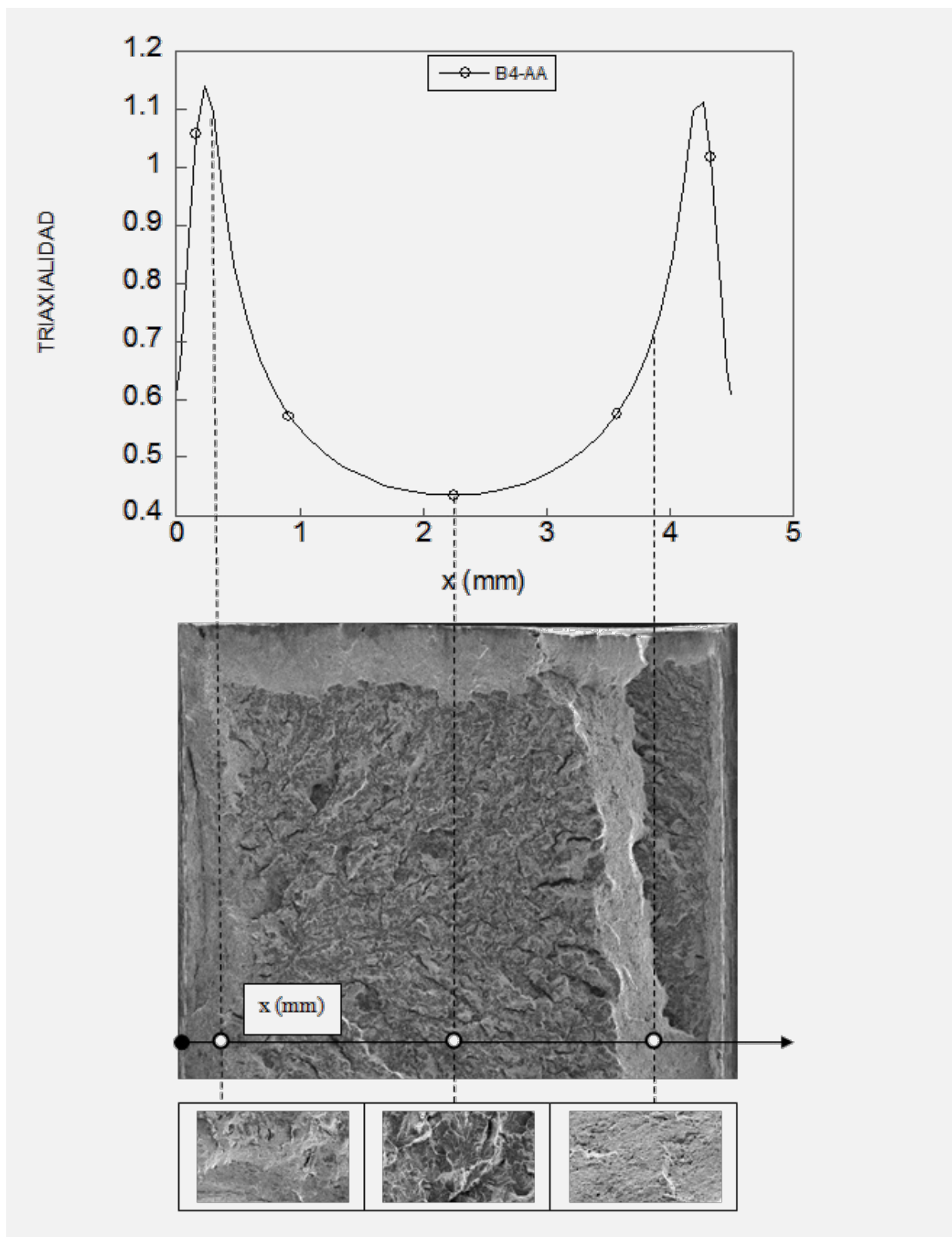
Evolución de la triaxialidad tensional vs fractografía a lo largo del eje de referencia  $x$  de la probeta B0-AA.

### TRIAXIALIDAD B0-AA (SECCIÓN PERPENDICULAR)



Evolución de la triaxialidad en la sección de rotura de la probeta B0-AA a lo largo del eje perpendicular (y) al eje de referencia (x).

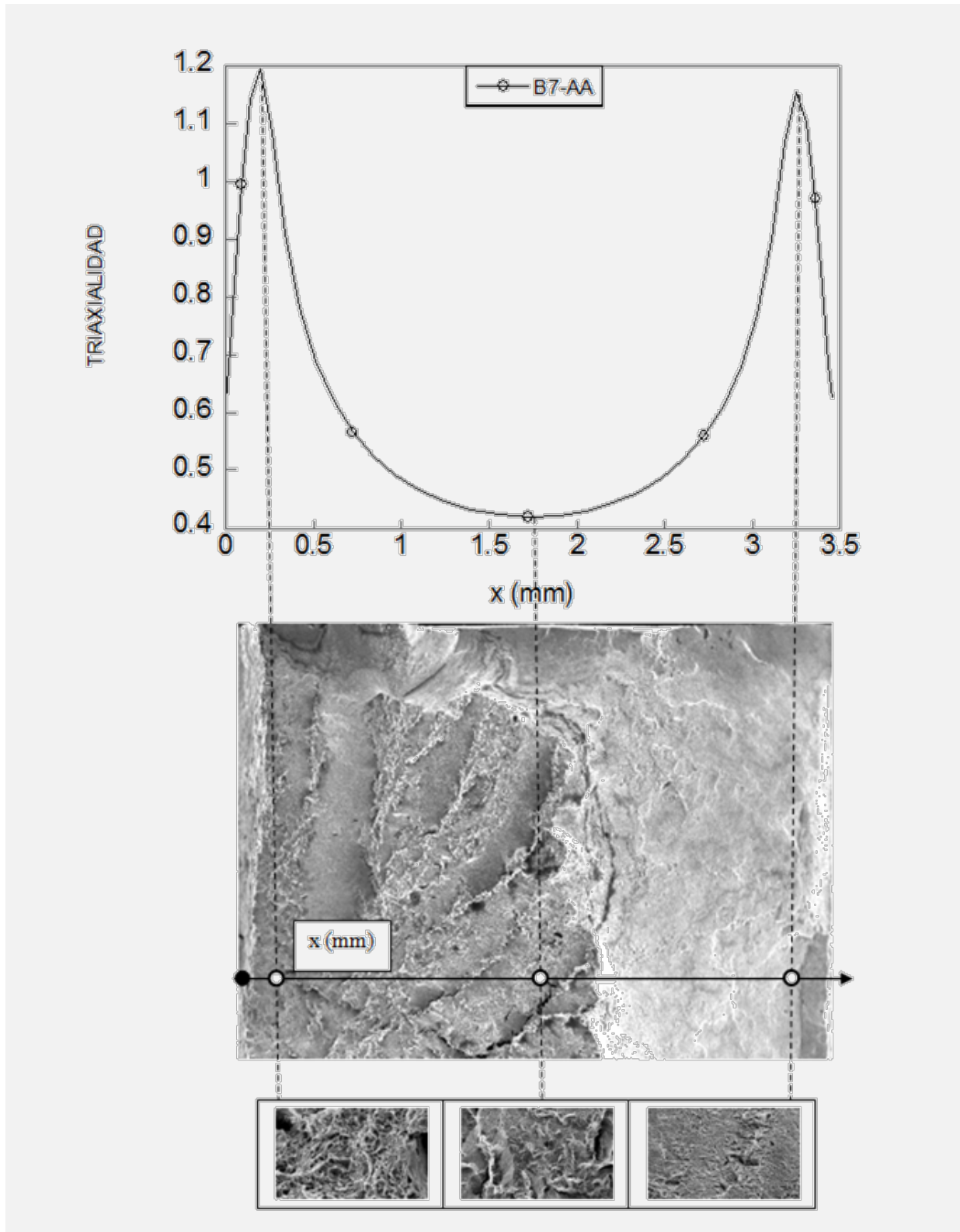
### TRIAXIALIDAD B4-AA



Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B4-AA.

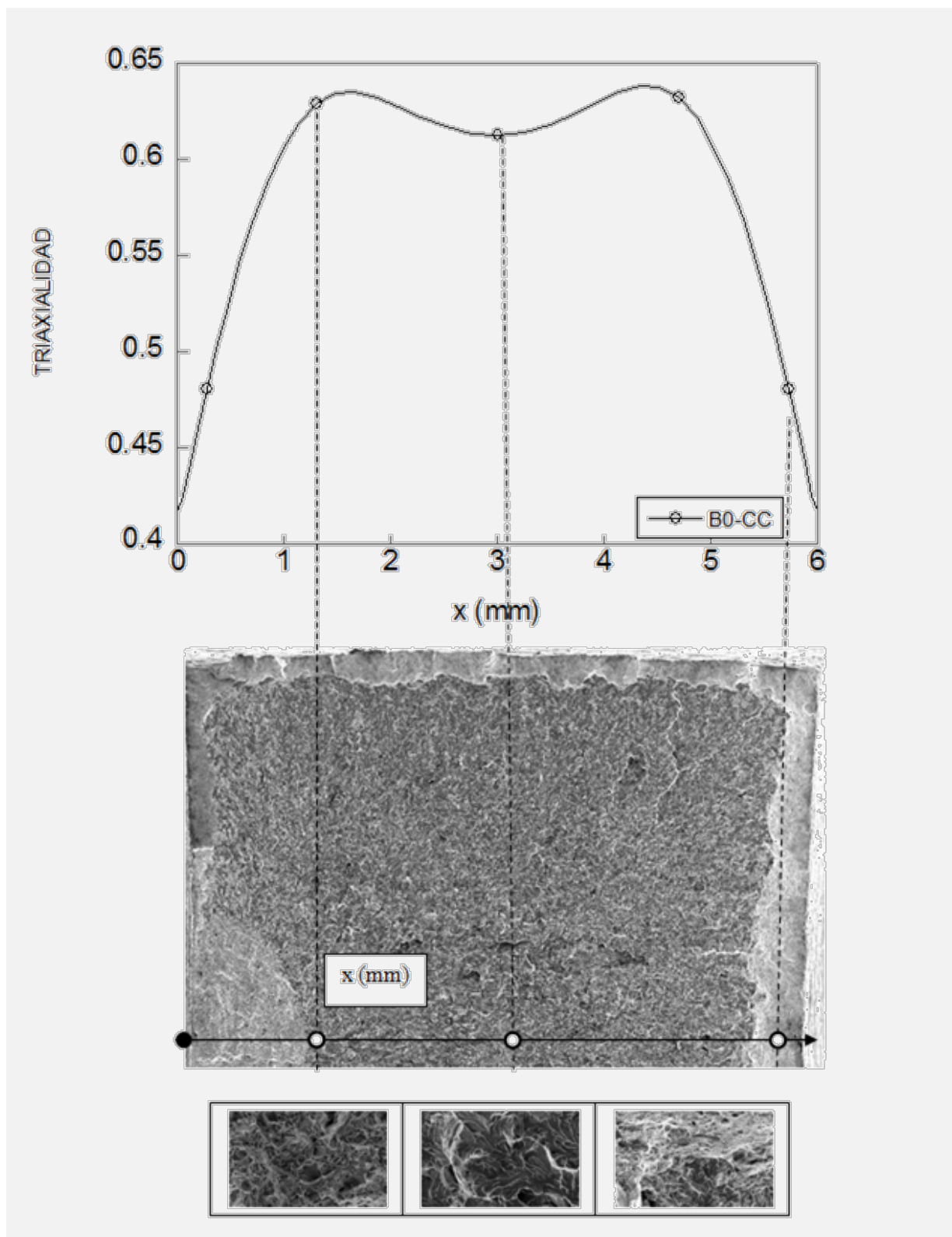


### TRIAXIALIDAD B7-AA



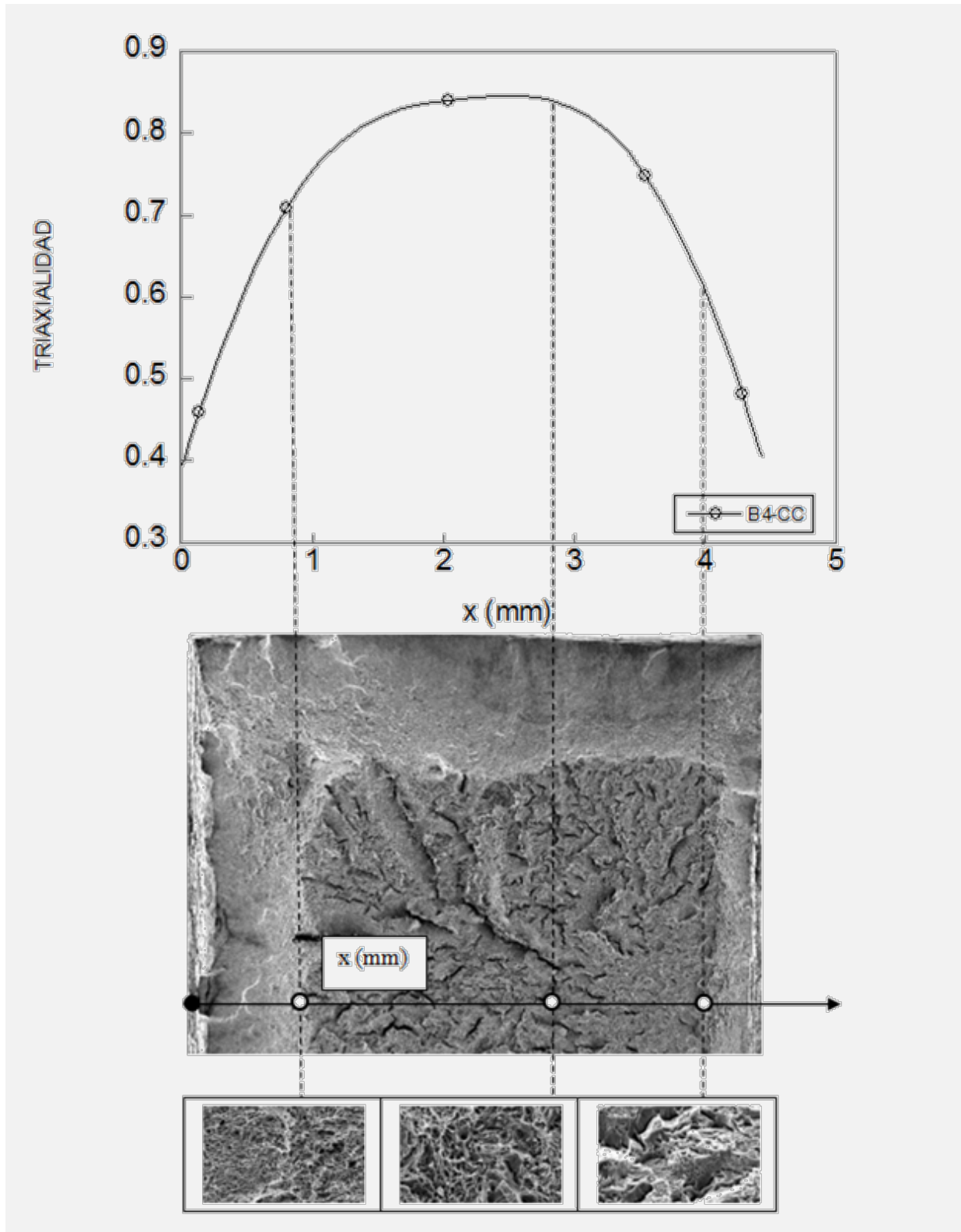
Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B7-AA.

## TRIAXIALIDAD B0-CC



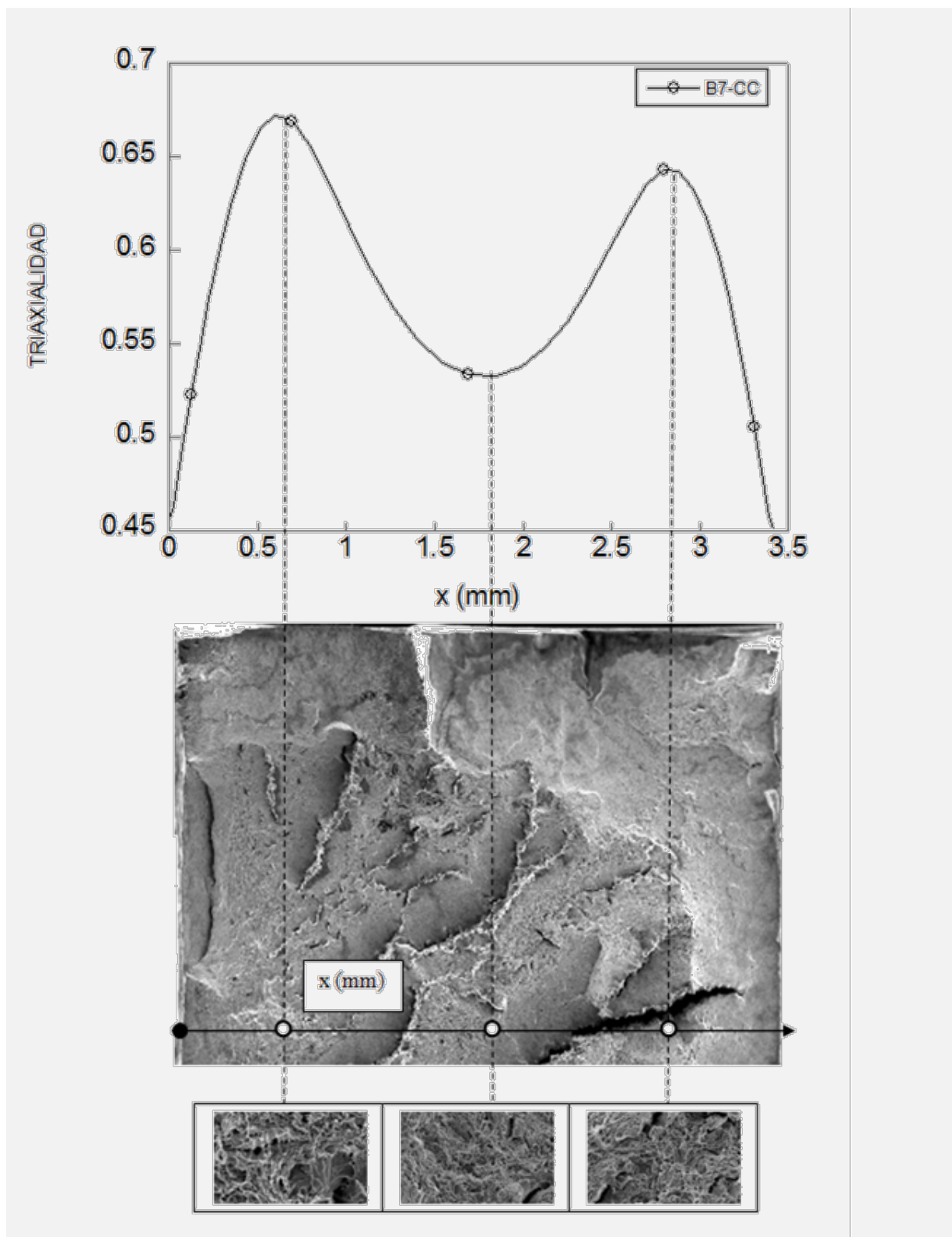
Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B0-CC.

### TRIAxIALIDAD B4-CC



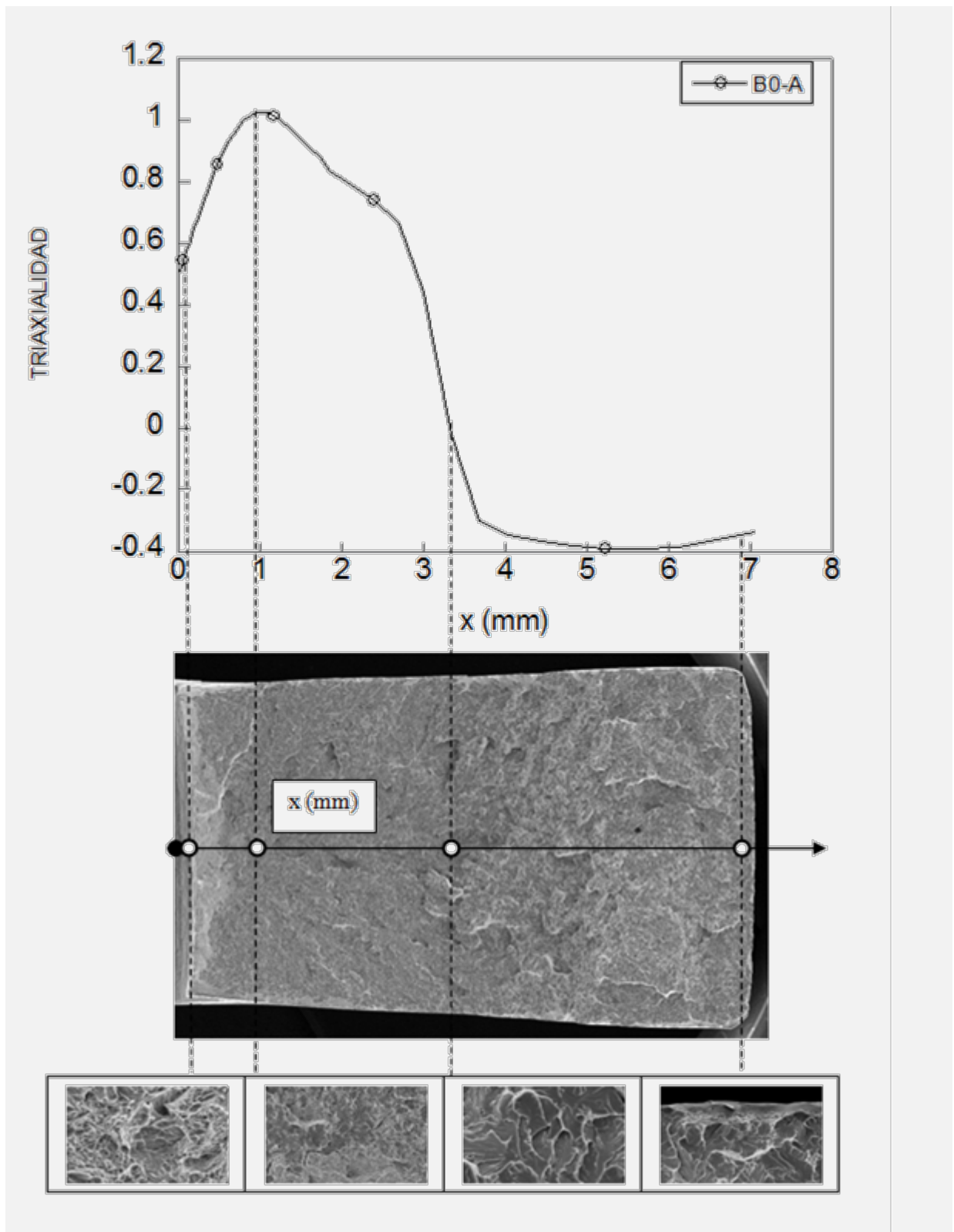
Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B4-CC.

### TRIAXIALIDAD B7-CC



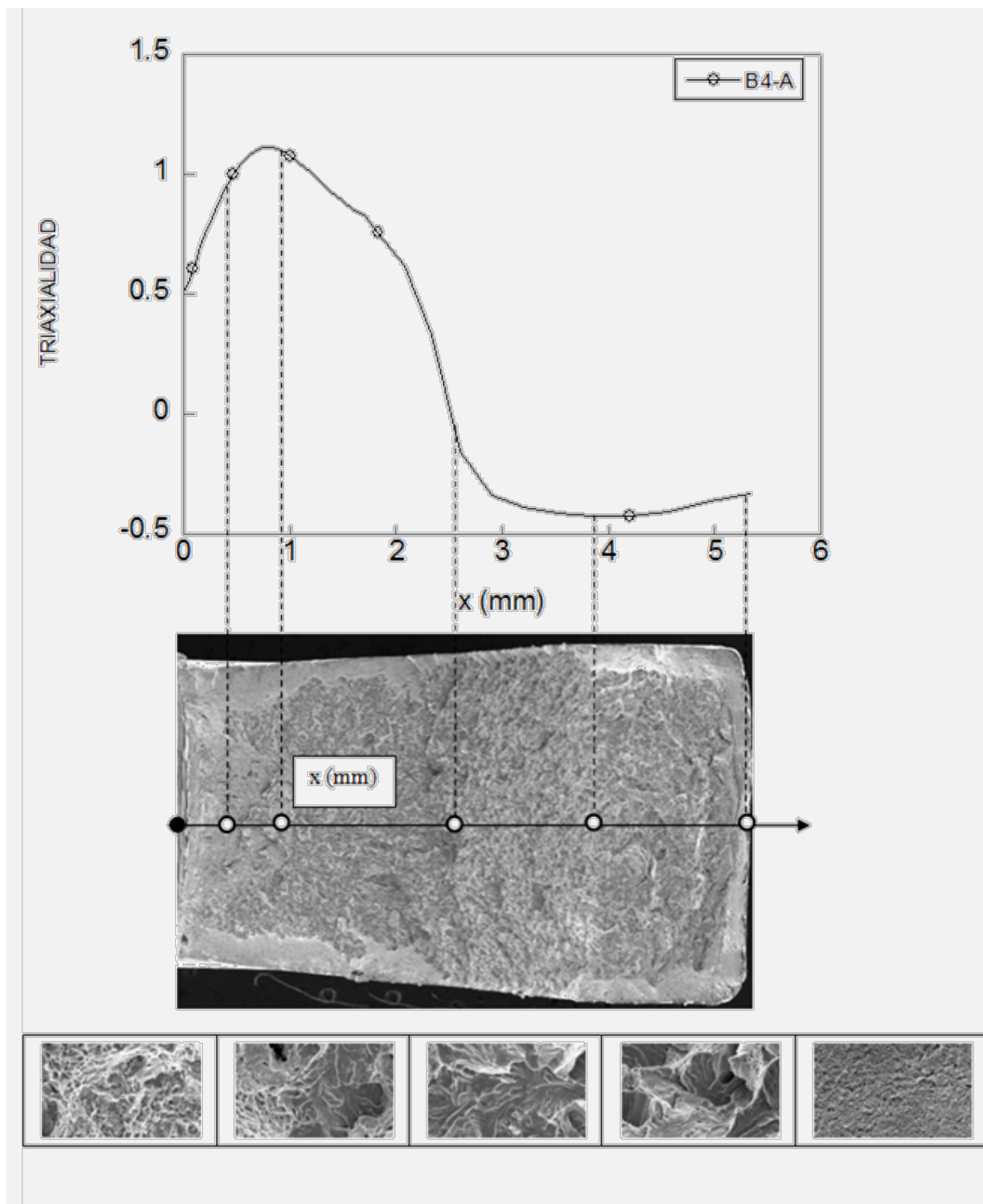
Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B7-CC.

### TRIAxIALIDAD B0-A



Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B0-A.

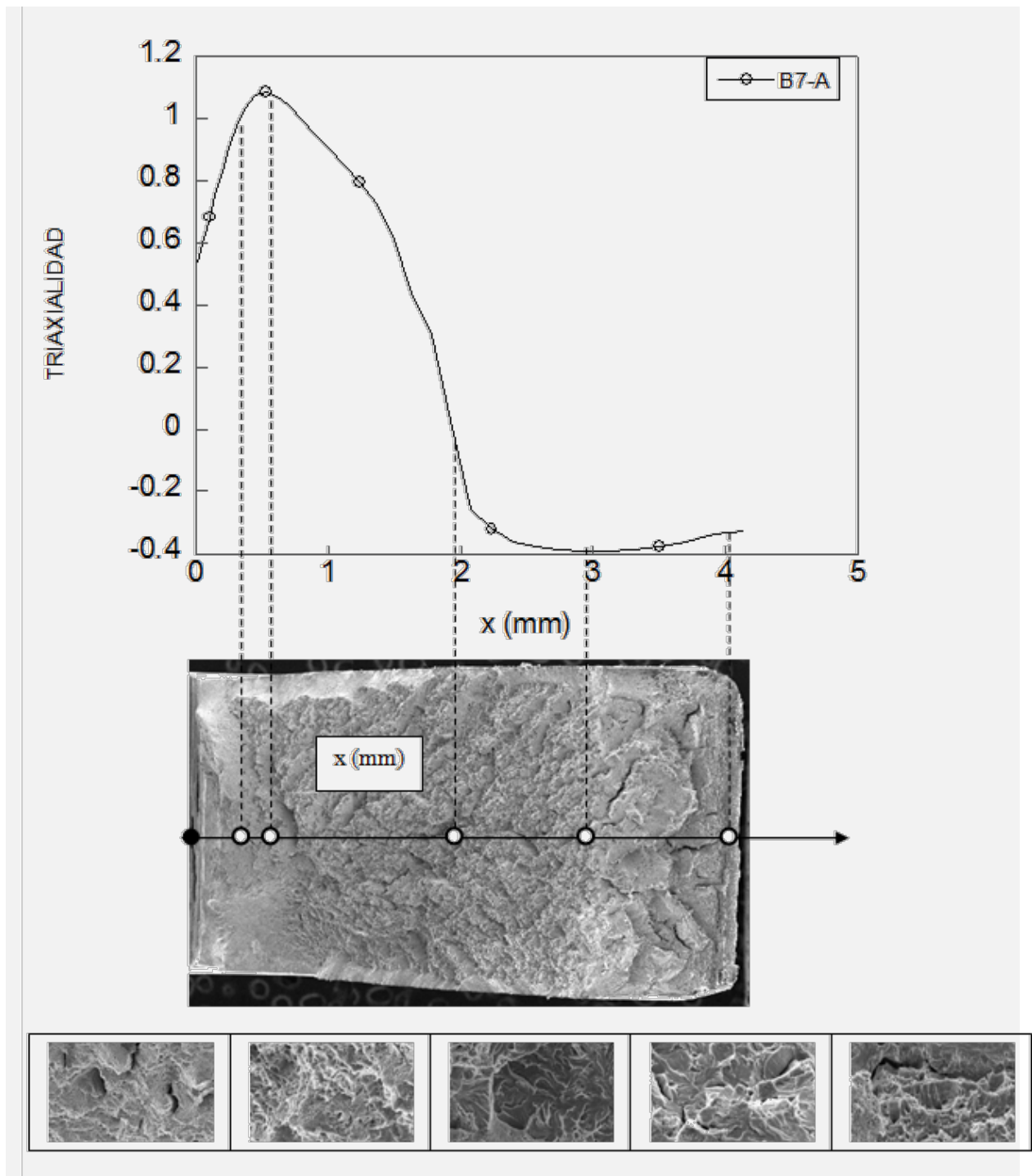
### TRIAXIALIDAD B4-A



La secuencia de imágenes fractográficas presentadas sigue el mismo orden que la señalada mediante círculos blancos en el eje longitudinal

Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B4-A.

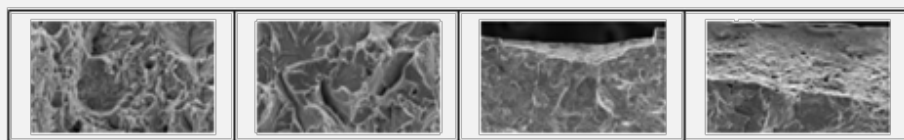
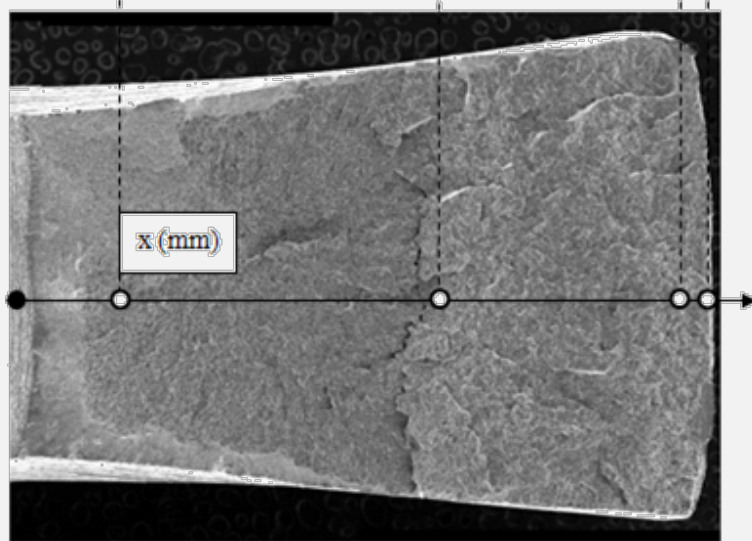
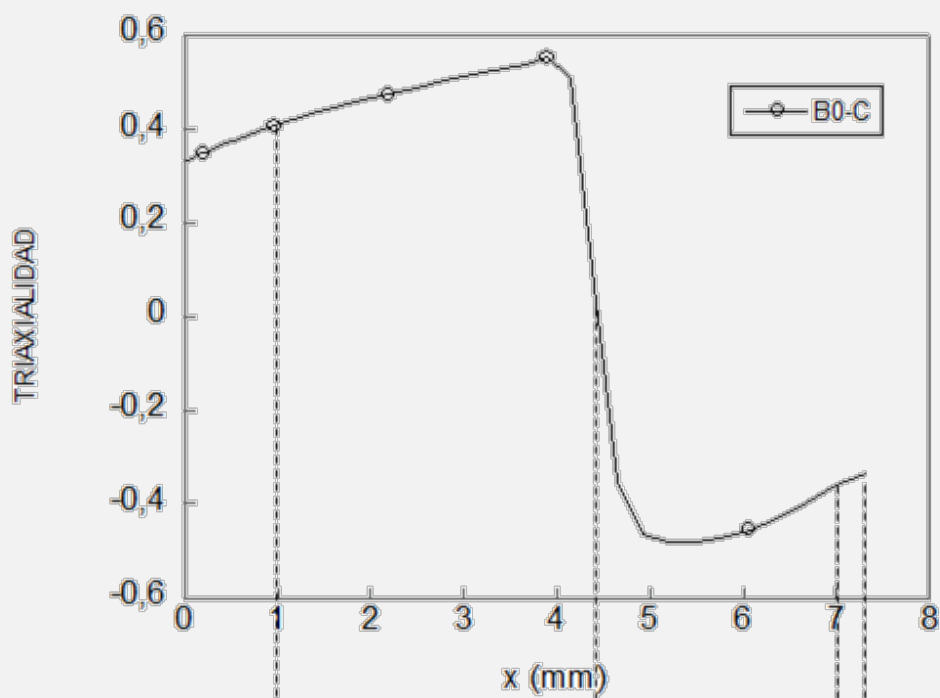
### TRIAxIALIDAD B7-A



La secuencia de imágenes fractográficas presentadas sigue el mismo orden que la señalada mediante círculos blancos en el eje longitudinal

Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B7-A.

### TRIAxIALIDAD B0-C

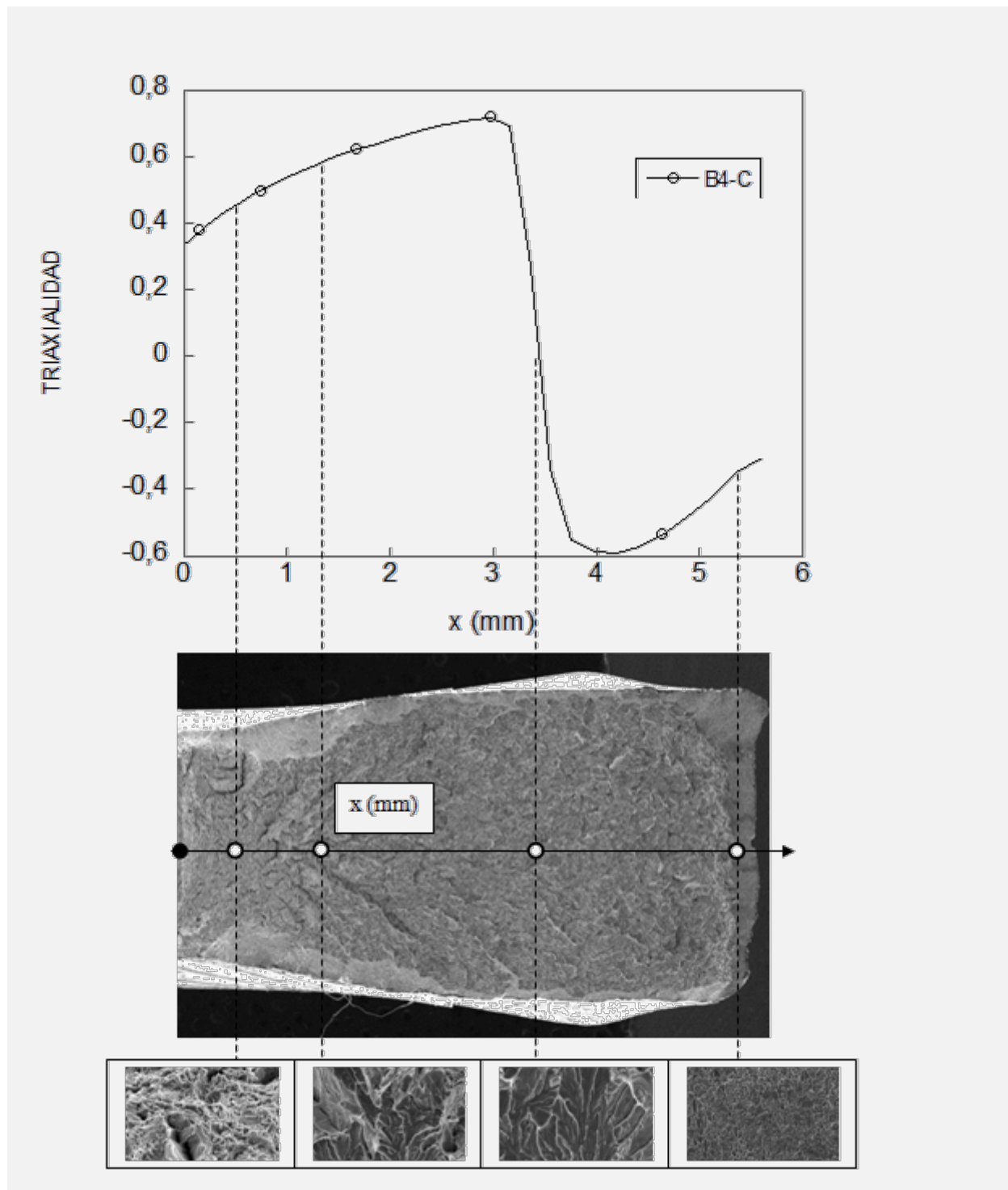


*La secuencia de imágenes fractográficas presentadas sigue el mismo orden que la señalada mediante círculos blancos en el eje longitudinal*

Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B0-C.

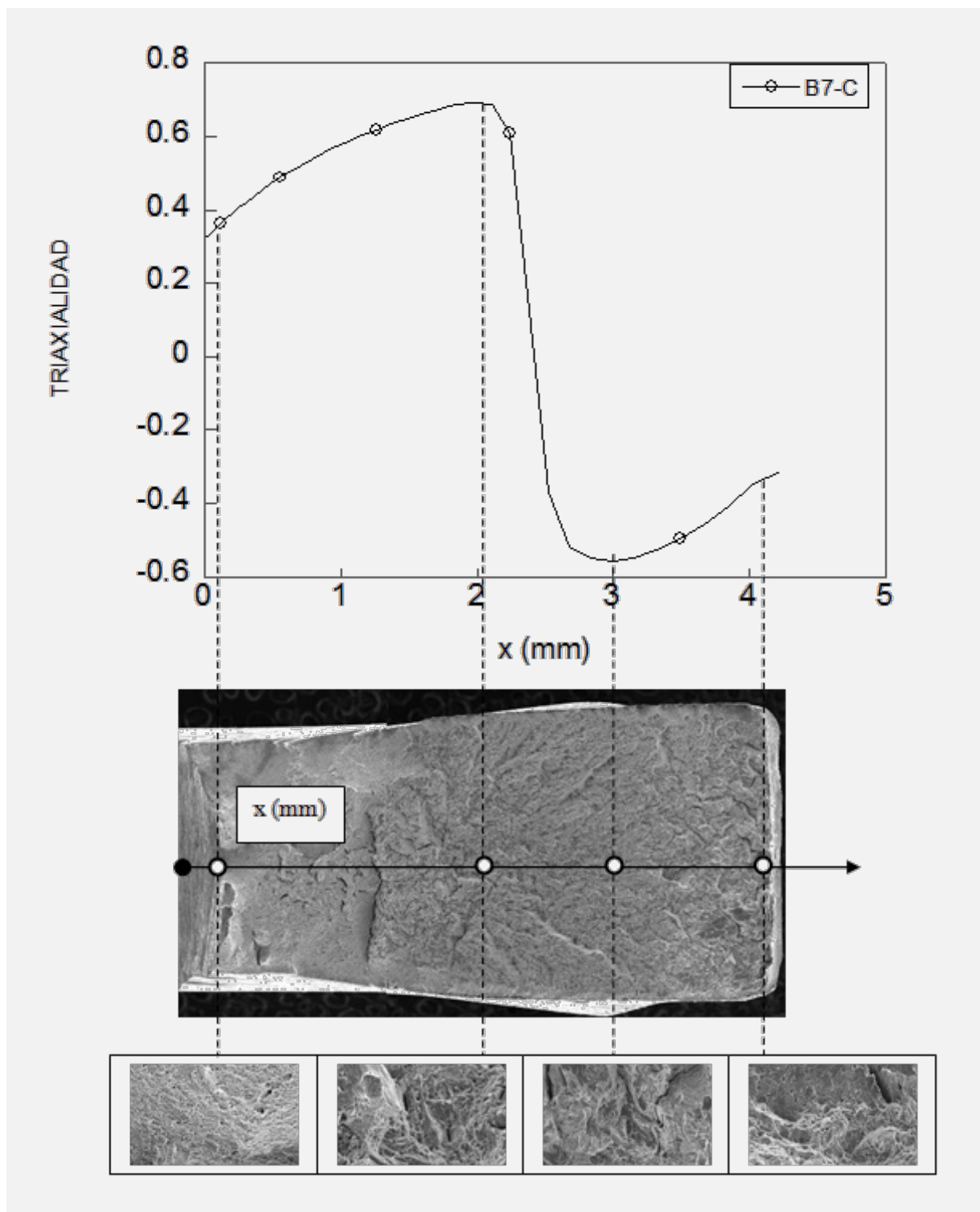


### TRIAxIALIDAD B4-C



Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B4-C.

## TRIAXIALIDAD B7-C



Esquema comparativo de la evolución de la triaxialidad a lo largo de la sección de rotura con la fractografía de la probeta B7-C.

