



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS DOCTORAL

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE SHOT-PEENING.
APROXIMACIÓN AL CONOCIMIENTO DE LAS SUPERFICIES DE
MATERIALES METÁLICOS TRATADAS CON ESTA TÉCNICA.

Autor:

José Alejandro Reveriego Martín

Director:

Dr. D. Juan Carlos Pérez Cerdán.

Salamanca, 2017

Autor:

Prof. José Alejandro Reveriego Martín.

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Dirección (ADDRESS):

ETSII, de Béjar, Avda Fernando Ballesteros s/n.

37700, BÉJAR. (SALAMANCA)

ESPAÑA

TFNO (PHONE): 0034 923 408 080 EXT: 2257.

FAX: 0034 923 405 714

EMAIL:alex@usal.es

Director:

Prof. Juan Carlos Pérez Cerdán.

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Dirección (ADDRESS):

ETSII, de Béjar, Avda Fernando Ballesteros s/n.

37700, BÉJAR. (SALAMANCA)

ESPAÑA

TFNO (PHONE): 0034 923 408 080 EXT: 2260.

FAX: 0034 923 405 714

EMAIL:juha@usal.es

DESCRIPCIÓN BREVE

NUMERICAL SIMULATION OF THE SHOT-PEENING PROCESS. APPROACH TO THE KNOWLEDGE OF THE METALLIC MATERIALS SURFACE TREATED WITH SUCH A TECHNIQUE.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE SHOT-PEENING. APROXIMACIÓN AL CONOCIMIENTO DE LAS SUPERFICIES DE MATERIALES METÁLICOS TRATADAS CON ESTA TÉCNICA.

Autor: José Alejandro Reveriego Martín.
Departamento de Ingeniería Mecánica

From the numerical simulations based on the finite element method, in this work is presented a detailed study of some of the most significant influence factors that characterize both the residual stress and the roughness of surfaces treated by means of shot peening technique. The numerical model is based on the works by Miao et al. [1] and Sanjurjo et al. [2]. The material's behaviour is treated according to the modified Chaboche model [2]. The obtained results are analysed as a function, on one hand, of characteristic parameters of the process, such as the coverage degree, and, on the other hand, of the shot, such as its velocity or diameter. Numerical results allow determining the influence of such parameters on the maximum value of residual stress and on the depth where it appears, and on the indicators that allow measuring the surface roughness. It is also considered the case of materials with surfaces with a certain initial roughness associated.

[1] Miao, H. Y., et al. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, 2009, vol. 40, no 10, p. 1023-1038.

[2] Sanjurjo, P., Rodríguez, C., Peñuelas, I., García, T. E., & Belzunce, F. J., "Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process", *Surface and Coatings Technology*, **258**: 822-831, 2014.

Keywords: shot peening, numerical simulation, residual stress, surface roughness.

A partir de cálculos basados en el método de los elementos finitos, en este trabajo se presenta un estudio detallado de algunos de los factores más significativos que caracterizan tanto las tensiones residuales como la rugosidad de superficies tratadas mediante granallado. El modelo numérico parte de los trabajos de Miao et al. [1] y de

Sanjurjo et al. [2]. El material se trata de acuerdo con el modelo de comportamiento de Chaboche modificado [2]. Los resultados se analizan en función de parámetros característicos del proceso, como el grado de cobertura, o del proyectil, como su velocidad o diámetro. y se determina cómo influyen en el valor máximo de la tensión residual y en la profundidad en la que ocurre, y en los indicadores que miden la rugosidad superficial. Se considera también el caso de materiales con superficies que tienen una cierta rugosidad inicial.

[1] Miao, H. Y., et al. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, 2009, vol. 40, no 10, p. 1023-1038..

[2] Sanjurjo, P., Rodríguez, C., Peñuelas, I., García, T. E., & Belzunce, F. J., “Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process”, *Surface and Coatings Technology*, **258**: 822-831, 2014.

Palabras claves: granallado, simulación numérica, tensión residual, rugosidad superficial

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo desea dar las gracias :

- Al profesor D. Juan Carlos Pérez Cerdán como director de esta tesis, por el trabajo y consejos aportados en su elaboración.
- Al profesor D. Pablo Moreno Pedraz por haberme abierto las puertas al mundo de la investigación.
- A todos mis compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica, especialmente al profesor D. José Antonio Cabezas Flores, por su ayuda y su respaldo.
- Al profesor D. Francisco Martín Labajos por su apoyo y por su orientación en el desarrollo de este trabajo.

- A mi mujer Marga y a mis hijos, Alejandro y Manuel, por su apoyo y paciencia durante todo este tiempo. A ellos se dedica este trabajo.

INDICE

PARTE I – OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN	1
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	3
1.1.- Introducción	5
1.2.- Interés y originalidad.....	6
1.3.- Objetivos.....	6
1.3.1.- Objetivo general.....	6
1.3.2.- Objetivos parciales	7
1.4.- Estructura del trabajo.....	8
CAPITULO 2.- PROCESO DE SHOT-PEENING.	11
2.1.- Aplicaciones industriales.....	13
2.2.- Variables del proceso de SP.....	14
2.2.1.- Intensidad del proceso.....	14
2.2.2.- Densidad de impacto. Cobertura	16
2.2.3.- Tamaño del proyectil.	17
2.2.4.- Dureza del proyectil	17
2.2.5.- Velocidad del proyectil	17
2.2.6.- Ángulo de impacto.	17
2.2.7.- Distancia de separación.....	18
2.2.8.- Forma de los proyectiles.....	18
2.3.- Equipos para el SP.	18
2.4.- Tipos de partículas para el SP.....	19
2.5.- Tipos de SP	19
2.6.- Normativa	20
2.7.- Mejora del comportamiento a fatiga. Corrosión.	20
CAPITULO 3.- ESTADO DE CONOCIMIENTO EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SP.	25
3.1.- Introducción	25
3.2.- Métodos analíticos del SP	26
3.3.- Simulaciones numéricas por elementos finitos.....	27
PARTE II – METODOLOGÍA	41
CAPITULO 4.- MODELO DE COMPORTAMIENTO MECÁNICA DEL MATERIAL.	43
4.1.- Introducción	45
4.2.- Función de fluencia y criterio de fluencia.	46
4.3.- Modelos de endurecimiento.....	47
4.3.1.- Endurecimiento isotrópico.....	48
4.3.2.- Endurecimiento cinemático	49
4.3.3.- Endurecimiento combinado.	50
4.4.- Análisis elastoplástico utilizando el programa de elementos finitos Abaqus®.....	51
4.5.- Comportamiento dependiente de la velocidad de deformación	53

4.5.1.- Introducción	53
4.5.2.- Modelo de Jhonson-Cook	54
4.5.3.- Modelos combinado con endurecimiento isotrópico y cinemático	56
4.6.- Modelo de comportamiento utilizado en las simulaciones	58
4.6.1.- Modelo combinado teniendo en cuenta la velocidad de deformación.....	58
4.6.2.- Características mecánicas del material considerado.....	59
CAPÍTULO 5.- MODELO DE COBERTURA	61
5.1.- Introducción.....	63
5.2.- Modelos de cobertura	63
5.3.- Modelo considerado en las simulaciones	65
CAPÍTULO 6.- MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	69
6.1.- Introducción.....	69
6.2.- El método de los elementos finitos. Generalidades	71
6.2.1.- Antecedentes históricos.....	71
6.3.- Análisis mediante software comercial de elementos finitos.....	72
6.4.- Variables numéricas en el modelo de elementos finitos.....	73
6.5.- Geometría del modelo	77
6.5.1.- Interacción entre la muestra y las bolas.....	79
6.5.2.- Condiciones de contorno.....	79
6.5.3.- Mallado	80
CAPÍTULO 7.- IMPACTO DE UN SOLO PROYECTIL	87
7.1.- Introducción.....	87
7.2.- Huella con diferentes velocidades de impacto.....	90
7.3.- Huella con diferentes ángulos de impacto.....	92
7.4.- Huella con diferentes coeficientes de rozamiento.....	96
7.5.- Huella con diferentes tamaños de bola.....	96
CAPÍTULO 8.- ESTUDIO DE LAS TENSIONES RESIDUALES.....	109
8.1.- Introducción.....	103
8.2.- Simulación del proceso de SP. Modelo de referencia.....	103
8.3.1.- Modelo de cobertura.....	104
8.4.- Tensiones residuales.....	107
8.4.1.- Grado de cobertura.....	110
8.4.2.- Velocidad de impacto	112
8.4.3.- Ángulo de impacto.....	115
8.4.4.- Tamaño de los proyectiles.....	117
CAPÍTULO 9.- ESTUDIO DEL ACABADO SUPERFICIAL	123
9.3.1.- "Parámetros de rugosidad" de una huella.....	133
PARTE IV – CONCLUSIONES.....	187
CAPÍTULO 10.- CONCLUSIONES.....	189
10.1.- Introducción.....	191
10.2.- Consecución de objetivos.....	191

10.3 Conclusiones técnicas.	195
10.4.- Líneas de investigación futuras.	199
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	201
INDICE DE TABLAS	209
INDICE DE FIGURAS.....	211
SIMBOLOS LATINOS.....	216
SIMBOLOS GRIEGOS	218

PARTE I – OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción

El shot peening (SP) es un proceso de tratamiento superficial, realizado en frío, que se emplea para mejorar la resistencia a la fatiga de materiales metálicos. Este proceso es ampliamente utilizado en las industrias aeroespacial, automotriz y de generación de energía. Los discos de turbina y compresores, cuchillas, husillos de rotor, componentes de tren de aterrizaje, muelles, engranajes, bielas, ejes de levas y barras de torsión son componentes típicos que habitualmente son tratados por la técnica de SP.

Este proceso consiste en bombardear la superficie de los sólidos con pequeñas bolas esféricas a alta velocidad. Estas bolas están realizadas en materiales predominantemente metálicos que han sido endurecidos.

El resultado de la colisión de cada bola con la superficie del metal genera una indentación que está rodeada por una región plástica seguida por una zona elástica. Tras el rebote de la bola, la recuperación de la zona elástica crea una gran tensión residual de compresión en el interior de la superficie. Por lo tanto, el análisis del proceso implica el conocimiento del comportamiento mecánico del material tratado, tanto elástico como plástico. De especial interés son sus tasas de deformación y sus modos de endurecimiento.

El resultado del SP puede verse afectado por distintos parámetros que pueden ser clasificados en tres categorías como sigue:

- parámetros del proyectil: material, forma, tamaño, velocidad, ángulo de impacto.
- parámetros del material: geometría, comportamiento (modelo constitutivo).
- parámetros del proceso: intensidad Almen y tiempo de exposición (cobertura).

El estudio experimental se basa en ensayos que son costosos y de difícil evaluación. Las desventajas de estos trabajos experimentales, junto con la aparición de poderosos códigos de elementos finitos, han potenciado la simulación numérica del proceso de SP. La simulación numérica proporciona la posibilidad de realizar un estudio paramétrico del proceso.

1.2.- Interés y originalidad

La deformación plástica producida por el impacto de los proyectiles sobre la superficie de un sólido, no sólo produce tensiones residuales de compresión, beneficiosas desde el punto de vista del comportamiento a fatiga, sino que también modifica el acabado superficial. Este último efecto, poco estudiado, si bien puede ser beneficioso en elementos que presenten un acabado superficial muy áspero, puede ser contraproducente en el caso de materiales que tengan un buen acabado superficial.

La originalidad del trabajo radica en el estudio paramétrico del acabado superficial que se induce sobre un material metálico después de haber sido sometido a un proceso de SP.

Conocer de la evolución de la topografía de la superficie, en función de las distintas variables que intervienen en un proceso de SP, es una cuestión de indudable interés, pues muchos procesos industriales están vinculados a tecnologías de fabricación (esmerilado, pulido o mecanizado) que pueden verse afectadas si, sobre el acabado superficial obtenido de ellas, se aplica un proceso de SP, o si previamente se ha aplicado dicho proceso.

Por tanto, puede resultar muy útil disponer de tablas o gráficos que permitan conocer, en función de los parámetros del proceso, el tipo de rugosidad generado en la superficie de un material tratado mediante SP. Es más, la rugosidad así generada puede vincularse con los distintos grados de acabado superficial establecidos por la normativa Europea. De este modo, es posible relacionar el acabado al que da lugar un proceso concreto de fabricación con la rugosidad característica originada por un determinado proceso de SP.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivo general

El objetivo general de esta Tesis Doctoral se centra en el estudio teórico, mediante simulación numérica, del proceso de SP, con el fin de conocer las características del estado final de la superficie de materiales metálicos tratados con esta técnica. El estudio tratará de determinar la influencia relativa de las distintas variables que intervienen en el proceso.

Se considerarán dos casos; en el primero, se parte de una superficie lisa, en el segundo, de una superficie con un grado de rugosidad determinado. En ambos, se determinará cómo

evolucionan los parámetros que miden la rugosidad en función del número de impactos (cobertura) y de los parámetros del proyectil.

Previamente, se determinarán las distribuciones de las tensiones residuales de compresión que aparecen sobre una delgada capa superficial y que afectan a la vida a fatiga del material tratado.

1.3.2.- Objetivos parciales

1.- Presentar y describir el proceso industrial de SP, señalando qué variables y de qué tipo intervienen en el mismo.

2.- Exponer el desarrollo del estado del conocimiento en lo referente al proceso de simulación del SP, destacando los modelos numéricos más recientes y complejos con los que es posible realizar cálculos tridimensionales con impactos múltiples aleatorios y aislar la influencia de cada uno de los parámetros físicos y mecánicos que determinan la naturaleza de un proceso industrial de SP.

3.- Estudiar los modelos constitutivos de materiales metálicos sometidos a cargas impulsivas repetidas. De qué forma y en qué medida los modelos que mejor describen al comportamiento de un material sometido a un proceso de SP deben tener en cuenta los efectos de la velocidad de deformación y del endurecimiento del material bajo cargas cíclicas, es todavía una cuestión abierta.

4.- Presentar los modelos utilizados para la determinación de la cobertura en la simulación numérica del SP.

5.- Analizar, mediante modelos 2D de elementos finitos, la influencia que sobre la morfología de la huella desarrollada en el material tras el impacto de un único proyectil tienen las distintas variables del proceso de SP.

6.- Implementar un modelo numérico 3D multi-impacto aleatorio basado en el método de los elementos finitos que, siguiendo los trabajos desarrollados por MIAO ET AL., 2009 , BAGHERIFARD ET AL., 2010 , MYLONAS Y LABEAS, 2011 , GAUGLIANO ET AL., 2014 , SANJURJO ET AL., 2014, sea capaz de aislar y describir la influencia que algunos parámetros característicos del procesado mediante SP tienen sobre las tensiones residuales.

7.- Estimar las características superficiales en términos de los parámetros convencionales que miden la rugosidad de una superficie a partir de cálculos basados en el modelo

numérico desarrollado previamente, con el objeto de determinar qué valores de los parámetros ajustables en un proceso de SP dan lugar a un acabado superficial de calidad prefijada.

8.- Aproximar, en función de las características del proyectil y del grado de cobertura, la evolución de los parámetros que miden la rugosidad partiendo de sólidos con superficies de rugosidad inicial conocida.

1.4.- Estructura del trabajo.

El trabajo se ha dividido en cuatro partes, subdivididas a su vez en 10 capítulos, cuyo contenido se describe brevemente a continuación:

Parte I – Objeto de la investigación.

Capítulo 1: Introducción.

En este capítulo se enumeran los objetivos generales y parciales junto con los elementos que aportan mayor interés y originalidad al trabajo.

Capítulo 2: Descripción del proceso de SP.

En este capítulo se detallan los aspectos técnicos más destacables del proceso de SP, su historia, tipos de ensayos, variables que intervienen, normativa y aplicaciones del proceso en la industria. También se describe, provocado por el campo de tensiones residuales de compresión, su efecto sobre la mejora de la resistencia del material a fatiga y a corrosión.

Capítulo 3: Estado del conocimiento de la simulación numérica del proceso de SP.

En este capítulo se presentan los modelos de simulación numérica del proceso de SP desarrollados por distintos grupos de investigadores durante los últimos años, desde los más sencillos, limitados al análisis del impacto de un solo proyectil en una geometría 2D, hasta los más recientes, capaces de calcular el resultado de bombardear una superficie con decenas, y hasta centenas, de proyectiles lanzados aleatoriamente.

Se señalarán, en particular, algunos aspectos importantes de estos modelos, como son el comportamiento del material o la determinación de la cobertura.

Parte II – Metodología

Capítulo 4: Modelos del comportamiento mecánico de materiales dúctiles.

Capítulo 1.- Introducción.

En este capítulo, en un primer apartado, se describen las propiedades mecánicas de los materiales en régimen plástico (criterio de fluencia, regla de flujo, y tipos de endurecimiento -isótropo, cinemático y combinado-).

Posteriormente, se realiza una revisión de los modelos constitutivos dependientes de la velocidad de deformación y se describe el modelo de comportamiento del material utilizado en este proyecto, originalmente propuesto por BAGHERIFARDE ET AL. (2010), que será implementado en el modelo de simulación numérica a partir de los datos experimentales obtenidos por el grupo de SANJURJO (2012) para un acero tipo AISI D2205.

Capítulo 5: Modelo de cobertura.

En este capítulo se presenta el modelo de cobertura aleatorio utilizado en las simulaciones numéricas multi-impacto y que depende, básicamente, de la superficie de la huella desarrollada por un único proyectil al impactar sobre la superficie del material.

Capítulo 6: Modelo de elementos finitos.

En este capítulo se describe el modelo de simulación numérica por elementos finitos a partir de las características propias de este tipo cálculos, como son la geometría, las condiciones de contorno, los tipos de elementos, el mallado, ...

Parte III – Resultados y discusión.

Capítulo 7: Impacto con un solo proyectil.

En este capítulo se aplica el modelo de elementos finitos para obtener la huella generada por el impacto de un proyectil en función de su velocidad, diámetro y ángulo de impacto.

Capítulo 8: Estudio de las tensiones residuales

En este capítulo, partiendo del conocimiento de la huella de un único impacto, se determina el número de bolas con el que debe bombardear aleatoriamente el material para alcanzar una cobertura determinada.

Se discuten los resultados obtenidos para las distribuciones de las tensiones residuales calculadas en función del grado de cobertura y de los parámetros del proyectil.

Capítulo 9: Estudio del acabado superficial

En este capítulo se definen los parámetros que miden la rugosidad más frecuentemente utilizados. Partiendo de un sólido con una superficie lisa, se determina la rugosidad y el modo en que varía esta simulando procesos de SP en función del grado de cobertura y de los parámetros del proyectil.

Se repiten los cálculos y se efectúa un análisis análogo de la rugosidad partiendo de superficies que de inicio han sido modificadas, de modo que se les ha conferido un acabado superficial determinado.

Por último, se presentan unas tablas y unos gráficos que recogen todos los resultados.

Parte IV – Conclusiones

Capítulo 10: Conclusiones

En este capítulo se resumen las conclusiones alcanzadas tras el análisis de los resultados obtenidos acerca del comportamiento de las distribuciones de las tensiones residuales y de los acabados superficiales, calculados en función de los distintos factores que intervienen en un proceso de SP.

El apartado termina con una propuesta sobre las posibles líneas de trabajo futuro abiertas por los resultados de esta memoria.

Referencias bibliográficas

La memoria termina con las referencias bibliográficas consultadas, y con la enumeración de las tablas y figuras que contiene.

CAPITULO 2.- PROCESO DE SHOT-PEENING.

2.1.- Aplicaciones industriales

El tratamiento superficial conocido como shot peening viene siendo utilizado ampliamente utilizado en la industria con el fin de mejorar el comportamiento a fatiga de los materiales. Se aplica, por ejemplo, para mejorar el comportamiento a fatiga de engranajes, válvulas mecánicas, cigüeñales, resortes, palas de turbina, etc. La deformación plástica producida por el impacto de la granalla sobre la superficie de un elemento mecánico o estructural produce tensiones residuales de compresión, beneficiosas desde el punto de vista del comportamiento a fatiga. y modifica la rugosidad de la superficie tratada.

Por ejemplo, los procesos de conformación mecánica de algunos elementos, como las chapas delgadas empleadas en el fuselaje de aviones, generan tensiones residuales de tracción que no son aceptables. El proceso de SP elimina estas tensiones y las sustituye por otras de compresión, incrementando la resistencia a fatiga de las chapas del fuselaje.

En otra aplicación industrial, las tensiones residuales por tracción originadas por procesos térmicos localizados también son susceptibles de ser eliminadas mediante un tratamiento de SP. Las uniones metálicas por soldadura son un ejemplo típico de este tipo de procesos térmicos. El SP consigue, en las zonas soldadas, reducir las tensiones de tracción y, por tanto, evitar la formación de fisuras, haciendo que las uniones sean mucho más seguras.

Indicar además que, si no se quiere perder la capa superficial de tensiones residuales de compresión en un elemento mecánico que ha sido sometido a un proceso de SP, debe evitarse la aplicación posterior de procesos de mecanizado o pulido, o de calentamientos locales.

Dado que el fallo por fatiga se inicia normalmente en la superficie de los elementos mecánicos y estructurales solicitados dinámicamente, el hecho de que dicha zona esté sometida a tensiones de compresión hace que la vida a fatiga aumente considerablemente. Obviamente, cuanto mayor sea la tensión residual de compresión y la profundidad de la capa afectada, mejor será la respuesta a la fatiga del material -y, por ende, del elemento- sometido a un proceso de SP. Por tanto, es de gran interés el conocimiento las siguientes características de la distribución de tensiones residuales:

- Valor máximo
- Profundidad a la que se alcanza el valor máximo

- Profundidad de la zona afectada.

Además, también es sabido que el acabado superficial ejerce una gran influencia sobre la respuesta a la fatiga de los materiales. Por tanto, la variación experimentada por la rugosidad superficial tras el impacto de la granalla puede mejorar significativamente la resistencia al fallo bajo la acción de cargas dinámicas en elementos que, inicialmente, presenten un acabado superficial más o menos tosco. También tiene consecuencias.

Son muchas las variables involucradas en un proceso de SP, lo que hace notable su complejidad. Entre las variables que intervienen, algunas son de tipo estrictamente técnico como:

- Distancia de la boquilla al material.
- Forma de los proyectiles

Otras son propias del proyectil:

- Tamaño y velocidad de la granalla
- Dureza de la granalla
- Ángulo de impacto

Y otras lo son del proceso:

- Intensidad Almen.
- Cobertura o densidad de impacto.

Empezaremos, a continuación, describiendo estos últimos factores por su implicación con el resto.

2.2.- Variables del proceso de SP.

2.2.1.- Intensidad del proceso

La intensidad del proceso se puede medir experimentalmente. Para ello se realiza un ensayo normalizado, denominado ensayo Almen. Este ensayo está recogido en la norma Standard (SAE- J442).

El efecto que se utiliza para la medición es la curvatura producida en una lámina delgada sometida al flujo de partículas esféricas bajo condiciones normalizadas.

El ensayo consiste en someter a una probeta plana delgada sujeta por sus extremos a un flujo de partículas.

El efecto de compresión de la granalla sobre la cara impactada hace que, una vez tratada la probeta y liberada de la sujeción, adopte una curvatura que será mayor o menor en función de la intensidad aplicada (ver figura 2.2). La altura en mm del arco que forma la lámina después del proceso mide la llamada intensidad Almen. La menor intensidad que produzca el efecto deseado será la más eficiente y también la menos costosa. Nótese que es posible conseguir una misma intensidad combinando distintos valores de los parámetros del proyectil.

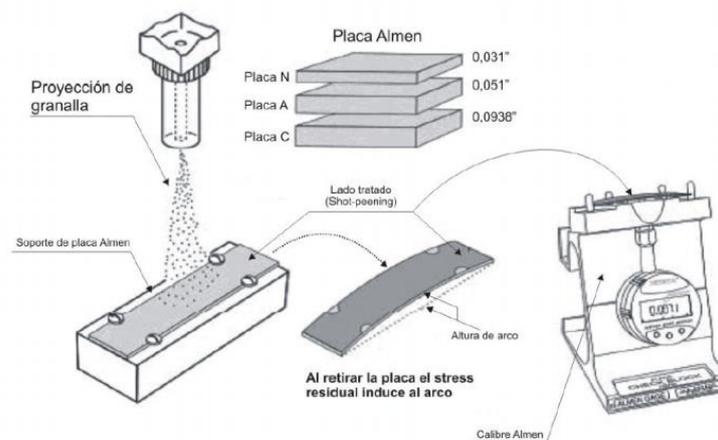


Figura 2 1.- Elementos del ensayo Almen. (SAE J442)

El ensayo se mide en base a rangos de intensidad. Estos rangos están designados por las letras N, A y C (cada una de estas letras hace referencia a una placa de distinto espesor (figura 2.1). La elección de un espesor u otro dependerá del grado de intensidad a medir (tabla 2.1).

Tabla 2 1.-Tabla de clasificación de las placas Almen (SAE-J442)

PLACA ALMEN	ESPESOR (mm)	FLECHA (mm)
N	0.79	< 0.10
A	1.29	0.10-0.61
C	2.39	> 0.61

En la medida de la flecha generada se emplea un reloj comparador, el cual mide la altura de la combinación de la curvatura longitudinal y transversal.

El protocolo que se suele seguir a nivel industrial para medir la intensidad Almen del proceso de SP, es el siguiente:

- Proyectar las partículas sobre una lámina normalizada con las condiciones de trabajo reestablecidas que se pretenden seguir y medir el tiempo de exposición.
- Medir la curvatura de la lámina con el reloj comparador.
- Repetir los pasos anteriores con distintos tiempos de exposición.
- Conseguir el punto ideal de saturación del proceso. En la industria este punto se identifica cuando al doblar el tiempo de exposición se consigue un incremento de un 10% de la altura de la curvatura.

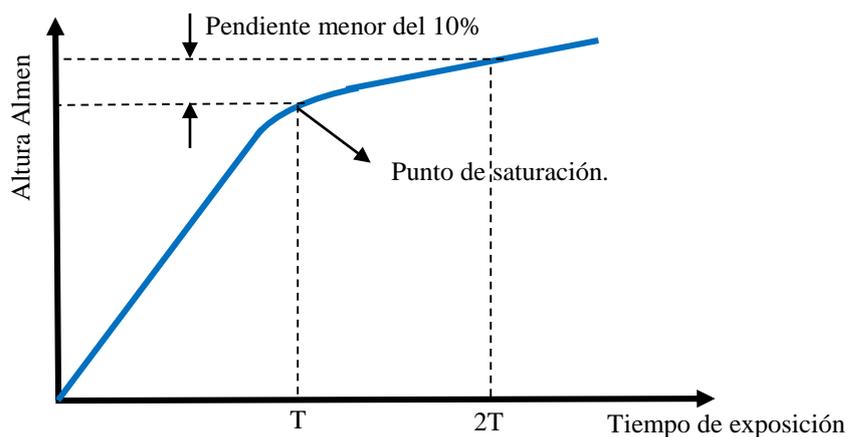


Figura 2 2.- Curva de saturación en la medida de la intensidad Almen.

2.2.2.- Densidad de impacto. Cobertura

La densidad de impacto se mide en tanto por ciento de cobertura de la zona tratada. La saturación se consigue cuando la densidad se aproxima al 100%. Desde el punto de vista teórico, una cobertura del 98% se asume como porcentaje de saturación.

En la industria las coberturas más habituales están comprendidas entre el 150 y 200%. A nivel industrial se emplean varios métodos para medir el factor de cobertura, los más utilizados son (SAE, J442):

- 1.- Realizar en la probeta un pulido espejo. Fotografiar antes y después del proceso de SP. Medir la superficie después del proceso.
- 2.- Retirar la probeta y proyectar la superficie en un comparador donde se dispone de un patrón. Verificar el grado de saturación.
- 3.- Sobre la probeta utilizada poner un papel transparente y dibujar sobre él las huellas que se han producido. Comprobar el grado de saturación.

2.2.3.- Tamaño del proyectil.

El tamaño de la partícula influye directamente sobre la energía cinética transmitida. El incremento del tamaño aumentará la intensidad del proceso. Por otro lado, para un grado de intensidad, un menor tamaño de partícula hará que el proceso sea más rápido, y se mejorará la cobertura sobre la pieza.

2.2.4.- Dureza del proyectil

La dureza de la partícula debe ser mayor que la de la pieza tratada. Esta dureza de partícula tampoco puede ser muy elevada ya que puede conllevar una fragilidad, y por tanto, se romperán más partículas incrementando el coste del proceso. Si por contra la dureza es menor se producirá una reducción de la intensidad del proceso.

2.2.5.- Velocidad del proyectil

La intensidad del proceso de SP aumentará al incrementar la velocidad de los proyectiles ya que también lo hará la energía cinética transmitida. Sin embargo, a mayor velocidad se produce una mayor rotura de partículas, con lo que se reduce la intensidad y a la vez que incrementa el coste del proceso.

2.2.6.- Ángulo de impacto.

La mayor intensidad del proceso se consigue cuando el ángulo de impacto es de 90°. A medida que nos alejamos de la vertical a la superficie, la intensidad del proceso disminuye. Sobre algunas superficies no se puede proyectar con un ángulo de 90°, de modo que, para poder mantener un mismo nivel de intensidad, es necesario aumentar la velocidad o el tamaño del proyectil.

Otros efectos que hacen que el impacto de las partículas no sea estrictamente vertical son:

-La salida del chorro de granalla de la boquilla, que lo hace formando un pequeño cono.

-El impacto de las partículas entre sí.

2.2.7.- Distancia de separación

Otro elemento a tener en cuenta es la distancia de separación entre la boquilla de la máquina de SP y la superficie a tratar. A mayor distancia de separación menor intensidad en el proceso.

2.2.8.- Forma de los proyectiles

Es necesario, para evitar posibles grietas o microfisuras en el material del proyectil, que predominantemente las partículas sean esféricas. Para ello es conveniente desechar todas aquellas que se hayan roto en el proceso o que tengan de partida una forma diferente de SANJURJO ET AL. 2012) Según la norma SAE J442 hay formas de las partículas que no son aceptables. En la tabla 1.1 se muestra la morfología, y en función de ella, el grado de aceptación de las partículas.

Tabla 2 2.- Criterios de aceptación de las partículas abrasivas según norma Standard SAE J444.

Formas aceptables			
	Esfera	Esferoide	Elipsoide
Formas marginales max. 14 en 161 mm ²			
	Nodulada	Elongada	Germinada
Formas inaceptables/ Defectos internos max 5 en 161 mm ²			
	Lágrima	Rota	Mellada
			
	Grietas	Huecos	Rechupes

2.3.- Equipos para el SP.

Los equipos que se emplean para el proceso de SP son similares a cualquier otro equipo utilizado en el proceso de granallado. La diferencia radica en los elementos de control del proceso que se incorporan a los equipos de SP.

La impulsión de las partículas se puede realizar utilizando una turbina o mediante un sistema de aire comprimido. Con la turbina se controla mejor la velocidad y el flujo, mientras que con el aire comprimido se consigue dirigir el chorro de partículas mejor para llegar a zonas, que por su relieve, de tienen difícil acceso.

Dos elementos necesarios, en los equipos de SP, son el separador y el recuperador de partículas. Con estos dispositivos se consigue desechar las partículas rotas y eliminar el polvo generado durante el proceso.

2.4.- Tipos de partículas para el SP

El material para las partículas que más se utiliza es acero al carbono o inoxidable, ya que presenta una buena resistencia , y un índice de rotura de partícula bajo. Estas cualidades hacen que sea un material muy demandado en la industria para estos fines. Por otro lado, las partículas de este material están normalizadas por la norma Standard (SAE J444).

Otro tipo de proyectiles, hoy en día muy utilizado, es la granalla de alambre redondeado. Tiene una buena dureza y un índice de rotura muy bajo. Se encuentra normalizado según la norma Standard (SAE J441).

También se emplean en la industria partículas realizadas de fundición. Al tratarse de un material blando, reducen la intensidad del proceso. Se emplean en aquellos casos en los que no se requiere una alta calidad.

Partículas realizadas en vidrio o cerámica se emplean en aquellos casos en los que el material base no se puede contaminar con otro metal, o en los que se requiere una baja intensidad en el proceso de SP.

2.5.- Tipos de SP

Peening ultrasónico. El SP ultrasónico (USP) es también un tipo tratamiento superficial de trabajo en frío. similar al SP convencional. Difiere en el modo en que se suministra la energía cinética a los proyectiles. En lugar de utilizar un flujo de aire constante, la gravedad o la rotación a alta velocidad de una turbina, se vale de la aceleración de una superficie vibrante denominada sonotrodo. La frecuencia de vibración está dentro de la gama de ondas ultrasónicas (20 kHz), de ahí el nombre de la técnica. Esta técnica puede usar un diámetro mayor de bola para alcanzar una intensidad alta y, así, inducir tensiones residuales de compresión más elevadas (HUO ET AL., 2005)

Micro-shot peening. Los avances en la tecnología SP han incluido la utilización de bolas de diámetro inferior a 100 μm . Este tratamiento se clasifica como un tipo aparte, pues da lugar a tensiones residuales de compresión inferiores a las que genera el SP convencional (Kumar et al., 2013). Dado que la textura de la superficie viene determinada por huellas de tamaño micro, es también un procedimiento atractivo como tratamiento superficial para disminuir y estabilizar la resistencia a la fricción.

Re-peening. El re-peening (RSP) consiste en repetir el proceso de SP normalmente con la finalidad de restaurar las tensiones residuales perdidas. En elementos de máquina, después de un cierto tiempo en servicio, se puede realizar un segundo o tercer proceso de SP para que los elementos fatigados puedan recuperar su capacidad de resistencia mecánica. Aunque el RSP se aplica actualmente en el proceso de mantenimiento de cuchillas y de accesorios de discos de motores de turbina de gas, pocos estudios han sido publicados sobre los efectos del RSP y el modo en que restaura las propiedades a fatiga de los materiales (ZHANG ET LIU., 2009 ; JIANG ET AL., 2007).

Láser shot-peening. La técnica del láser shot-peening (LSP) se basa en la generación de ondas de choque por medio de un láser. Estas ondas inducen un campo de tensiones residuales de compresión, al igual que lo hace un proceso de SP convencional, pero con la ventaja de que se pueden verse afectadas profundidades de hasta 1 mm por debajo de la superficie tratada. Además, da lugar a un acabado superficial muy uniforme en toda la superficie (PORRO, 2010).

2.6.- Normativa

La normativa que se utiliza como referencia para estos procesos son las normas Standard SAE (*Society of Automotive Engineers* (Sociedad de Ingenieros Automotores)). Las normas que se ocupan del SP son: SAE J441, SAE J442, SAE J443, SAE J444, SAE J445, SAE J827.

2.7.- Mejora del comportamiento a fatiga. Corrosión.

Como detallamos a continuación, la técnica del SP es útil también para incrementar la resistencia a la corrosión (TABOR, 1948) (HAMMERSLEY ET AL., 2000).

Las roturas por tracción relacionadas con la corrosión se pueden producir por tensiones estáticas o dinámicas (cíclicas). La exposición al medio ambiente del elemento sumado a la carga de trabajo contribuye a la rotura. En muchos casos, ambientes agresivos incrementan su influencia si se produce un aumento de la temperatura. De este modo se distinguen dos causas principales que originan las roturas por tracción en entornos corrosivos:

1.- *La corrosión bajo tensión (CBT)*: es la causa más habitual de rotura. Este tipo de rotura está relacionada con tensiones de tracción estáticas. Habitualmente se dan en sistemas estructurales expuestos al medio ambiente (ejemplo: el caso de estructuras metálicas de uso público), los puntos más peligrosos son las uniones soldadas.

Se necesitan 3 factores para la aparición de CBT:

- Tensiones de tracción
- Sensibilidad de los materiales
- Ambiente corrosivo.

Estos tres factores formarían un triángulo de modo que, si cualquiera de ellos desaparece, se evitarían las consecuencias de una corrosión bajo tensión. Una forma de hacer desaparecer de forma total o parcial las tensiones de tracción consiste en someter a la superficie del elemento estructural a un proceso de SP. De este modo se eliminan las tensiones de tracción y se rompe el triángulo nocivo (TELEKI, 2002).

2.- *La fatiga más la corrosión*: si un sólido está sometido a cargas cíclicas en un ambiente corrosivo su resistencia a fatiga puede verse reducida a más de la mitad. Al igual que en el caso anterior, es necesario actuar sobre algún factor del triángulo. Al someter al sólido a un proceso de SP, por un lado, se eliminará la corrosión superficial y, por otro, se inducirán tensiones residuales de compresión. Se puede alargar así, hasta en un 1000% (AIAS, 2009), la vida a fatiga de un material.

**CAPITULO 3.- ESTADO DE CONOCIMIENTO EN
LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SP.**

3.1.- Introducción

Son tan numerosos los factores involucrados en el proceso de SP y resulta tan complejo aislar la influencia particular de cada uno de ellos que, como en muchos otros problemas, cada vez ha ido adquiriendo mayor relevancia la modelización del proceso mecánico mediante simulaciones numéricas basadas en el método de los elementos finitos.

Los primeros modelos sólo eran capaces de estudiar el efecto del impacto de un proyectil utilizando geometrías 2D. Posteriormente, a través de distintos tipos de celdas de simetría espacio-secuencial, los modelos de elementos finitos 3D permitieron trabajar con un gran número de proyectiles lanzados de forma determinista y analizar sus efectos sobre las distribuciones de tensiones residuales en función de los parámetros del proyectil y del proceso. Sin embargo, la naturaleza estocástica de los impactos sobre la superficie del material tratado no puede ser representada mediante una regla determinista. Esta incoherencia ha llevado a los investigadores a desarrollar, finalmente, modelos numéricos tridimensionales más complejos en los que los impactos se producen de forma aleatoria.

Dado que el SP es un proceso utilizado industrialmente para mejorar el comportamiento a fatiga de los sólidos mediante las tensiones de compresión inducidas en una delgada capa bajo la superficie, las investigaciones se han centrado preferentemente en el estudio de las distribuciones de las tensiones residuales en función de factores relacionados con el proyectil, como su velocidad o tamaño, o con el proceso, como el grado de cobertura. El cálculo del porcentaje de superficie expuesta al tratamiento que ha sido impactada por los proyectiles al menos una vez, o grado de cobertura, ha sido tratado en profundidad por varios autores dada su importancia en la fiabilidad de los modelos de simulación numérica.

Sólo más recientemente, algunos grupos de investigadores han comenzado a analizar el efecto que el tratamiento de SP tiene sobre la rugosidad de las superficies bombardeadas, ya que el acabado superficial es también un factor de influencia en la resistencia al fallo dinámico bajo la acción de cargas cíclicas.

Mención aparte requiere los estudios que, en la literatura especializada, se han dedicado a los parámetros relacionados con el material. Normalmente, la geometría del modelo es

similar en forma y extensión a aquella sobre la que se efectúan las medidas experimentales. Por otra parte, algunos autores señalan, como cuestión clave, la adecuada consideración del modelo de comportamiento mecánico del material sobre los resultados obtenidos en la modelización numérica del proceso de SP. Por una parte, el efecto de los de proyectiles que impactan a gran velocidad hace que el modelo constitutivo a utilizar deba tener en cuenta la velocidad de deformación, lo que apunta a modelos que implican leyes de endurecimiento isotrópico. Por otra, los impactos repetidos constituyen una carga de naturaleza cíclica de modo que, si el sistema exhibe efecto Bauschinger, entonces será necesario utilizar un modelo plástico con endurecimiento cinemático.

3.2.- Métodos analíticos del SP

Los primeros métodos de estudio del SP fueron puramente analíticos y se basaban, en esencia, en enfoques quasi-estáticos. Los estudios de HERTZ, (1881) ; TABOR (1948) y LI ET AL., (1991) partían de un comportamiento elasto-plástico perfecto del material, y consideraban un solo impacto sobre la muestra.

Más adelante, se empezaron a estudiar la distribución local y temporal de las tensiones a través de la superficie de la muestra, de acuerdo con ecuaciones analíticas derivadas y resueltas para impactos de un solo proyectil (FLAVENOT, 1997). Posteriormente, se desarrollaron modelos analíticos que consideraban la acción de la carga cíclica y la estudiaban bajo condiciones de equilibrio simplificadas (GUECHICI Y CASTEX., 2006). Estos enfoques dinámicos se implementaron en un paquete de software, denominado “Shotpeen”, que permitía obtener la distribución de tensiones residuales a partir del factor de Intensidad de Almen y del diámetro de la bola (CAO ET AL., 1995). El grupo de FATHALLAH ET AL., (1996) introdujo un modelo que tenía en cuenta los efectos de fricción entre las bolas y la muestra, estudiando diferentes ángulos de impacto y considerando la dureza tanto de la bola como de la muestra. En el año 1981, AL-HASSCM (1981) realizó la primera aproximación teórica al cálculo de las tensiones residuales generadas después de la acción de cargas impulsivas partiendo del criterio de la máxima tensión cortante para un material con comportamiento elasto-plástico. En 1995, AL-ABAID (1995) presentó un trabajo analítico con el que obtuvo las primeras curvas de tensiones residuales.

3.3.- Simulaciones numéricas por elementos finitos.

Como hemos señalado, un elemento muy importante en una simulación numérica por elementos finitos del SP es el modelo constitutivo del material. El modelo más utilizado en la simulación del comportamiento de cuerpos sometidos a cargas impulsivas es el modelo de Johnson-Cook, publicado en el año 1983 (JOHNSON Y COOK., 1983). Es un modelo dependiente de la velocidad de deformación y, por tanto, muy adecuado para ser utilizado en cuerpos que sufren grandes deformaciones de forma rápida. Las constantes del modelo son determinadas mediante ensayos a alta velocidad de impacto utilizando la barra Hopkinson.

En el año 1998 se presenta el primer trabajo de simulación numérica con elementos finitos del proceso de SP (LEVERS ET PRIOR., 1998). En este mismo año otro trabajo demuestra que la indentación estática y el SP desarrollan distintas huellas y diferentes tensiones residuales (KOBAYASHI ET AL., 1998). En el año 1999 aparece la primera simulación numérica en 3D multi-impacto (AL-HASSANI ET AL., 1999) en la que se utiliza el modelo constitutivo de Cowper-Symons (COWPER Y SYMONS., 1957)

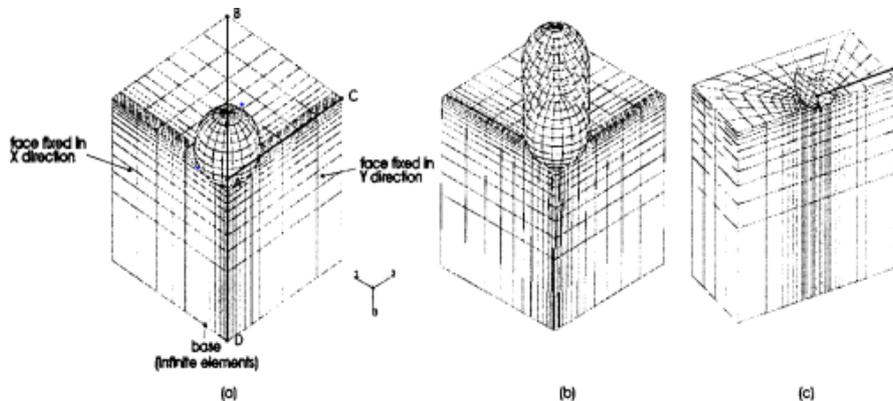


Figura 3.1.- Imagen del primer modelo de simulación numérica en 3D. a) modelo de una bola; b) y c) modelo para varias bolas impactando sucesivamente sobre el mismo sitio (AL-HASSANI ET AL., 1999).

En este mismo año, 1999, se publica el trabajo de KANG ET AL. (1999) en el que se emplea como modelo constitutivo una versión modificada del modelo de Johnson-Cook. Según los autores, este modelo describe el comportamiento del material mejor que el original de Johnson-Cook cuando existen grandes deformaciones.

El trabajo de SCHIFFNER ET AL. (1999) describe, a partir de un modelo axil-simétrico (figura 3.2), la variación de las tensiones residuales de compresión desarrolladas en el

interior de la muestra cuando sobre la misma impactan bolas de diferente diámetro y con distintas velocidades de incidencia.

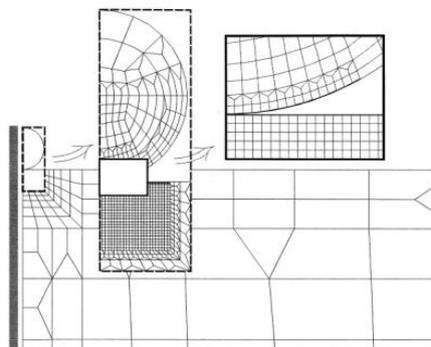


Figura 3 2.- Modelo axil-simétrico en el que se muestra el refinamiento de la malla y del contacto bola-muestra (SCHIFFNER ET AL., 1999).

MEGUID ET AL. (1999), a finales de 1999, presentan un estudio sobre la profundidad que alcanzan las tensiones residuales ya que, hasta entonces, los trabajos se habían centrado fundamentalmente en la magnitud de la tensión residual. Consideran un solo impacto sobre la muestra, con distintos diámetros de bola y diferentes velocidades de incidencia (figura 3.3).

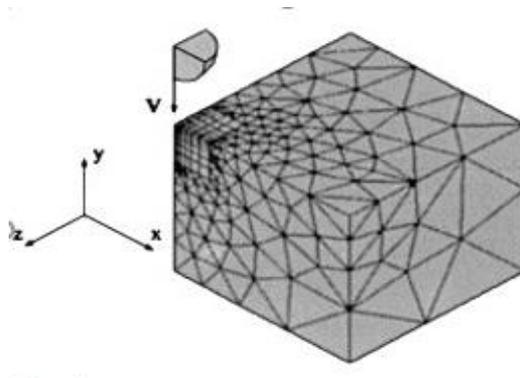


Figura 3 3.- Modelo 3D de impacto en esquina para un modelo cúbico de muestra y para una bola simulada como sólido rígido (MEGUID ET AL, 1999).

HAN ET AL. (2000) incorporan al modelo las bolas como sólidos discretos. Comparan los resultados obtenidos los de simulaciones con bolas tratadas como sólidos elásticos. A pesar de que entre los resultados para las tensiones residuales no hay una gran diferencia, el tiempo computacional empleado en la simulación con sólidos discretos es muy inferior al empleado con sólidos elásticos. El uso de sólidos discretos es muy importante cuando se pretende estudiar el efecto del SP sobre superficies de gran tamaño tratadas con un alto número proyectiles.

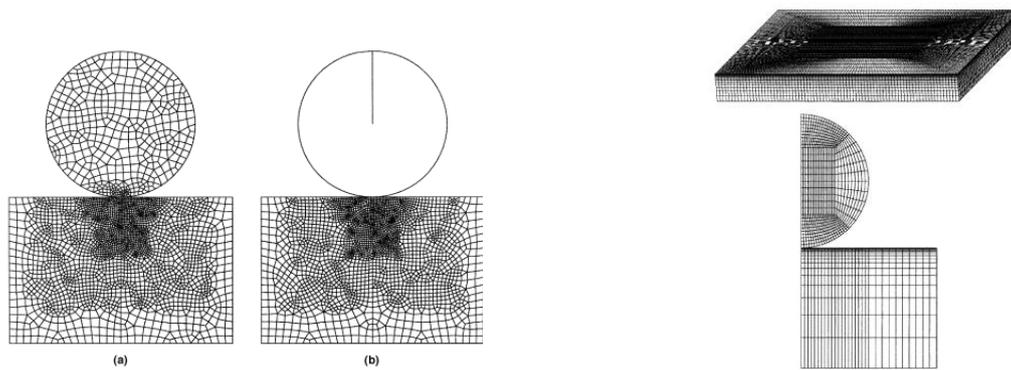


Figura 3 4.- Modelos 2D y 3D desarrollados por HAN ET AL. (2000) en los que comparan el tratamiento de la bola como sólido elástico y como sólido discreto.

Trabajos posteriores se han centrado en el comportamiento del material en las simulaciones del SP. En 2001, GAUGLIANO (2001) publica un trabajo en el que, por primera vez, simula el material de la muestra mediante un modelo constitutivo al que se incorpora el efecto cíclico de las cargas. Este modelo es implementado en el programa Abaqus[®] mediante una subrutina de usuario. Destaca también, en este trabajo, el estudio realizado sobre el factor de intensidad Almen, necesario para la determinación experimental de la velocidad de salida de las bolas. Los resultados de su simulación para las tensiones residuales muestran una gran acuerdo con los obtenidos experimentalmente.

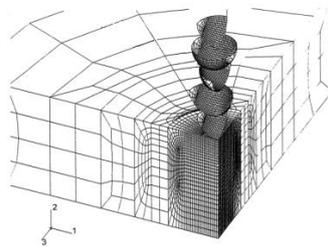


Figura 3 5.- Modelo 3D desarrollado por GAUGLIANO (2001).

MEGUID ET AL (2001) realizan un estudio sobre la cobertura de la zona de impacto. El conocimiento del grado de cobertura es un factor muy importante en el análisis de un proceso de SP. Utilizan un modelo de cobertura determinista formado por capas de bolas que van impactando de forma secuencial sobre el cuerpo. Entre una capa y otra se produce un pequeño desplazamiento lateral para cubrir así toda la zona impacto (figura 3.6).

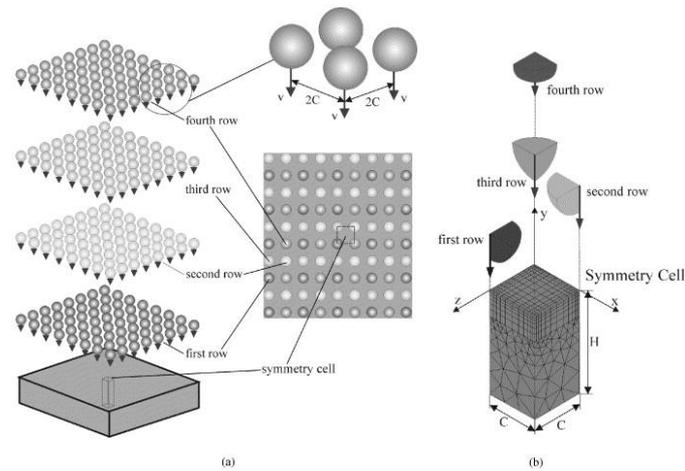


Figura 3.6.- Simulación realizada por MEGUID ET AL. (2001): a) Modelo de cobertura; b) Modelo de impacto de las bolas sobre la superficie del material.

Encuentran que el mejor contacto entre la bola y la muestra es un contacto por rozamiento de Coulomb (función “penalty” en programas comerciales de cálculo por elementos finitos). Como veremos, es el tipo de contacto utilizado en las simulaciones numéricas llevadas a cabo en esta memoria.

TORRES Y VOORWALD (2001), en un estudio experimental relacionado con el comportamiento del material en el proceso de SP, ensayaron a fatiga por flexión rotatoria una muestra de acero AISI 4340, deteniendo en diferentes momentos el ensayo para medir las tensiones residuales por rayos X, concluyeron que:

- Se produce una relajación de las tensiones residuales de compresión inducidas durante los ensayos de fatiga por flexión rotatoria.
- Un incremento de la cobertura no aumenta el valor de las tensiones residuales y, en consecuencia, la vida a fatiga del material.
- Las tensiones residuales, por compresión, empujan las posibles fuentes de grietas por debajo de la superficie.

Los resultados obtenidos por TORRES Y VOORWALD (2001) son muy importantes, ya que, a partir de ese momento, parece necesario tener en cuenta el efecto del ablandamiento del material en el modelo constitutivo empleado en las simulaciones numéricas.

SCHWARZER ET AL. (2002) presentan una simulación en la que proponen un modelo constitutivo, que implementan en Abaqus/explicit que tiene en cuenta la velocidad de deformación y la temperatura.

Utilizan un sistema de cobertura secuencial, con un orden de impacto de las bolas de forma circular, a partir del cual eligen la zona en la que evaluar las tensiones residuales (figura 3.7).



Figura 3.7.- a) Modelo de simulación y b) sistema de cobertura propuesto por SCHWARZER ET AL. (2002)

Concluyen que el aumento de la velocidad de las bolas incrementa la profundidad de la capa comprimida. Sin embargo, cuando el ángulo de impacto se aleja de la vertical, se reduce la profundidad que alcanzan las tensiones residuales.

A partir de 2004 aparecen las primeras publicaciones que estudian la rugosidad superficial producida después del SP. En un primer trabajo, DAI ET AL. (2004) realizan una medida experimental del parámetro PV (máximo valor pico–valle) en el comportamiento de la rugosidad superficial en una placa de aluminio en función del tiempo de procesamiento y del tamaño de las bolas que impactan. Observan que la evolución de la rugosidad superficial se puede dividir en tres fases o etapas: una primera etapa de aumento de rugosidad, una segunda de disminución y, finalmente, una etapa estacionaria. Estas tres fases están relacionadas con diferentes grados de la cobertura superficial.

LIEW Y ONG (2005), estudian el ablandamiento del material y, por tanto, la disminución de las tensiones residuales, a consecuencia del efecto de las cargas cíclicas. Incorporan la temperatura como un elemento que también contribuye dicha relajación. Sobre un modelo 3D, realizan una cobertura secuenciada y determinista de la muestra, ver figura 3.8, de modo que varían la posición de las bolas entre una capa y otra para poder simular a una cobertura total de la superficie.

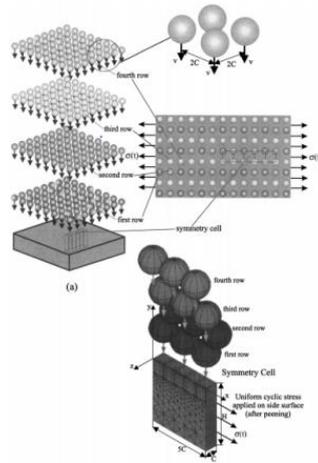


Figura 3 8.- Modelo de simulación y de cobertura propuesto por LIEW Y ONG (2005)

Experimentalmente realizan un estudio en el que someten al material a diferentes ciclos de tensión y de temperatura, y concluyen que la mayor parte de la relajación de la tensión residual se produce en el primer ciclo. Después de 10-30 ciclos, dependiendo de la amplitud de carga, las tensiones se estabilizan. Encuentran que, cuando la velocidad de las bolas es más alta, la relajación del material es mayor.

ROUHAUD ET AL. (2005), partiendo de una geometría 2D axial-simétrica, proponen un modelo constitutivo para el material con endurecimiento isotrópico y cinemático. En sus simulaciones comprueban que, cuando un material sufre el impacto de varias cargas, es necesario incorporar al modelo constitutivo la parte cinemática.

Poco después, MAJZOABI ET AL. (2005), en un modelo 3D, sobre el que realizan una cobertura secuencial, figura 3.9, estudian las tensiones generadas con distintas velocidades de los proyectiles, y concluyen que, aunque las tensiones crecen a medida que se incrementa la velocidad de las bolas, a partir de 90 m/s empiezan a disminuir.

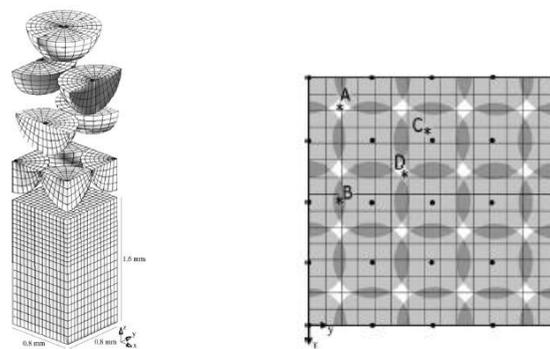


Figura 3 9.- Modelo de simulación y de cobertura secuencial empleado por MAJZOABI ET AL. (2005)

FRIJA ET AL. (2006) hacen uso de un modelo constitutivo que incorpora un modelo de daño. Su objetivo es conocer la evolución de las fisuras en la superficie del material, aspecto éste muy interesante desde el punto de vista de la caracterización de las superficies de materiales sometidos a un tratamiento de SP.

HONG ET AL. (2007), en su modelo de simulación del proceso de SP, consideran las bolas como elementos discretos y analizan la influencia de los contactos entre las propias bolas. Gracias al uso de elementos discretos son capaces de simular una superficie de gran tamaño, con un número muy elevado de proyectiles (ver [figura 3.10](#)).

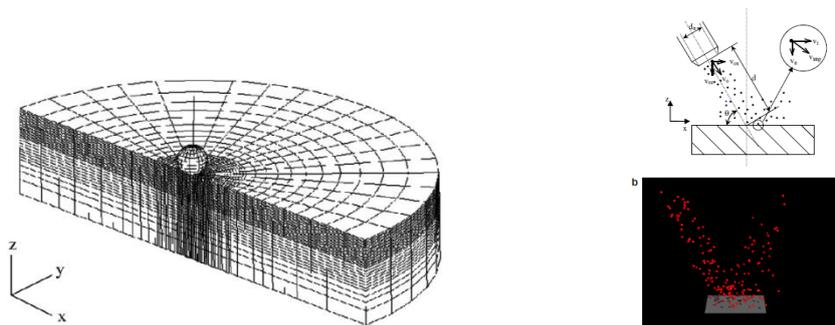


Figura 3 10.- Modelo 3D de Hong et al. e imagen de los proyectiles simulados por elementos discretos. (HONG ET AL., 2007)

KLEMENZ ET AL. (2009) presentan una simulación con un modelo constitutivo isotrópico-cinemático al que incorporan las propiedades visco-plásticas del material. Los autores consideran que las cargas cíclicas en un proceso de SP generan un incremento de temperatura, lo que da lugar a un comportamiento viscoso del material. Implementan su modelo a través de una subrutina en Abaqus®. Programan esta subrutina con una salida de datos por pantalla, de modo que pueden conocer, en cada elemento, la tensión y su deformación actual. Con relación a la rugosidad, estudian la magnitud de los picos y valles en la superficie del material.

MAJZOBI ET AL. (2009) presentan un estudio sobre la influencia del SP en la vida a fatiga por fricción de un material. Utilizan el modelo constitutivo de Johnson-Cook. Concluyen que un tratamiento por SP puede mejorar el comportamiento a fatiga por fricción hasta en un 300%.

También presentan resultados sobre la rugosidad superficial en función del número de impactos. Observan que el parámetro PV aumenta mucho al principio (pocos impactos) y luego se estabiliza ([Figura 3.11](#)).

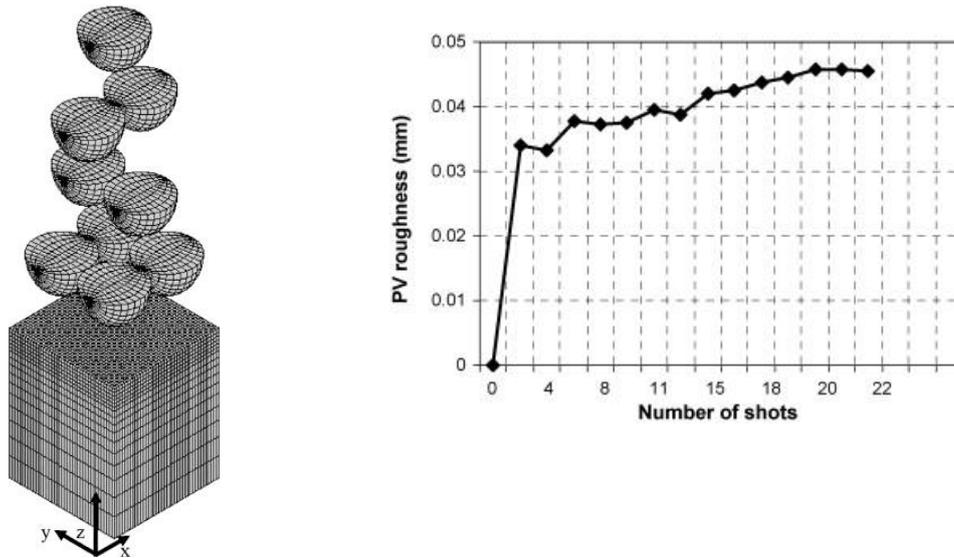


Figura 3 11.- Simulación numérica y gráfica del parámetro PV en función del número de impactos presentada por MAJZOBI ET AL. (2009)

En el trabajo publicado por MIAO ET AL. (2009) destaca el procedimiento propuesto de cobertura aleatorio sobre la zona de impacto. Las bolas impactan sobre puntos elegidos de manera estocástica. Para ello utilizan un pequeño programa *random*, desarrollado en Matlab®. Este sistema de cobertura se parece más al proceso real de SP (figura 3.12).

MIAO ET AL. (2009) también estudian el factor de intensidad Almen. Determinan que la saturación en la curva se produce al 98%.de cobertura de la zona de impacto.

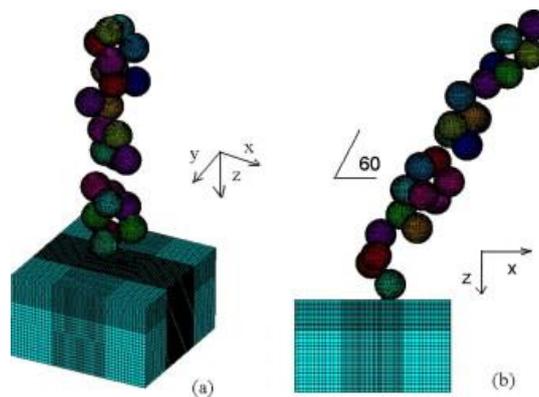


Figura 3 12.- Modelo 3D en el que se observa el procedimiento aleatorio para la generación de los impactos. (MIAO ET AL., 2009).

Realizan un estudio en función de la velocidad de las bolas y del ángulo de impacto de las mismas, llegando a las siguientes conclusiones:

- Para un mismo número de impactos, los que son perpendiculares a la superficie producen mayores tensiones residuales que los oblicuos.
- Con impactos oblicuos se alcanza la cobertura total antes que cuando éstos son perpendiculares a la superficie.
- La rugosidad generada por impactos oblicuos es menor que la generada por impactos perpendiculares a la superficie.

KANG ET AL. (2010) proponen un modelo de simulación numérica al que incorporan el sistema de spring-back, descrito en el apartado 3.2., para la estabilización de las ondas elásticas. El procedimiento de cobertura es secuencial siguiendo el esquema representado en la [figura 3.13](#).

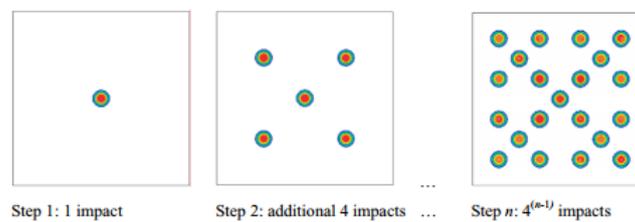


Figura 3 13.- Sistema de cobertura planteado por KANG ET AL. (2010).

En el trabajo de BAGHERIFARD ET AL. (2010) utilizan para el material tratado un modelo constitutivo que tiene en cuenta el efecto de la velocidad de deformación y de las cargas cíclicas. El cálculo de la cobertura lo hacen con una modificación de la denominada fórmula de Avrami.

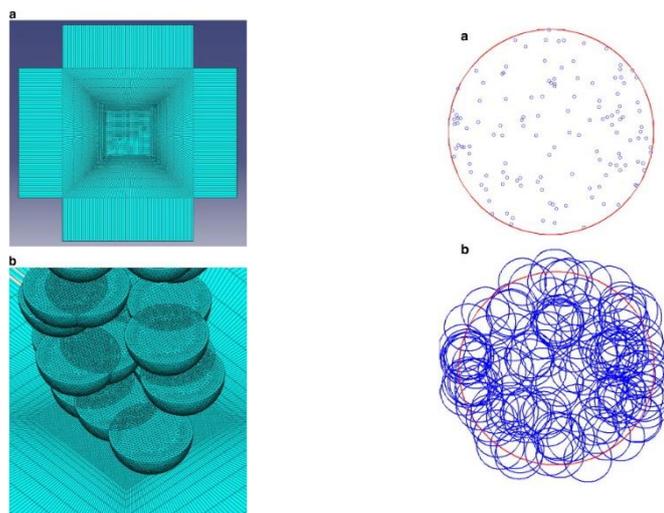


Figura 3 14.- Modelo de simulación por elementos finitos y modelo de cobertura propuestos por BAGHERIFARD ET AL. (2010).

MYLONAS Y LABEAS (2011) desarrollan un modelo de simulación del SP en el que incorporan un sistema de cobertura aleatorio (figura 3.15). Calculan, en una primera parte, el tiempo que debe transcurrir entre dos impactos. En la segunda parte, determinan la rugosidad superficial, a partir de la cual realizan un estudio del factor de concentración geométrico de las tensiones residuales. Muestran que la rugosidad se ve afectada tanto por la velocidad como por el tamaño de las bolas.

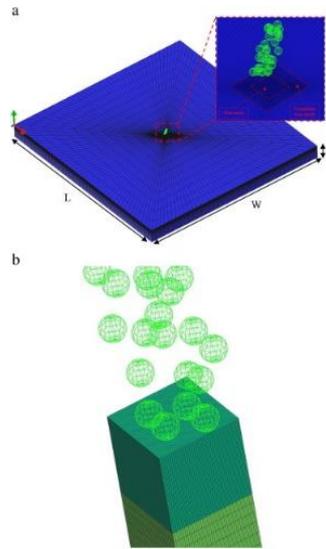


Figura 3.15.- Modelo elementos finitos utilizado por MYLONAS Y LABEAS (2011).en el que incorpora un sistema de cobertura aleatorio

BAGHERIFARD ET AL. (2012) presentan un estudio sobre la cobertura con el fin de reducir el tiempo de computación. Consideran un patrón de impacto aleatorio "guiado" que proporciona una cobertura completa de la superficie con un menor número de impactos. Diseñan este patrón a través de una subrutina en Python que sigue, para cada impacto, los siguientes pasos:

- 1) Elige una posición aleatoria en la zona de impacto para el primer impacto.
- 2) Elimina, del al área de la zona de impacto, el área de la huella del impacto.
- 3) Se parte de una nueva superficie de impacto sobre la que se elige una nueva posición aleatoria, y se vuelve a repetir el proceso.

Este enfoque no permite que la distancia entre dos centros de impacto sea menor que el radio de cada huella. El procedimiento continúa hasta que la zona de impacto está completamente cubierta por las áreas efectivas de las huellas.

Sin embargo, los resultados experimentales no coinciden con los que resultan de aplicar el sistema de cobertura que proponen.

En el mismo año, BAGHERIFARD ET AL. (2012) presentan un nuevo trabajo en el que estudian la rugosidad de las superficies tras ser tratadas mediante un proceso de SP.

Realizan medidas numéricas y experimentales de los parámetros comúnmente utilizados para cuantificar el grado de rugosidad de una superficie. Son capaces de representar en un entorno de Matlab® las superficies en tres dimensiones. Los valores de los parámetros de rugosidad calculados, a partir de las simulaciones numéricas, se aproximan bastante a los medidos experimentalmente. Las conclusiones a las que llegan son:

- La rugosidad aumenta al aumentar el diámetro y velocidad de las bolas.
- La rugosidad también aumenta con la cobertura, hasta un punto de saturación a partir del cual se hace estable.
- Un solo parámetro de rugosidad no es suficiente para describir y cuantificar el estado general de la superficie. Se deben utilizar parámetros adicionales para obtener mayor información acerca de la topografía de la superficie.

KIM ET AL. (2013) realizan un estudio sobre el factor de intensidad Almen con la finalidad de llegar a determinar experimentalmente, de una forma más precisa, la velocidad de salida de las bolas. Conocida la velocidad, validan su modelo comprobando que las tensiones residuales obtenidas numérica y experimentalmente son muy parecidas.

Consideran tres casos en el tratamiento de los proyectiles como sólidos numéricos: rígidos, elásticos y elasto-plásticos. Determinan las tensiones residuales y su variación en función de la velocidad y del ángulo de impacto. Llegan a la siguiente conclusión: cuando el ángulo de impacto se aproxima a la vertical, aumenta el valor de las tensiones residuales.

SANJURJO ET AL. (2014) Y PEÑUELAS ET AL. (2014) publican trabajos en los que el elemento más importante, en la simulación del proceso de SP, es el modelo constitutivo

del material. Proponen un nuevo modelo cuyos resultados son comparados con los que resultan de utilizar Jhonson-Cook, Cowper-Symons, y Chaboche. De analizar las tensiones residuales obtenidas experimentalmente concluyen que es el modelo por ellos propuesto el que más se aproxima a los datos empíricos.

Se trata de un modelo combinado, isotrópico y cinemático, en el que la velocidad de deformación se tiene en cuenta por medio de la parte isotrópica. Por su importancia en este trabajo, se explicará con más detalle en el capítulo cuarto.

TARO ET AL. (2015) publican un estudio sobre la rugosidad en una muestra después de ser tratada mediante SP. Su modelo de simulación numérica es un modelo 3D con un sistema de cobertura secuencial basado en un acoplamiento de triángulos equiláteros, cuyos vértices son los puntos de impacto de las bolas.

Demuestran que la influencia del modelo de endurecimiento es menos significativa. Esto prueba, según estos investigadores, que no es totalmente necesario un conocimiento preciso de las reglas de endurecimiento para la predecir de la rugosidad. Indican que los parámetros de rugosidad de segundo orden, se hacen relativamente independientes de la cobertura y de la velocidad de impacto, siempre que la cobertura esté por encima del 100%, y de 40 m/s la velocidad.

LLANEZA Y BELDUNZE (2015) publican un estudio de la rugosidad superficial resultante tras un proceso de SP analizando: el tamaño de la huella de impacto, el esfuerzo residual de compresión y el endurecimiento de la superficie para seis tipos de aceros.

En el perfil de las distribuciones de las tensiones residuales comprueban que, cuando se alcanza una cobertura próxima al 100%, su valor máximo sólo depende de las propiedades mecánicas del material, mientras que la profundidad viene determinada por el factor de intensidad Almen. A partir de estos resultados, formulan varias expresiones matemáticas para predecir los perfiles de la tensión residual utilizando la intensidad de Almen y las propiedades mecánicas de los aceros. Del análisis del comportamiento de algunos parámetros de rugosidad, comprueban que estos inicialmente crecen con el grado de cobertura, hasta alcanzar un valor constante cuando la cobertura es total

Interpretan que este efecto es debido a la saturación del endurecimiento superficial.

JEBAHI ET AL. (2016) publican un trabajo en el que tratan de desarrollar una metodología robusta mediante la cual se posible simular adecuadamente el proceso de SP con un coste computacional mínimo. Comparan los resultados que proporciona su metodología con los obtenidos experimentalmente. Optimizan los parámetros para la simulación del SP utilizando:

- Projectiles simulados como elementos discretos.
- Una cobertura de la superficie determinada, mediante la ecuación modificada de Avrami, a partir de las huellas de los impactos obtenidas numéricamente.
- Un procedimiento aleatorio para el impacto de los proyectiles. Demuestran que, si el número de impactos es suficientemente alto, de un cálculo aleatorio a otro que no lo es los resultados son prácticamente iguales.

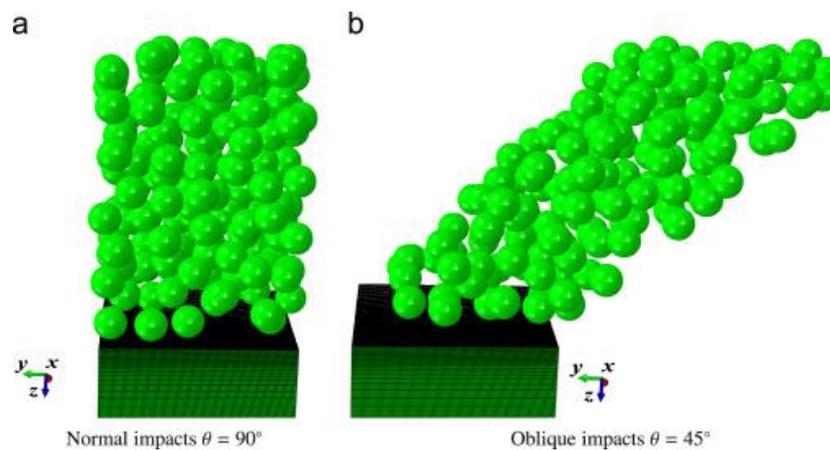


Figura 3.16.- Modelo de elementos finitos y elementos discretos extraído del trabajo de JEBAHI ET AL. (2016). Ángulo de impacto a) 90° y b) 45° grados.

ASTARAE ET AL. (2017) proponen un sistema para la cobertura que evita la repetición de impactos sobre un mismo punto de la superficie, de modo muy parecido a lo que con anterioridad propusieron BAGHERIFARD ET AL. (2012).

El trabajo publicado por PHAM ET AL. (2017) se realiza un estudio exhaustivo de la cobertura de la superficie de impacto. Desarrollan un nuevo sistema de cobertura de acuerdo con el siguiente proceso (figura 3.17):

- 1) Se identifican sobre la superficie de impacto una serie de puntos formando una trama (figura 3.17).
- 2) Para cada impacto se traza un círculo que representa la superficie de la huella.

- 3) A todos los puntos nodos situados dentro de cada círculo se le asigna el valor 0.
- 4) Se calcula el % de cobertura realizando la siguiente operación:

$$C\% = \frac{N^{\circ} \text{ de nodos de valor "0"}}{\text{número de nodos totales}} \times 100 \quad (3.1)$$

siendo C% el porcentaje de cobertura.

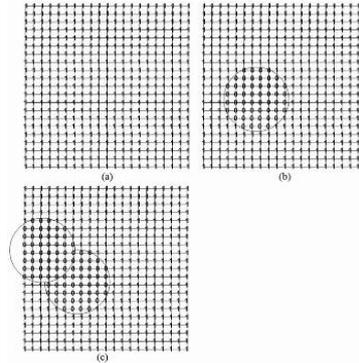


Figura 3 17.- Imagen del sistema de cobertura propuesto por PHAM ET AL. (2017).

El procedimiento termina cuando el valor de C% llega al valor de la cobertura total. Este método es similar al presentado por ASTARAE ET AL. (2017).

PARTE II – METODOLOGÍA

**CAPITULO 4.- MODELO DE COMPORTAMIENTO
MECÁNICA DEL MATERIAL.**

4.1.- Introducción

Algunos materiales, tales como aceros o aleaciones de aluminio, muestran una deformación permanente cuando se aplica una fuerza que supera un cierto límite (límite elástico). A este comportamiento de los materiales se le denomina plasticidad. Estos materiales que inicialmente son elásticos y luego se convierten en plásticos, se les denomina elasto-plástico.

En un análisis elasto-plástico es importante determinar el crecimiento de la tensión a partir de un incremento de la deformación. Sin embargo, si el valor de la deformación está fuera del límite elástico, desconocemos la cantidad de tensión que corresponde a la zona elástica y que cantidad corresponde a la zona plástica. Si estamos en la zona elástica, sabemos cuanto vale su tensión pues la plástica no entra en juego. Entonces podemos obtener el aumento de la tensión elástica multiplicando el incremento de la deformación por el módulo elástico.

Pero, para poder separar las deformaciones elásticas y plásticas en la deformación total, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si la deformación total es pequeña (infinitesimal), se puede asumir que puede ser descompuesta en deformación elástica y plástica. Ya que la relación de desplazamiento-deformación es lineal y su integración se lleva a cabo sobre la geometría no deformada inicial. Teniendo en cuenta que la deformación plástica de metales normalmente ocurre con 0.2% de la deformación, la plasticidad del metal a menudo satisface las pequeñas deformaciones.
- Cuando la deformación es grande, el supuesto de la descomposición por suma de las deformaciones elásticas y plásticas ya no es posible. En este caso, es necesario tener en cuenta las no linealidades geométricas y del material.

Cuando los cuerpos presentan, de forma dominante, dos o tres dimensiones, es más difícil aplicar la teoría de la elasto-plasticidad, pues ahora la tensión no queda definida por una sola cantidad (como si fuera un escalar), sino que se presenta como un tensor de 3×3 . Si consideramos al sólido como tridimensional se podrían realizar múltiples ensayos sobre

el mismo con diferentes combinaciones y lógicamente estas pueden ser infinitas. Por tanto, podríamos decir que es imposible obtener todas las curvas tensión-deformación en sistemas multidimensionales, salvo en casos muy limitados.

Para el desarrollo de la relación tensión-deformación, para todas las combinaciones, es necesario recurrir a modelos físicos básicos que puedan representar a todos los casos posibles. Así, por ejemplo, una medida de la tensión y la deformación en un sistema con varias dimensiones, podría ser independiente del sistema de coordenadas empleado, si el material muestra el mismo comportamiento en todas las direcciones.

La plasticidad se puede definir desde un punto de vista físico a partir de su microestructura o desde un punto de vista fenomenológico a partir de los ensayos.

Para el estudio de la plasticidad es necesario contar con un criterio de fluencia, una regla de endurecimiento y una ley elasto-plástica de tensión-deformación que relacione los incrementos de la tensión y de la deformación en la región plástica. Existen muchos criterios de fluencia a la vez que modelos de endurecimiento para los sistemas multidimensionales.

En esta introducción al comportamiento mecánico del material sólo se van a presentar los elementos necesarios para la definición de los modelos de comportamiento.

4.2.- Función de fluencia y criterio de fluencia.

La función de fluencia es una expresión mediante la cual se determina una tensión que marca el inicio del proceso de plastificación. Estas funciones de fluencia han dado lugar a muchos criterios de fluencia que sirven para saber a que tensión el material deja de tener un comportamiento elástico y pasa a tener un comportamiento plástico.

Dentro de los criterios de fluencia, los más utilizados, especialmente en metales son:

- Criterio de la máxima tensión cortante (criterio de Tresca).
- Criterio de la energía de distorsión. (criterio dependiente de la energía de deformación).
- Criterio de fluencia de Von Mises. En la [figura 4.1](#). se puede ver la comparación de las superficies de Tresca y de Von Mises.

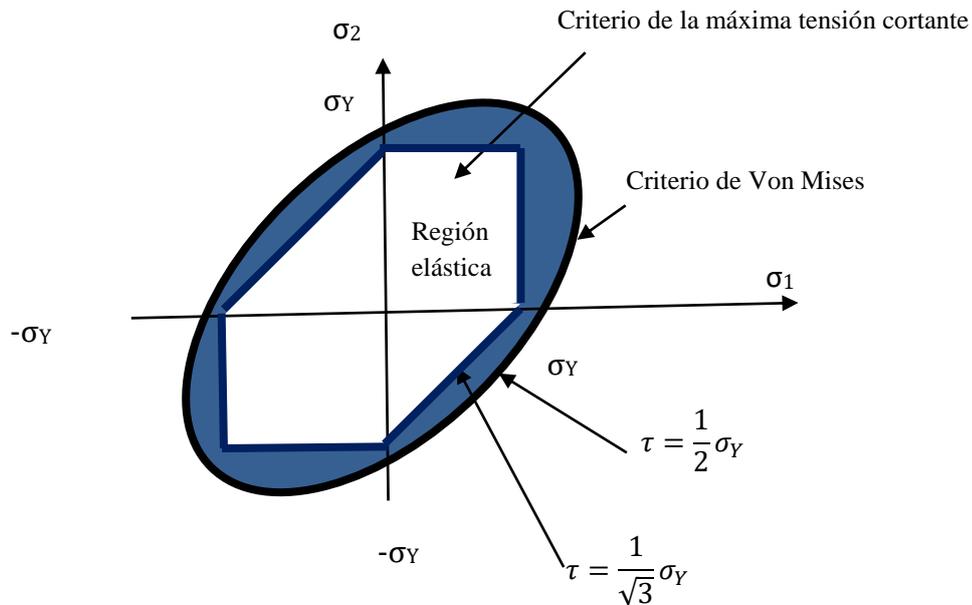


Figura 4 1.- Comparación criterio de Tresca y de Von Mises.(USUI ET AL. 1977).

Todos los conceptos utilizados en los modelos unidimensionales pueden ser generalizados para sistemas multidimensionales. Sin embargo, en el caso unidimensional, es relativamente sencillo obtener la relación entre la tensión y deformación requerida, pues los ensayos se realizan generalmente en un test de tracción uniaxial.. Pero claro la elasto-plasticidad unidimensional solo puede ser utilizada en un número muy limitado de casos.

4.3.- Modelos de endurecimiento

En el criterio de fluencia de Von Mises la tensión de fluencia se mantiene constante. Sin embargo, la tensión de fluencia varía de acuerdo con la deformación plástica. La forma que tiene de variar la tensión de fluencia en un material lo denominamos endurecimiento por deformación. En general existen tres clases de materiales en función de la variación de la tensión de fluencia:

- Aquellos cuya tensión de fluencia crece proporcionalmente a la deformación.
- Aquellos cuya tensión de fluencia que se mantiene constante.
- Aquellos cuya tensión de fluencia que decrece cuando crece la deformación.

Los metales presentan un comportamiento con endurecimiento plástico. Para ellos los modelos de endurecimiento son relativamente sencillos porque la magnitud de la tensión de fluencia mantiene el mismo rango entre la tracción y la compresión

Dentro de los modelos de endurecimiento plástico, podemos considerar tres tipos:

- Modelos de endurecimiento isotrópico. Dentro del periodo elástico, los modelos de endurecimiento isotrópicos presentan un crecimiento hacia afuera manteniendo constante la posición.
- Modelo de endurecimiento cinemático: se mueven de su posición sin crecer hacia afuera.
- Modelos de endurecimiento combinados: Crecen hacia afuera a la vez que se mueven de su posición.

Esta definición de los modelos de endurecimiento por deformación se puede extender a la plasticidad multidimensional. El criterio de fluencia puede ser considerado como la ecuación de un círculo cuyo centro está situado en centro del sistema de referencia y cuyo radio vale $\sqrt{2/3} \sigma_Y$. En el modelo de endurecimiento isotrópico la localización del centro es fijada y su radio va creciendo uniformemente, es decir σ_Y crece. Por otro lado, el modelo de endurecimiento cinemático, el radio es fijo, y la localización del centro se mueve en el espacio de tensiones. En la [figura 4.2](#) se muestra los dos modelos de endurecimiento.

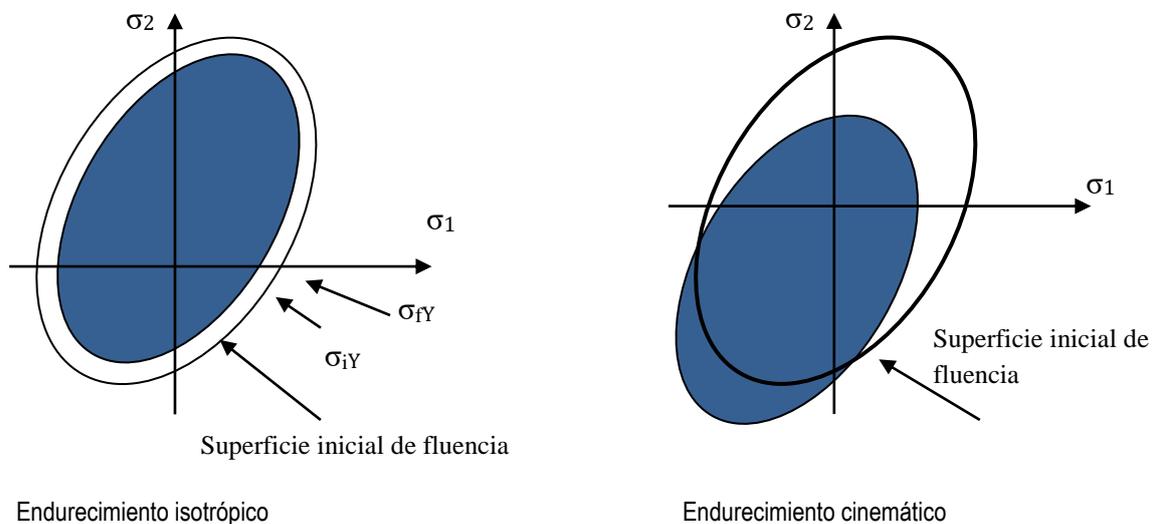


Figura 4 2.- Modelos de endurecimiento en dos dimensiones. Siendo σ_{iy} y σ_{fy} las tensiones de fluencia inicial y final. (USUI ET AL. 1977).

4.3.1.- Endurecimiento isotrópico

En el modelo de endurecimiento isotrópico, la tensión de fluencia crece de acuerdo con la deformación plástica efectiva, y podemos escribir,

$$\sigma_Y = \sigma_Y^0 + H\bar{\epsilon}_p \quad (4.1)$$

siendo $\bar{\epsilon}_p$ la deformación plástica efectiva y H el módulo de plasticidad. Éste último se obtiene del diagrama de tensión-deformación uniaxial por,

$$H = \frac{\Delta\sigma}{\Delta e_p} \quad (4.2)$$

El radio de la superficie de fluencia crece de acuerdo con la deformación plástica efectiva proporcionalmente al módulo de plasticidad. La expresión 4.2 que define el módulo de plasticidad es aplicable en general a un endurecimiento no lineal ya que está definida en forma de velocidad. H es la pendiente de la curva tensión – deformación plástica.

Cuando $H=0$ el material es denominado elástico perfectamente plástico. Este comportamiento perfectamente plástico es una idealización que tiene el propósito de mantener la ecuación constitutiva. Este comportamiento es válido para materiales que presentan un endurecimiento por deformación no muy significativo.

4.3.2.- Endurecimiento cinemático

En el endurecimiento cinemático, la ecuación se puede obtener para la superficie inicial de fluencia introduciendo un cambio en la tensión. Este cambio en la tensión origina una variación del centro de la superficie de fluencia. A esta tensión se la denomina tensión anterior (back) y se suele denotar por α . Entonces un cambio en el centro de la superficie de fluencia, puede ser medido por diferencia entre σ_Y y α . Inicialmente se define el cambio de la tensión de la siguiente forma,

$$\eta = \sigma_Y - \alpha \quad (4.3)$$

siendo η la tensión desviadora, α la tensión anterior y σ_Y la tensión de fluencia.

Según se observa en la ecuación la diferencia entre la tensión de fluencia y la tensión anterior es la tensión desviadora. Así la superficie de fluencia viene definida de la siguiente forma,

$$|\eta| - \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_Y = 0 \quad (4.4)$$

En el endurecimiento cinemático, σ_Y es una tensión de fluencia que se mantiene constante. La tensión anterior depende de la tensión actual y de la deformación plástica

efectiva acumulada $\bar{\epsilon}_p$. El incremento de la tensión anterior en el modelo de endurecimiento cinemático viene dada por,

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} H \Delta e_p \frac{\eta}{|\eta|} \quad (4.5)$$

La deformación plástica efectiva juega un papel importante en la determinación de la evolución de la tensión anterior. Además, el incremento de la tensión anterior tiene una dirección paralela con la tensión desviadora. η ambas con orientación radial en la superficie de fluencia, y por tanto su incremento siempre será en esta dirección.

4.3.3.- Endurecimiento combinado.

La diferencia entre el endurecimiento isotrópico y cinemático es clara. En la primera se incrementa el tamaño de la superficie de fluencia mientras que en la segunda se mueve en centro de la misma. Sin embargo, muchos materiales muestran un comportamiento combinado de ambos modelos. La tensión de fluencia crece debido a la deformación plástica, pero el material fluye antes en dirección opuesta. Esto hace que sea necesario introducir un modelo que combine el endurecimiento cinemático y el isotrópico. Para ello se introduce un parámetro β que varía entre cero y uno. Este modelo la superficie de fluencia viene definida por la ecuación,

$$|\eta| - \sqrt{\frac{2}{3}} [\sigma_Y^0 + (1 - \beta) H e_p] = 0 \quad (4.6)$$

y el incremento de la tensión, es determinado por,

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \beta H \Delta e_p \frac{\eta}{|\eta|} \quad (4.7)$$

Este modelo es, en general, suficiente para representar los dos tipos de endurecimientos. Así cuando β es igual a uno tenemos sólo endurecimiento cinemático y cuando vale cero tenemos sólo endurecimiento isotrópico.

4.4.- Análisis elastoplástico utilizando el programa de elementos finitos Abaqus®.

El programa de elementos finitos Abaqus® (ABAQUS, 2017), posee un gran soporte para los análisis elásto-plásticos. Este programa presenta un apoyo que incluye:

- Elasto-plasticidad utilizando materiales isotrópicos, con modelos lineales y no lineales con endurecimiento isotrópico y/o cinemático.
- Elasto-plasticidad con plasticidad anisotrópica.
- Elasto-plasticidad con criterio de fluencia dependiente de la velocidad.
- Elasto-plasticidad con creep y swelling.
- Elasto-plasticidad para materiales porosos.

Con Abaqus®, para definir el comportamiento elástico, si se asume que el material va sufrir pequeñas deformaciones, las propiedades del material como elástico lineal se define por ELASTIC. Para poder definir el endurecimiento, Abaqus® requiere datos simultáneos de la tensión de fluencia y de la deformación plástica efectiva.

En Abaqus®, los materiales plásticos necesitan tanto la tensión de Cauchy como la deformación plástica logarítmica. La tensión nominal y la deformación ingenieril provienen del ensayo de tracción y por tanto, necesitan convertirse utilizando la siguiente relación,

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{ln}^{pl} = \varepsilon_{ln} - \varepsilon_{ln}^{el} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (4.9)$$

de donde σ_{true} y σ_{nom} son respectivamente la tensión de Cauchy y la tensión nominal, ε_{nom} es la deformación ingenieril y ε_{ln}^{pl} es la deformación plástica logarítmica. En la figura 2.13, se presenta un ejemplo de material en el que vemos la deformación logarítmica, y en la que se observa que el módulo de Young es la pendiente inicial de la curva, $E = 200$ GPa.

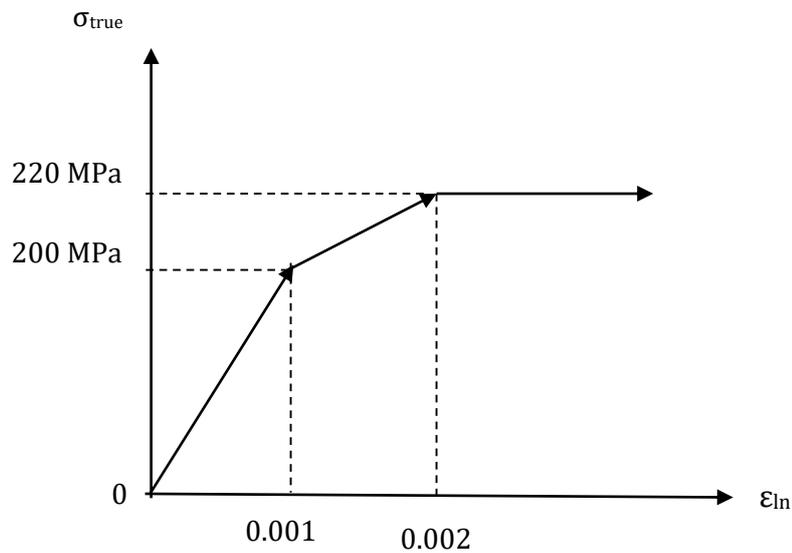


Figura 4 3.- Modelo de endurecimiento elasto-plástico. (KIM, 2015).

Si la tensión se define en MPa, entonces en el fichero de entrada definimos (KIM, 2015)

***ELASTIC**
200. E3, 0.3

Como se observa en la figura, el material lleva a su límite elástico con una tensión de 200 MPa y se produce un endurecimiento hasta llegar a los 220 Mpa bajo una deformación logarítmica de 0.002. Según esto en la definición plástica del material incluiríamos su endurecimiento,

***PLASTIC**
200.0, 0.0
220.0 , 0.002

En el caso particular de querer utilizar un endurecimiento combinado isotrópico y cinemático, el programa cuenta con la opción HARDENING. En cuyo caso en el keyword pondríamos,

***PLASTIC, HARDENING=KINEMATIC.**

4.5.- Comportamiento dependiente de la velocidad de deformación

4.5.1.- Introducción

El conocimiento de las propiedades de los materiales es un elemento esencial para las simulaciones numéricas.

Para poder conocer el estudio del comportamiento de los metales es necesario conocer la respuesta de estos bajo diferentes estados de carga. Los procesos que intervienen en un impacto son complejos y hacen que el número de modelos constitutivos que los pueden representar no se remonten más allá de tres décadas.

Debido a la vinculación existente entre modelo constitutivo y las propiedades del material conviene describir ambos aspectos de forma conjunta. Una vez definido el modelo constitutivo, que mejor representa al material, vamos a exponer las propiedades del mismo. Inicialmente el estudio se ha realizado para materiales metálicos por ser los materiales sobre los que más se aplica la técnica del SP.

Los materiales metálicos, presentan una marcada sensibilidad a la velocidad de deformación, cuando se encuentran sometidos a cargas impulsivas. Bajo estas velocidades de deformación, el comportamiento del material es diferente en relación a su comportamiento estático o quasi-estático. En principio, parece necesario emplear una ley de endurecimiento dependiente de la velocidad de deformación.

Pero según los resultados experimentales presentados por TORRES Y VOOWALD. (2002), cuando tenemos un conjunto de bolas que impactan sobre una superficie, se produce un efecto de relajación de las tensiones residuales de compresión inducidas, a partir de un determinado número de ciclos de carga. En consecuencia, parece conveniente tener en cuenta este efecto también en el proceso en la simulación del SP.

Según lo descrito en el apartado 4.2 sobre el comportamiento elasto-plástico multidimensional, es necesario tener en cuenta que se va producir, cuando el material se encuentra en la zona plástica, un endurecimiento que va a llevar a un aumento de la superficie de plastificación y una variación de su posición. O lo que es lo mismo se va a producir un endurecimiento isotrópico y un endurecimiento cinemático. Pero no podemos olvidarnos que la velocidad de deformación del material es también otro factor del que

no se puede prescindir, en el modelo constitutivo. Bajo estas condiciones no existe ningún modelo que incluya, de forma conjunta, todas estas variables.

Los modelos constitutivos más empleados en las simulaciones del proceso de SP son:

- Modelo de Cowper-Symons.
- Modelo de Johnson-Cook.
- Modelo de Chaboche.
- Modelo Combinado (isotrópico más cinemático).
- Modelo Combinado más velocidad de deformación en la parte isotrópica del modelo.

Los dos primeros modelos son modelos dependientes de la velocidad de deformación, mientras que los modelos tercero y cuarto se aplican a cargas cíclicas. El último modelo presentado por SANJURJO ET AL. (2014) tiene en cuenta ambos efectos: las cargas cíclicas y la velocidad de deformación. Los resultados de las simulaciones por elementos finitos basadas en este modelo realizadas por SANJURJO ET AL. (2014) son las que más se aproximan a sus resultados experimentales.

Para este estudio se han reproducido las simulaciones realizadas por SANJURJO ET AL. (2014) para los modelos: Jhonson-Cook, modelo combinado y modelo combinado con velocidad de deformación. A continuación, se van a describir brevemente estos modelos.

4.5.2.- Modelo de Jhonson-Cook

Estos dos científicos desarrollan un modelo de comportamiento del material que se ha convertido en el más utilizado en simulaciones de problemas de impacto con materiales metálicos (JOHNSON Y COOK., 1983). El modelo es probablemente el modelo termo-viscoplástico más extendido en la actualidad entre los códigos de simulación numérica, bien por elementos finitos, diferencias finitas o SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). Se emplea con éxito en problemas en los que el material está sometido a altas velocidades de deformación, como por ejemplo: impacto balístico, mecanizado, conformado rápido, etc...

Este modelo mecánico reproduce el comportamiento de los materiales sujetos a grandes deformaciones, a altas temperaturas y altas velocidades de deformación. Todos estos efectos se pueden acoplar o no al modelo en función de las necesidades de la simulación. El modelo se puede calibrar fácilmente, obteniéndose, en metales, por lo general,

resultados coincidentes con los de los ensayos. Otra ventaja es que este modelo está implementado en la mayoría de los códigos comerciales de elementos finitos.

La formulación se basa en una ecuación constitutiva de tipo fenomenológico con endurecimiento isótropo que define la tensión equivalente de Von Mises $\bar{\sigma}$ dependiente de tres términos:

- Deformación plástica equivalente $\bar{\epsilon}^P$
- Velocidad de deformación plástica equivalente $\dot{\bar{\epsilon}}^P$
- Temperatura.

expresándose de la siguiente forma (JOHNSON Y COOK 1983):

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^P)^n] \cdot \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^P}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot [1 - T^{m^*}] \quad (4.10)$$

donde A es el límite elástico, B es una constante de endurecimiento del material, n es el parámetro de endurecimiento, C es la sensibilidad a la velocidad de deformación, m es el parámetro de sensibilidad térmica, $\dot{\epsilon}_0$ es el límite inferior de velocidad de la ecuación constitutiva y $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$ es la temperatura equivalente, en donde T es la temperatura en cada instante, T_0 es la temperatura ambiente y T_m es la temperatura de fusión del material.

Para poder obtener el valor de todas las constantes del modelo es necesario realizar varios ensayos a diferentes temperaturas y velocidades de deformación. El modelo de Johnson-Cook presenta una sensibilidad a la velocidad de deformación de tipo lineal, lo cual es contrario a los ensayos experimentales que demuestran que los materiales metálicos, en general, presentan una sensibilidad a la velocidad de deformación no lineal. Por este motivo, al modelo de Johnson-Cook se le han realizado modificaciones introduciendo términos no lineales en la aproximación a la sensibilidad a la velocidad de deformación, como vemos en la ecuación 4.11

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^P)^n] \cdot \left[1 + C_1 \cdot \ln \left(\dot{\bar{\epsilon}}^P \right) + C_2 \cdot \ln \left(\dot{\bar{\epsilon}}^P \right)^{C_3} \right] \cdot [1 - T^{m^*}] \quad (4.11)$$

de donde C_1 , C_2 y C_3 son nuevas constantes del material. Sin embargo, debido a que la ley tiene un carácter multiplicativo, el término de endurecimiento es multiplicado por un

segundo término no lineal, y para altas velocidades de deformación y altas deformaciones, la curva tensión-deformación se incrementa excesivamente.

En las simulaciones realizadas con este modelo constitutivo se ha obviado la temperatura al considerar que el SP es una técnica en frío, y que por tanto, el calor resultante de las deformaciones plásticas producidas es insuficiente como para causar algún tipo de cambio en las propiedades del material (SAE-J444).

4.5.3.- Modelos combinado con endurecimiento isotrópico y cinemático

Como ya se ha comentado el efecto de las cargas cíclicas debido a la incidencia de impactos en la misma posición provoca, en el caso de los metales, un ablandamiento en su etapa plástica. El material, cuando comienza a plastificar, presenta un endurecimiento isotrópico y después, como consecuencia de la relajación, se produce el ablandamiento cinemático. A este efecto de ablandamiento o relajación se le denomina efecto Bauschinger. Es necesario, por tanto, introducir un modelo constitutivo que combine ambos endurecimientos. Esta situación, que normalmente se da cuando tenemos un incremento de temperatura en los materiales, ahora se va a aplicar para la simulación del proceso de SP.

Este modelo combinado fue propuesto por ARMSTRONG Y FREDERICK (1966) para sistemas multiaxiales. Posteriormente, el modelo fue modificado por LEMAITRE Y CHABOCHE (1990) (por ello se conoce como modelo Chaboche). Los primeros que utilizaron este modelo, como ecuaciones constitutivas, para la simulación del proceso de SP, fueron BAGHERIFARD ET AL. (2010). El modelo de Chaboche presenta una ecuación de endurecimiento cinemático y otra isotrópica, cuya deducción se puede encontrar en las referencias: (CHABOCHE, 1979) (CHABOCHE, 1983) (CHABOCHE, 2008).

El endurecimiento isotrópico, está representado en la [figura 4.4.](#) y se describe en la ecuación 4.12.

$$\sigma_0 = \sigma|_0 + Q_\infty(1 - e^{-b\bar{\epsilon}^P}) \quad (4.12)$$

donde $\sigma|_0$ representa la tensión en el límite de fluencia cuando la deformación plástica es nula, el término Q_∞ representa el máximo valor que puede tener la superficie de fluencia y b es la velocidad con la cual se produce el cambio de la superficie de fluencia.

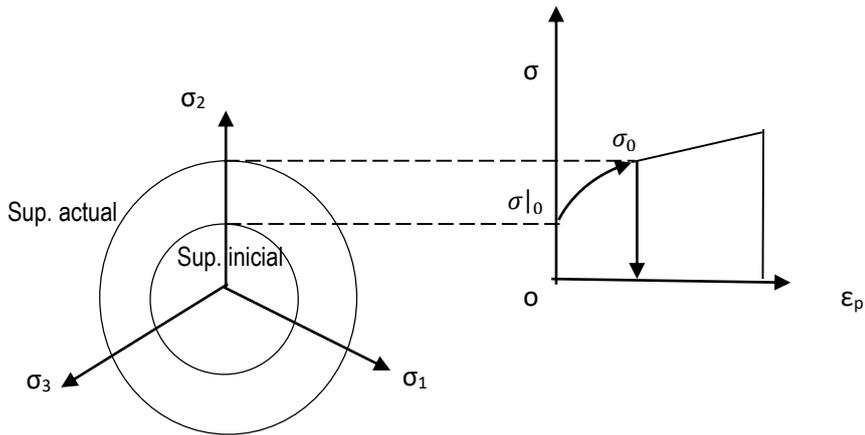


Figura 4 4.- Esquema de endurecimiento isotrópico (LEMAITRE ET CHABOCHE, 1990).

Los parámetros de la ecuación 4.12 se determinan mediante ensayos experimentales observando la evolución que tienen las curvas tensión-deformación plástica para cada ciclo de carga. En función de la velocidad de cambio de la superficie observada en cada ciclo de carga, y del máximo valor alcanzado, se determina el término Q_∞ y el término b , como puede observarse ver en la [figura 4.5](#).

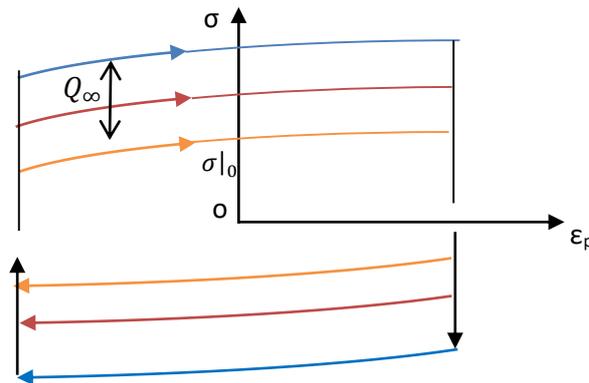


Figura 4 5.- Esquema de la variación de la tensión de fluencia para cada ciclo de carga.

La componente de endurecimiento cinemático, propuesta por Chaboche se puede ver representada en la [figura 4.6](#)

La ley de endurecimiento cinemático de Chaboche es una ley que describe las tensiones de retorno y contiene dos partes: una parte no lineal (denominada de rellamada) (CHABOCHE, 1979) y otra parte lineal que varía con la velocidad de deformación.

$$\dot{X}_i = \underbrace{\frac{2}{3} C_i \dot{\epsilon}^P}_{lineal} - \underbrace{\gamma_i X_i \dot{\epsilon}^P}_{no\ lineal} \quad (4.13)$$

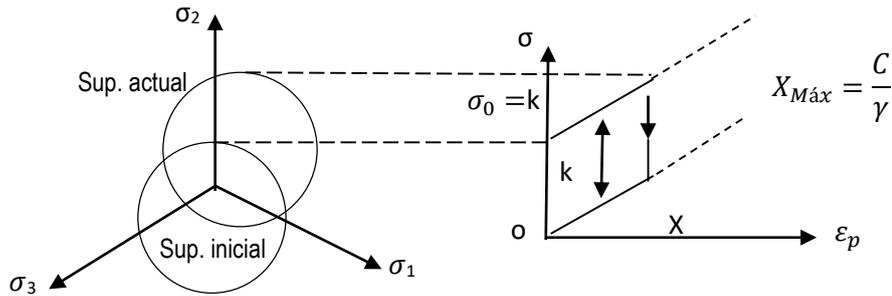


Figura 4 6.- Esquema correspondiente al endurecimiento cinemático (LEMAITRE ET CHABOCHE, 1990)

Al integrar esta ley de endurecimiento cinemático se obtiene la ecuación general siguiente:

$$X = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \bar{\epsilon}^p}) + X_1 e^{-\gamma \bar{\epsilon}^p} \quad (4.14)$$

donde X es la tensión de retorno, C y γ son parámetros del modelo

4.6.- Modelo de comportamiento utilizado en las simulaciones

4.6.1.- Modelo combinado teniendo en cuenta la velocidad de deformación.

Este modelo constitutivo, propuesto por SANJURJO ET AL. (2014), consiste en una modificación de la componente isotrópica del modelo de Chaboche con el objetivo de emplearlo para la simulación del proceso de SP. Parte de la observación de que, en los materiales utilizados en su investigación (aceros dúplex) el valor del crecimiento máximo de la superficie de plastificación Q_∞ y la velocidad de crecimiento de la misma “ b ” se mantienen constantes para diferentes velocidades de deformación.

De este modo, si estos valores se mantienen constantes para distintas velocidades de deformación, se podría prescindir de estos parámetros en el modelo constitutivo. Pero también observa, en las curvas de sus ensayos experimentales, que el ablandamiento varía con el incremento de la deformación. Así, se podrían introducir las tensiones correspondientes al ablandamiento en función de los incrementos de la deformación. Por consiguiente, se estaría incorporando, de forma indirecta, la velocidad de deformación en el modelo constitutivo.

Los resultados del modelo de Sanjurjo et al. muestra que su modelo es el que más se aproxima a los resultados experimentales, de las tensiones residuales obtenidas

(SANJURJO ET AL., 2014). El modelo de Johnson-Cook y el modelo de Chaboche se separan más de los datos experimentales.

En este trabajo se ha seguido este último modelo constitutivo, de modo que también se ha llegado a la comprobación que el modelo que mejor se ajusta es el modelo combinado teniendo en cuenta la velocidad de deformación en la parte isotrópica. Las gráficas de las simulaciones realizadas en este trabajo se presentarán en el capítulo 8 donde se estudian las variables, ya que este modelo nos va a servir de base para el desarrollo de nuestra propuesta de Tesis Doctoral.

4.6.2.- Características mecánicas del material considerado.

En la introducción de este capítulo se ha comentado que los modelos constitutivos, utilizados en las simulaciones numéricas, depende de parámetros que contienen las propiedades de los materiales. Para poder obtener estas propiedades es necesario realizar ensayos experimentales de los mismos a diferentes velocidades de deformación (llegando a velocidades altas, para lo que se necesita una barra Hopkinson) y cíclicos del material. Al no disponer de estos equipos hemos optado por utilizar las propiedades de los materiales obtenidas por ensayos que han realizado otros grupos, cuyos datos se encuentran publicados en la literatura sobre el tema.

El grupo de Sanjurjo et al. da una gran importancia en su trabajo al modelo constitutivo, lo que hace que aporten, en su publicación, los datos de los materiales utilizados para los modelos: Johnson-Cook, combinado y combinado más velocidad de deformación, como podemos ver en las tablas: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ,4.5 y 4.6

ACERO AISI 2205 – D2205C (SANJURJO ET AL., 2014)

Tabla 4 1.- Propiedades estáticas (SANJURJO ET AL., 2014.)

Módulo Elást. (E) N/mm²	Coefficiente de Poisson	fy (N/mm²)	fu (N/mm²)
192433	0.3	632	799

Tabla 4 2.- Propiedades a diferentes velocidades de deformación. (SANJURJO ET AL., 2014.)

Veloc. deformación (s⁻¹)	fy (N/mm²)	fu (N/mm²)
0.0008	651	805
0.02	689	810
0.09	776	862

850	776	1190
-----	-----	------

Tabla 4 3.- Propiedades para el Modelo Johnson-Cook (SANJURJO ET AL., 2014.)

A (MPa)	B (MPa)	C	n
622	785.25	0.035	0.5046

Tabla 4 4.- Diferentes incrementos de deformación del ensayo cíclico. (PÉREZ ET AL., 2014.)

$\Delta\varepsilon$	0.007	0.008	0.009	0.01	0.011	0.012

Tabla 4 5.- Parámetros isotrópicos del modelo isotrópico-cinemático (Modelo Chaboche). (SANJURJO ET AL., 2014.)

Veloc. deform. (s ⁻¹)	$\sigma _0$ (MPa)	Q_∞	b
0.0008	440	-24	12
0.02	480	-23	13

Tabla 4 6.- Parámetros cinemáticos del modelo isotrópico-cinemático (Modelo Chaboche) (SANJURJO ET AL., 2014.)

Veloc. deformación (s ⁻¹)	C(MPa)	γ
0.0008	193556	584
0.02	192772.4	575.44

BAGHERIFARD ET AL (2010) emplean el modelo combinado. Los datos que obtienen después de realizar los ensayos monotónicos y cíclicos, se pueden ver en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 para el acero

ACERO 39NiCrMo3 (nomenclatura italiana) (BAGHERIFARD ET AL., 2010)

Tabla 4 7.- Propiedades estáticas del material. (BAGHERIFARD ET AL., 2010)

Módulo Elást. (E) N/mm ²	Coefficiente de Poisson	fy (N/mm ²)	fu (N/mm ²)
210522	0.3	734	908

Tabla 4 8.- Parámetros cinemáticos del modelo isotrópico-cinemático (Modelo Chaboche) (BAGHERIFARD ET AL., 2010)

$\sigma _0$ (MPa)	C(MPa)	γ
359.26	169823	584

Tabla 4 9.- Diferentes incrementos de deformación del ensayo cíclico (BAGHERIFARD ET AL., 2010).

$\Delta\varepsilon$	0.012	0.014	0.016

CAPÍTULO 5.- MODELO DE COBERTURA

5.1.- Introducción.

En este capítulo se ha incluido la cobertura, ya que es un parámetro del que también depende el resto de variables del sistema. La cobertura se define como el porcentaje de superficie cubierta, por impactos recibidos, en un proceso de SP (SAE-J2277). Podemos decir, que sobre este parámetro no existe ningún estudio que satisfaga todas las necesidades. La cobertura superficial tiene un papel importante en la calidad del proceso de SP, ya que interviene en el comportamiento mecánica resultante de la pieza y en la economía del proceso.

A pesar de que la cobertura es una de las variables más importantes en el proceso SP, no se ha llegado a conseguir para ella un método estándar para su control y predicción. La mayoría de los modelos de simulación de impacto múltiple desarrollados no se han centrado en el estudio de la cobertura, ya que durante muchos años ha sido prioritario el conocimiento de las tensiones residuales. Por otro lado, tampoco se ha pensado, en el hecho de que un exceso de cobertura, en el proceso de SP, pueda provocar también defectos, como puede ser el inicio de fisuras.

5.2.- Modelos de cobertura

Según define SAE J2277 la cobertura en la zona de impacto debe de ser próxima al 100%. Aunque los porcentajes de la misma son cada vez más difíciles de discernir a medida que ésta se aproxima al 98%

SCHWARZER ET AL., (2002) mostraron que existía diferencia en las tensiones residuales según que se utilizaran impactos sucesivos e impactos simultáneos. Así, muchos investigadores evitaron los impactos simultáneos. Sin embargo, otros grupos han considerado impactos simultáneos, aunque no en la misma posición. No se pensó que podría ser bueno para las simulaciones reducir el tiempo de impacto. Se han desarrollado muchos modelos teóricos para establecer el porcentaje de cobertura. Uno de los más utilizados es una variación del modelo de KIRK Y ABAYANEH (1995) presentado por BAGHERIFARD ET AL (2010). Su modelo, expresa una variación de la fórmula de Avrami, y define el tanto por ciento de cobertura en función del área de impacto (A_r).

$$\%C = 100(1 - e^{-Ar}) \quad (5.1)$$

siendo,

$$Ar = \frac{N \cdot (\text{Superficie de la huella})}{\text{Superficie de la zona de impacto}} \quad (5.2)$$

donde N es número de impactos.

La ecuación de KIRK Y ABAYANEH (1995) requiere la determinación de tres parámetros: el tiempo de exposición, el área de huella y ratio de flujo. Estos tres parámetros se determinan mediante ensayos experimentales.

Este modelo refuerza que en las primeras etapas es más probable que las indentaciones se produzcan sin solapamiento, de manera que el incremento del tanto por ciento de cobertura aumenta rápidamente con el tiempo. Posteriormente, a medida que la superficie se va cubriendo, aumenta la probabilidad de solapamiento de modo que el incremento del tanto por ciento de cobertura disminuye progresivamente. Así el porcentaje de cobertura se acerca al 100% pero sin llegar nunca a este valor. Según las ecuaciones 5.1 y 5.2, para conseguir una cobertura del 100% serían necesarios infinitos impactos. Por eso, desde un punto de vista práctico, se considera un 98% como cobertura completa

Más adelante, KIRK (2005) presenta otro trabajo en el que supone que las bolas llegan de forma aleatoria a la superficie a una velocidad constante, generando indentaciones circulares.

En la literatura publicada sobre el tema existe otro modelo desarrollado por HOLDGATE (1994) que amplía los modelos existentes, considerando un sistema general con múltiples fuentes generadoras de impactos. Este modelo establece que si la cobertura, C, de un área de referencia S se conoce en un instante t, después de un intervalo δt se puede conocer a partir de la relación:

$$C(t + \delta t) = 1 - [1 - C(t)] \prod_{j=1}^{N_s} \left[1 - \frac{a_j}{S}\right]^{\delta N_j} \quad (5.3)$$

siendo N_s es el número de fuentes de SP, a_j corresponde a la superficie modificada por la fuente j-ésima en el tiempo δt , δN_j es el número de impactos esperados de la fuente j-ésima en el intervalo de tiempo δt La aplicación del modelo de Holdgate requiere la

determinación de la relación de cobertura después de un intervalo de tiempo inicial de SP. Esta relación se obtiene directamente de mediciones experimentales.

MARSH (1993) indican que una reducción en la cobertura lleva aparejada una reducción de la resistencia a la fatiga de un material resultante del proceso, especialmente en los casos en los que hay corrosión y/o tensiones de tracción en la superficie del material. Este hecho también provoca una desigualdad de la tensión residual entre unas zonas y otras, a la vez que aumenta los riesgos de formación de fisuras (KARUPPANAN ET AL., 2002 ; BAIKER, 2006).

Varios investigadores (CAMMETT, 2007 ; LOMBARDO Y BAILEY, 1996) en pruebas realizadas, sobre distintos materiales, han concluido que no es necesario una cobertura al 100%, ya que los resultados experimentales de la vida a fatiga del material, no implican una gran diferencia cuando la cobertura supera el 80%.

Por otro lado, cuando se llega a este valor de cobertura próximo al 100% también se corre el riesgo de generar micro fisuras en el material (LOMBARDO Y BAYLEY., 1999). Se ha demostrado que por encima del 80% de cobertura se producen al menos dos impactos en todos los lugares de la zona sometida a un proceso de SP. También se indica que la cobertura total no es necesaria para garantizar que el tratamiento de una pieza con SP mejore sus prestaciones. Ahora bien, si hay zonas expuestas a ambientes agresivos es necesario una cobertura total (LOMBARDO Y BAYLEY., 1999).

La posibilidad de que existan pequeñas zonas que no han sido impactadas, no significa que queden puntos débiles en la superficie, ya que, en aquellas zonas próximas a las zonas impactadas, también hay tensiones residuales de compresión. Se considera razonable suponer que, para muchos materiales, lo más adecuado es una cobertura próxima al 90%. (KIRK, 2002 ; KANG ET AL., 1999). Esta conclusión es muy importante, desde el punto de vista de las simulaciones del proceso de SP, ya que reduce el coste computacional de las mismas.

5.3.- Modelo considerado en las simulaciones

Como se ha expuesto, existe en la literatura diferentes formas de incorporar la cobertura en las simulaciones. Hay autores que estudian cómo evolucionan las tensiones residuales a medida que va aumentando la cobertura (SCHWARZER ET AL., 2002; MAJZOBI ET AL., 2005 ; HONG ET AL., 2008 ; KANG ET AL, 2010) . Otros, por su parte incluyen sistemas de

cobertura secuenciales hasta llegar a la cobertura total (KOBASYASHI, ET AL, 1998 ; HAN, K., ET AL. 2000 ; TORRES Y VOORWALD., 2002 ; LIEW Y ONG, 2005).

En la realidad la cobertura en el proceso de SP tiene un alto grado de aleatoriedad. Por este motivo el modelo de cobertura aleatorio propuesto de MIAO ET AL. (2009) parece el sistema más interesante. Mediante una subrutina que se ejecuta en un programa matemático o bien dentro del propio entorno del programa de elementos finitos, se consigue que los impactos de las bolas ocurran en puntos aleatorios dentro de la zona de impacto hasta llegar a la cobertura que se desee.

BAGHERIFARD ET AL. (2012-a) proponen un sistema de cobertura que denominan aleatorio guiado. Se basa en programar un algoritmo que realiza una cobertura aleatoria de modo que, después de cada impacto se resta la superficie de la huella generada. Así el siguiente impacto se produce, también de forma aleatoria, sobre la superficie no impactada. Este proceso se repite hasta alcanzar la cobertura deseada. Con este procedimiento se consigue reducir el número de solapamientos en la zona de de impacto BAGHERIFARD ET AL. (2012-a).

Al no llegar a un valor de impactos, por punto, próximo a la unidad proponen, que en trabajos futuros, sería bueno realizar un estudio que llegue a optimizar este parámetro. Además, los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por LOMBARDO Y BAILEI (1999). Este sistema también lo podemos ver en otros autores que partiendo de una cobertura secuencial de bolas, utilizan un sistema guiado (ASTARAE ET AL., 2017 ; PHAM ET AL 2017), pero obteniendo resultados parecidos a los de BAGHERIFARD ET AL. (2012-a).

Hasta ahora, desde el punto de vista de la simulación numérica, el sistema aleatorio guiado es más eficaz, al conseguir una reducción del número de impactos necesarios para conseguir la cobertura total. Sin embargo, según los autores, no hay una variación relevante en los resultados de las tensiones residuales, y por tanto, en la vida a fatiga de los materiales.

Por ello, el modelo de cobertura elegido en el presente trabajo es un modelo aleatorio. Para la determinación del número de impactos se han utilizado las expresiones desarrolladas por BAGHERIFARD ET AL. (2012-a) dado que es un sistema más simple y con él se obtiene resultados similares.

**CAPÍTULO 6.- MODELO DE ELEMENTOS
FINITOS**

6.1.- Introducción.

La discretización de un sistema continuo transforma las ecuaciones diferenciales en sistemas de ecuaciones lineales. En ingeniería se trabaja con modelos que nos sirven para representar la realidad. Estos modelos necesitan una formulación matemática que simule la realidad, y a su vez, una interpretación adecuada de los resultados. Lo que hace que se planteen ecuaciones diferenciales que necesitan métodos numéricos para intentar encontrar soluciones aproximadas.

Cuando se trabaja con sistemas relativamente sencillos, las ecuaciones diferenciales que se emplean se resuelven con métodos de integración de separación de variables. En cambio, cuando nos enfrentamos a la resolución de sistemas más complejos, es necesario emplear procedimientos de solución aproximados que emplean funciones de prueba para obtener la solución.

Para la resolución de las ecuaciones diferenciales, ingenieros y matemáticos han trabajado de forma diferente. Desde un punto de vista matemático se han desarrollado técnicas más generales para acometer directamente la solución de las ecuaciones diferenciales, como por ejemplo: el método de las diferencias finitas, el método de los residuos ponderados, etc. Los ingenieros acometen el problema estableciendo relaciones entre un sistema discreto real y las partes finitas del medio continuo. También los ingenieros propusieron que se pueden estudiar las propiedades del continuo en pequeñas porciones del mismo o elementos. Esta formulación permite poder abordar una gran cantidad de problemas y desarrollar procedimientos que con el tiempo se han convertido en procedimientos generales de cálculo.

Así se han desarrollado métodos generales que han permitido resolver problemas siguiendo un patrón general que puede adaptarse a todos los sistemas que se pueden discretizar. De este modo el continuo se divide en un número finito de partes o elementos, y cada elemento queda definido por un número finito de parámetros.

En la [figura 6.1](#) se puede observar los métodos numéricos y su evolución hasta llegar a los métodos de discretización hoy en día utilizados (ZIENKIEWICZ Y TAYLOR, 1994)

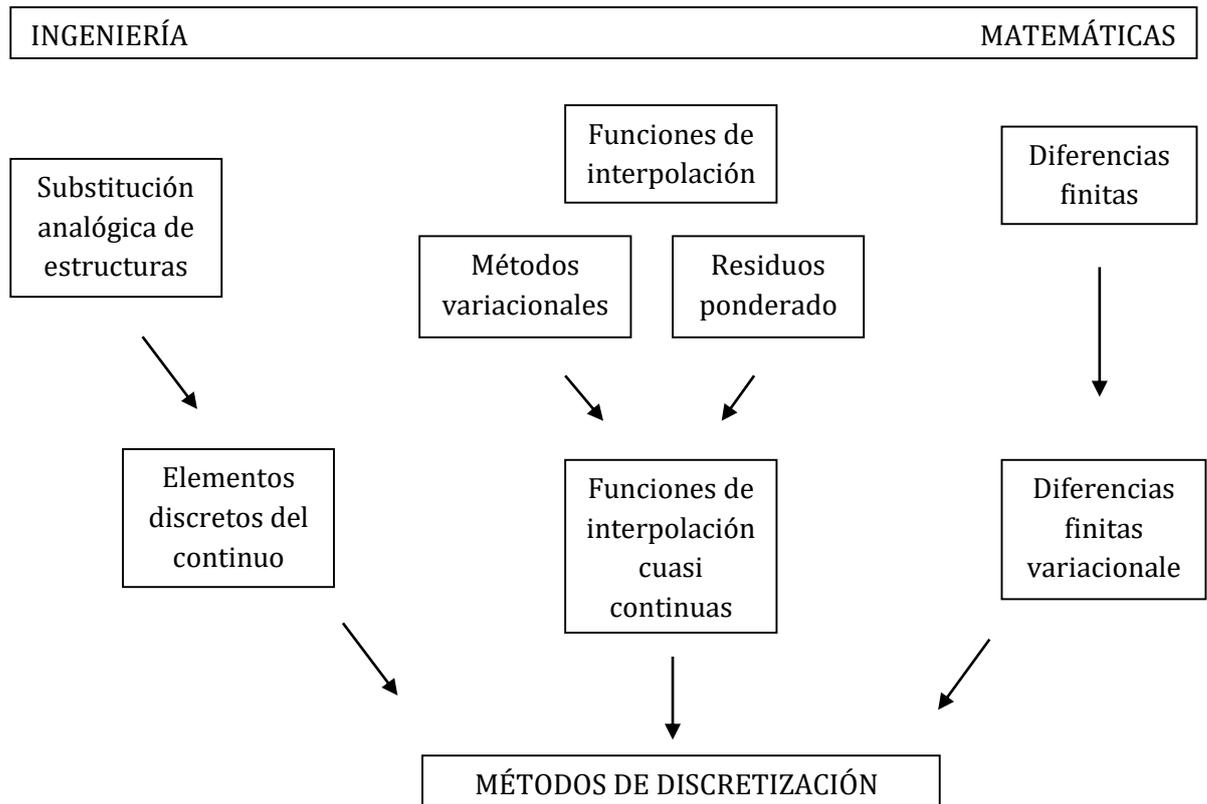


Figura 6 1.- Esquema evolutivo del modelo de elementos finitos (ZIENKIEWICZ Y TAYLOR., 1994)

Al final las ecuaciones diferenciales se transforman en ecuaciones algebraicas lineales o no lineales. Para la resolución de las ecuaciones algebraicas lineales contamos con una serie de procedimientos, normalmente matriciales, que nos permiten obtener soluciones rápidas, aunque se disponga de un sistema que tenga un número elevado de ecuaciones.

Para la resolución de sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales contamos con una serie de métodos, cuya elección está en función del enfoque que se le dé al problema. Estos son los más utilizados:

- Método de Newton-Raphson (BEN-ISRAEL, 1966).
- Método de la secante incremental (CRISFIELD, 1981).

De la misma forma los métodos de discretización para sólidos se pueden clasificar en los siguientes:

- Método de los elementos finitos (FEM)
- Método de los elementos de contorno (BEM).
- Método de las diferencias finitas (FDM)

- Método de los volúmenes finitos (FVM).
- Método espectral.
- Método de la malla libre.

En el caso de problemas no lineales el método de discretización que domina es el método de los elementos finitos. El método de las condiciones de contorno es bastante utilizado en problemas lineales. El método de los volúmenes finitos tiene su gran aplicación para el caso de problemas con un alto grado de no linealidad. El método espectral se emplea sobre todo en la resolución de problemas físicos donde se requiere una transformación de espacios. Por último, los métodos recién llegados de la malla libre son métodos, que, partiendo de la técnica de las diferencias finitas, generan elementos finitos que presentan una construcción variable.

En este trabajo se va a utilizar el método de los elementos finitos.

6.2.- El método de los elementos finitos. Generalidades

6.2.1.- Antecedentes históricos

Es necesario indicar que se pueden encontrar numerosos métodos matemáticos clásicos que realizan aproximación a la resolución de problemas, por lo que puede resultar difícil hablar de los orígenes del método de los elementos finitos, y lógicamente en qué momento exacto surgieron.

El principio del Método de Elementos Finitos se remonta a la mitad del siglo pasado, aunque hasta los años 70 no empezó a utilizarse en simulaciones (TURNER ET AL., 1960). La historia de la tecnología basada en elementos finitos se puede dividir en cuatro fases. En el primer periodo, este método fue aplicado fundamentalmente en problemas mecánicos estructurales. Dentro de este primer periodo surge por primera vez, la denominación, con el nombre de método de los elementos finitos en la literatura abierta en los artículos de CLOUGH (1960) y MARTIN (1966). Estos últimos son los primeros en publicar un artículo de análisis de estructuras no lineales.

Fueron precisamente los métodos incrementales los primeros que se utilizaron en el análisis de problemas no lineales. (TURNER ET AL, 1964)

Posteriormente, se aplicó el método de Newton a elementos cascara, utilizando las diferencias finitas para su resolución, destacando las aportaciones de: BROGAN Y

ALMROTH (1971) Y ALMROTH Y BROGAN (1974), resolviendo los sistemas de ecuaciones no lineales que se planteaban desde la teoría elástica.

A finales de los 70, en un segundo periodo de desarrollo del MEF, los métodos numéricos empezaron a usarse para simulaciones de procesos de fabricación (USUI ET AL., 1977). En un tercer período los investigadores se centraron en crear nuevos métodos para solucionar problemas de mayor dificultad, como por ejemplo para el cálculo de flujos. El cuarto período, desarrollado actualmente, trata de optimizar los algoritmos creados y su comercialización.

El uso del análisis por el Método de Elementos Finitos ha ido aumentando de manera asombrosa en los últimos años. De hecho, se ha convertido es una herramienta esencial para el diseño y la fabricación virtual de cualquier producto.

6.3.- Análisis mediante software comercial de elementos finitos.

Los tres programas comerciales más populares de análisis por elementos finitos son: Abaqus[®], Ansys[®] y Nastram[®]. Los tres cuentan con una interfaz gráfica y una entrada de ficheros para controlar la solución.

El programa elegido para las simulaciones en esta tesis es el programa Abaqus[®] (ABAQUS CAE, 2017). Se ha elegido este programa debido a los buenos resultados que se obtienen con él en la resolución de problemas no lineales.

La metodología empleada en los procesos de simulación numérica por elementos finitos se divide en tres partes:

- . *Pre-Procesado*: En el pre-procesado se incluye la definición del problema mediante la obtención de un modelo. Esta etapa convertirá el modelo más realista cuanto más parámetros se incluyan en su diseño. Por contra, el tiempo de cálculo se incrementará de manera considerable. Dentro del módulo de pre-procesado se incluyen, entre otros, los siguientes aspectos: diseño de geometrías y mallado, propiedades del material, contactos o rozamientos, condiciones iniciales, condiciones de contorno y adaptación de mallado.
- *Análisis o cálculo por elementos finitos*: Este apartado también denominado “solver” (solucionador) es el que realiza los cálculos matemáticos, en muchos casos mediante las iteraciones, en las que se basa el método de elementos finitos.

- *Post- procesado*: En esta etapa de la metodología se procede al estudio de los datos y resultados obtenidos. La mayoría de los programas de cálculo basados en el método de los elementos finitos incluyen una interfaz gráfica que permite mostrar gráficamente los resultados, siendo de esta forma más sencillo llegar a su interpretación.

En la [figura 6.2](#) se muestra el diagrama de flujo general empleado por nosotros para la modelización del problema con Abaqus®.

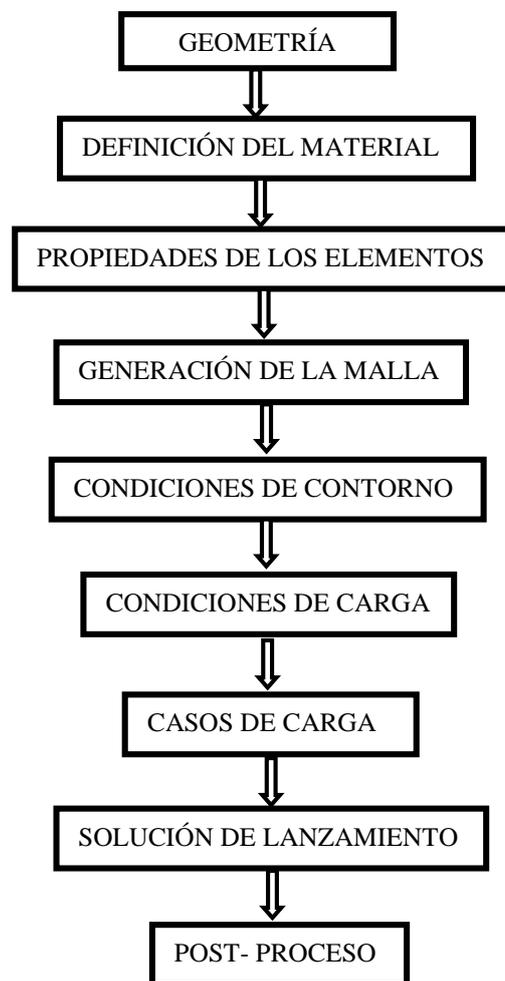


Figura 6 2.- Diagrama de flujo de un proceso de cálculo por elementos finitos

6.4.- Variables numéricas en el modelo de elementos finitos.

El SP es un proceso que depende de factores que son esenciales para poder obtener las mejores condiciones en las superficies así tratadas. Dentro de los factores que influyen

dominantemente en el proceso podemos destacar: diámetro de la bola, velocidad de la misma, ángulo de impacto sobre la superficie, tiempo de exposición y cobertura.

Para poder centrar la simulación numérica, por elementos finitos, del proceso de SP, hay que tener en cuenta otros factores que pueden influir en el resultado final: ajuste de malla, contacto entre la muestra y bola, condiciones de contorno de la muestra, sistema de estabilización de la muestra y forma de modelar las bolas.

Debido al gran número de factores que intervienen, se ha necesitado establecer un orden de los mismos en función de la importancia que tienen sobre el proceso de SP.

1.- *Geometría de las bolas.* Las bolas más utilizadas, como se ha comentado anteriormente, son bolas de hierro fundido con forma esférica. Dentro de la tipología de bolas que recoge la norma SAE J444, las más utilizadas son las bolas de 0.6 mm de diámetro, (dominantemente) de acero S230. Este diámetro influye directamente en la masa y por tanto, en la energía cinética que llevan las bolas, en consecuencia, influirá en la magnitud y profundidad de las tensiones residuales, generadas por el proceso de SP.

Para las simulaciones se considera a las bolas son cuerpos rígidos analíticos. Es decir, según el modelo no experimentan ninguna deformación y no necesitan ser mallados. Con esta concepción se consigue reducir el tiempo computacional.

2.- *Velocidad en las bolas.* La velocidad de las bolas influye directamente en la energía cinética, y por tanto la magnitud y la profundidad de las tensiones residuales, así como el acabado superficial de la muestra. En la práctica la velocidad más comúnmente utilizada se encuentra entre 40 y 60 m/s. Desde el punto de vista numérico se suele realizar un estudio de las tensiones residuales y de la rugosidad para valores comprendidos entre 20 y 120 m/s.

3.- *Ángulo de impacto.* El mayor valor de la tensión residual de compresión y la mayor profundidad de la misma se consigue cuando el ángulo de impacto es de 90°.

Estos tres parámetros están relacionados con la cobertura, pues se comprueba experimental y numéricamente que el número de impactos necesarios para

conseguir un grado de cobertura, es distinto según el ángulo de impacto de las bolas, su diámetro y su velocidad.

4.- *Contacto*. El contacto es un aspecto muy importante en la simulación numérica. Este contacto en un principio es doble: por un lado, un contacto entre las bolas y la muestra, y por otro, el contacto entre las propias bolas.

El contacto entre las bolas y la muestra en las simulaciones de SP se define como un contacto por rozamiento de Coulomb. La consideración del contacto entre las bolas no se ha considerado. El motivo es que un contacto por rozamiento entre bolas moviéndose a esa velocidad tan elevada no altera sustancialmente el resultado y presenta el inconveniente de que incrementa el tiempo computacional (JEBABI ET AL., 2016).

5.- *Estabilización de la muestra*. El primer problema a resolver en una simulación numérica de cuerpos sometidos a cargas impulsivas es la estabilización del sistema. Principalmente porque se requiere conocer los resultados finales del proceso, como son las tensiones residuales, y estos valores sólo se llega cuando el sistema se encuentra estabilizado.

Los cuerpos o sistemas sometidos a cargas dinámicas se estabilizan cuando su energía cinética se hace cero. Para acelerar este proceso existen varios procedimientos:

a.- Dar un tiempo lo suficientemente alto como para que el sistema llegue a estabilizarse y su energía cinética alcance valores próximos a cero. Esta forma de proceder puede alargar mucho el tiempo computacional, el cual, ya de por sí, es bastante largo.

b.- Incrementar las dimensiones de la muestra simulada. Con este método se consigue, en un tiempo relativamente corto estabilizar la muestra. Esto es debido a que la onda elástica no llega a volver a la zona de estudio, en el tiempo computacional previsto. Esta forma de proceder presenta dos problemas: el primero es que al tener que incrementar las dimensiones, también es necesario incrementar el número de elementos finitos de la muestra, lo que hace que también se incremente el tiempo computacional; el segundo es que esta técnica solo se puede aplicar en el caso en el que el

tiempo sea lo suficientemente adecuado como para que la onda no llegue a la zona de estudio.

c.- Realizar un proceso de spring-back. Este proceso consiste en realizar el análisis dinámico (con un solver explícito) primero y después exportar los resultados a un cálculo estático, en el que ya no están las cargas dinámicas y ejecutar el análisis con un solver implícito. Este método es muy eficaz y garantiza la estabilización del sistema, pero incrementa el número de simulaciones, dos por cada análisis que se realice. Por otro lado, estas exportaciones no las permiten, de forma directa, todos los programas comerciales de elementos finitos.

d.- Definir un coeficiente de amortiguación del sistema. El más comúnmente utilizado es el método de los coeficientes de Rayleigh, cuya ecuación es,

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K \quad (6.1)$$

de donde C es la amortiguación, α y β son los coeficientes de Rayleigh, y M y K son respectivamente la matriz de masa y la matriz de rigidez.

e.- El método más eficaz consiste en la utilización de elementos infinitos en las simulaciones. Los elementos infinitos son elementos abiertos que sólo permiten la transmisión nodal de tensiones, deformaciones, desplazamientos en una dirección. De este modo, cuando se emplean, las ondas salen del sistema y no vuelven. Este procedimiento reduce considerablemente el tiempo computacional.

6.- *Condiciones de contorno.* En la muestra se limitan los grados de libertad de modo que no pueda tener ningún movimiento. En la muestra al ser impactada por las bolas va a sufrir grandes deformaciones, lo que implica que, en la zona de impacto es necesario que las condiciones de contorno permitan el desarrollo de estas deformaciones. Con lo cual, la mejor manera de aplicar las condiciones de contorno es sujetar la muestra en su cara inferior impidiendo que la misma tenga cualquier movimiento de rotación y/o de traslación.

Las condiciones de contorno que se aplican a las bolas consisten en limitar todos los movimientos a excepción del desplazamiento hacia la muestra según la dirección de la velocidad.

7.- Mallado. Éste se va a aplicar sólo a la muestra. Las bolas al ser consideradas como sólidos rígidos analíticos, no necesitan ser malladas.

Los elementos finitos utilizados para la muestra, son elementos en forma de cubo (denominados bloques, por los programas de simulación) formados por ocho nodos unidos entre si linealmente, a los que se les aplica un control reducido de integración (para no alargar demasiado los tiempos computacionales). El programa comercial Abaqus® a estos elementos finitos los denomina C3D8R.

La dimensión de estos cubos en la zona de impacto es de 11.90 x 11.90 x 11.90 µm. Este tamaño de la malla, en la zona de impacto, se ha elegido después de realizar un estudio de convergencia en el que los resultados de tensiones, y desplazamientos no cambian significativamente.

A medida que nos vamos alejando de la zona de impacto los elementos finitos van siendo de mayor tamaño para intentar no incrementar demasiado el tiempo computacional.

6.5.- Geometría del modelo

La modelización numérica se ha llevado a cabo utilizando el software comercial de elementos finitos Abaqus® 6.17 (ABAQUS CAE, 1017). La geometría del modelo se ha realizado sobre el soporte de la herramienta CAE de este software comercial. La geometría considerada es similar a la utilizada por MIAO AT AL. (2009), BAGHERIFARDE ET AL. (2010) y también utilizada por SANJURJO ET AL. (2014). Ésta se puede observar en la figura en la [figura 6.3](#).

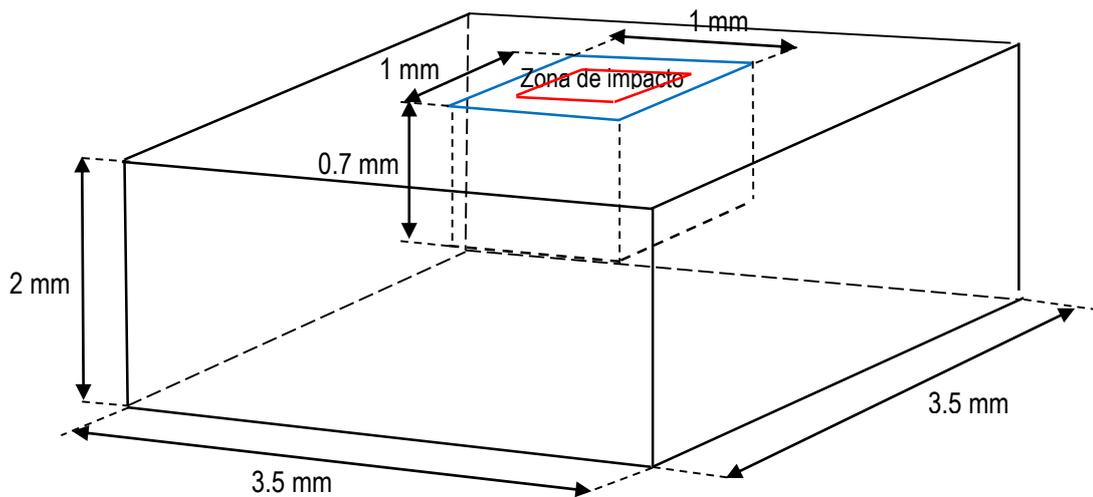


Figura 6 3.- Modelo geométrico de la muestra. utilizado para la simulación geométrica.

Siempre en simulación numérica cuando se pretende estudiar tensiones y deformaciones, el elemento finito que proponen los softwares comerciales es un elemento finito con forma de cubo. Según la geometría de la pieza hay formas que son más fáciles de mallar que otras. Cuando se utilizan elementos finitos, que tienen formas de figuras geométricas rectas, como es el caso, es más sencillo de mallar.

La zona de impacto o de estudio, es un paralelepípedo de dimensiones $1 \times 1 \times 0.7$ mm, que se encuentra dentro de otro paralelepípedo mayor de $3.5 \times 3.5 \times 2$ mm. Esto permite poder aplicar unas condiciones de contorno en la parte exterior del paralelepípedo, con objeto de no interferir en la zona de impacto. De este modo la zona de estudio puede deformarse sin que se vea limitada por las propias condiciones frontera.

Dentro de la zona de impacto se elige una zona todavía más reducida, también con forma de paralelepípedo, de $0.5 \times 0.5 \times 0.7$ mm. Esta zona más reducida evita los efectos de borde como consecuencia de los impactos que se producen en los límites de la misma.

Además, las mayores dimensiones de la zona externa proporcionan estabilidad a la zona de impacto, a pesar de las severas deformaciones que va a sufrir.

Las bolas que impactan sobre el modelo tienen geometría esférica con un diámetro de 0.8 mm. Las bolas han sido simuladas como sólidos rígidos analíticos. Este tipo de sólido tiene un comportamiento perfectamente rígido. Se define, mediante un nodo o punto de referencia, al cual se le asignan todas las propiedades del cuerpo: inerciales, de velocidad

y de condiciones de contorno (figura 6.4). La gran ventaja que tiene este modelo es su simplicidad, ya que no necesita ser mallado para trabajar como sólido rígido. Así el menor número de elementos permite reducir el tiempo computacional. El inconveniente que tiene este tipo de modelo es que al no ser tratado como sólido elasto-plástico puede dar resultados menos aproximados a los datos experimentales. Según los trabajos de KIM ET AL. (2013) la diferencia, en el perfil de tensiones residuales, entre un modelo elástico y un modelo rígido, es muy pequeña.

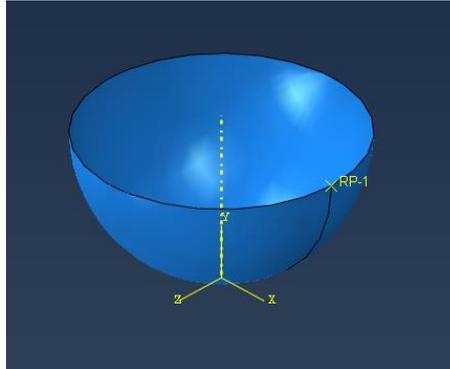


Figura 6 4.- Modelo de sólido rígido analítico utilizado en la simulación numérica con ABAQUS.

6.5.1.- Interacción entre la muestra y las bolas.

La interacción entre las bolas y la muestra se ha modelado como un contacto con rozamiento de Coulomb. Aunque KLEMENZ ET AL. (2009) describen un contacto tipo “pair” de Abaqus, la mayor parte de los trabajos publicados por los distintos grupos consideran un tipo de contacto por rozamiento (MEGUID ET AL., 2002 ; MYLONAS Y LABEAS., 2011 ; BAGHERIFARD ET AL., 2010 ; SANJURJO ET AL., 2014), cuya validez queda corroborada con sus resultados acordes con los experimentales. El coeficiente de rozamiento utilizado inicialmente es de 0.4 (fricción entre un acero inoxidable y un acero estructural) (SANJURJO ET AL., 2014). Este contacto se describe, en Abaqus®, utilizando un contacto general explícito como interacción, con un comportamiento tangencial del tipo “penalty” como propiedad del contacto.

6.5.2.- Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno utilizadas son las siguientes: en la probeta se ha limitado tanto los desplazamientos como las rotaciones, en las tres direcciones del espacio, en la cara inferior de la misma. Las bolas esféricas, por su parte, se han impedido las rotaciones en direcciones X, Y, Z y los desplazamientos en dirección X y Z, cuando impactan bajo

un ángulo de 90°. Estas condiciones de contorno se han modificado cuando el ángulo de impacto es diferente.

6.5.3.- Mallado

Como ya se ha indicado anteriormente sólo se ha mallado la probeta, ya que las bolas se han simulado como sólidos rígidos analíticos. El tipo de elemento finito utilizado para mallar la probeta es el elemento C3D8R de Abaqus®. Se trata de un elemento tipo bloque tridimensional, con ocho nodos unidos linealmente, a los que se aplica una integración reducida. En la [figura 6.5](#) se puede observar la malla.

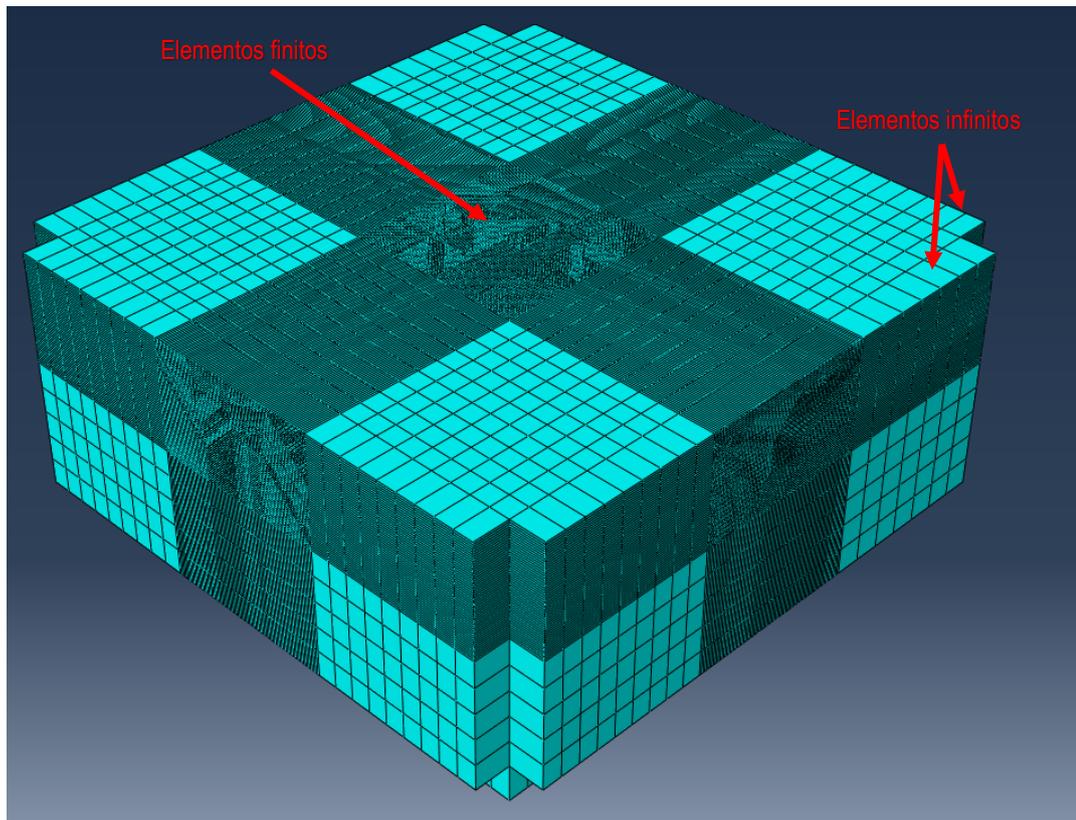


Figura 6.5.- Geometría de la malla utilizada en el modelo para toda la muestra.

Para intentar optimizar el tiempo computacional se ha mallado el modelo de diferentes tamaños. Para ello, se han realizado particiones de modo que una de las particiones realizadas corresponde con la zona de impacto donde la malla es muy fina. Por otro, el resto del modelo donde la malla va creciendo progresivamente..

Como puede apreciarse en la [figura 6.5](#) la malla es más fina está situada en la zona de impacto. Así el número de elementos que tiene es de 84 elementos por arista, en total el paralelepípedo de estudio consta de 416304 elementos. Para poder elegir este tamaño de

elemento se ha realizado un estudio de convergencia de malla cuyos resultados se pueden observar en la tabla 6.1.

Tabla 6 1.- Tabla de los resultados del estudio de convergencia de malla en la zona de impacto.

Dimensión del elemento de malla en la zona de impacto. (μm)	Tensión residual máxima de compresión S11 (MPa)
41.7 x 41.7 x 41.7	-765.92
19.2 x 19.2 19.2	-818.17
11.9 x 11.9 x 11.9	-837.75
10.8 x 10.8 x 10.8	-837.94

Este tamaño tiene la proporción de 1/20 en relación al tamaño de la huella (SAE-J2441). Además, este tamaño no sólo cumple los requisitos de convergencia, sino que también hace que las simulaciones tengan tiempos computacionales adecuados. El ordenador de trabajo, con el que se han realizado las simulaciones tiene las siguientes características:

- Procesor: INTEL i7, 6100K
- Memoria RAM : 32 Gb DDR4
- Disco duro: 240 Gb SSD.
- Disco duro: 2000 Gb S-ATA
- Tarjeta de video: N-vidia Geforce GT 740 2Gb DDRS.

Los tiempos computaciones se exponen en la tabla 6.2. Estos tiempos están dados para el modelo tipo: malla en zona de impacto de 11.9 x 11.9 x 11.9 μm , velocidad de las bolas de 40 m/s, ángulo de impacto de 90 °, 98% de cobertrua, hasta llegar a la estabilización del sistema.

Tabla 6 2.- Tiempos computaciones, para modelo de elementos finitos tipo, en función del número de bolas.

Número de bolas	Tiempo computacional (s)
73	59760
137	109080
147	135325
244	192492
280	1008000

Fuera de la zona de impacto el tamaño de la malla va siendo progresivamente cada vez mayor hasta llegar a un tamaño máximo de 125 X 125 x 117 μm .

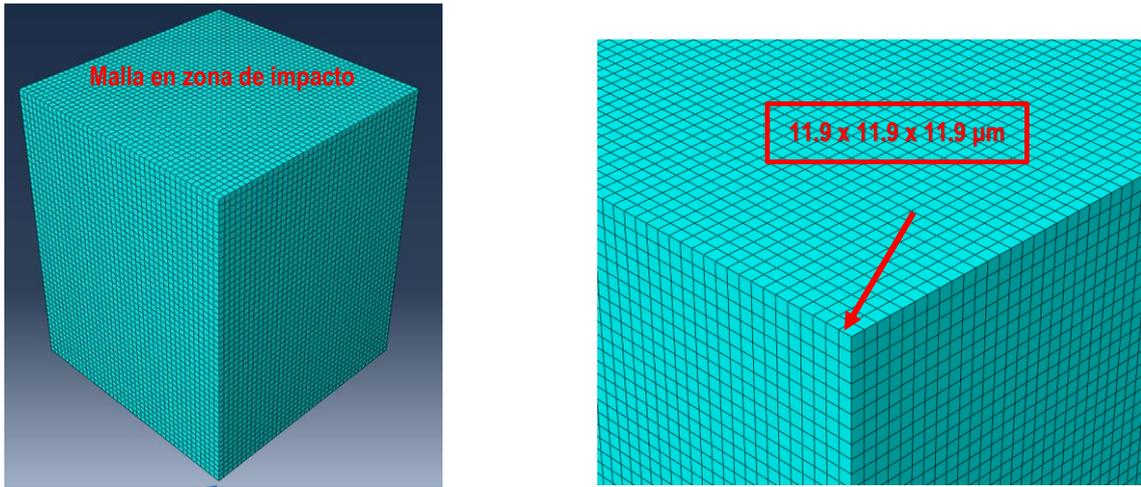


Figura 6 6.- Detalle de la malla en la zona de impacto.

Al modelo geométrico inicial se le han añadido volúmenes en todas las superficies laterales, a excepción de la superficie de impacto, con la finalidad de que en estas zonas se incorporen los elementos infinitos. Estos elementos permiten disipar las ondas elásticas generadas por los impactos, evitando que vuelvan al modelo y así conseguir una estabilización en un tiempo menor. Estos elementos son elementos infinitos del tipo CIN3D8 de Abaqus®. Se trata de elementos tridimensionales lineales de ocho nodos, que no están cerrados y que tienen una única dirección de salida (figura 6.5).

PARTE III – RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

**CAPÍTULO 7.- IMPACTO DE UN SOLO
PROYECTIL.**

7.1.- Introducción.

Como se ha indicado anteriormente, para poder determinar la cobertura es necesario, según el modelo de BAGHERIFARD ET AL (2010) conocer la huella desarrollada en el impacto. Para ello se ha definido un modelo de simulación numérica por elementos finitos para el impacto de un solo proyectil. La superficie de la huella que describe la bola sobre la muestra se ve afectada por las variables que influyen en el proceso de SP. Por este motivo, en este capítulo se han estudiado las huellas desarrolladas por la bola en función de dichas variables. Los estudios que se han realizado son los siguientes:

- Estudio de la huella en función del modelo constitutivo.
- Estudio de la huella en función de la velocidad de impacto.
- Estudio de la huella en función del ángulo de impacto.
- Estudio de la huella en función del diámetro de la bola.
- Estudio de la huella en función del coeficiente de rozamiento.

El modelo de simulación numérica por elementos finitos desarrollado es un modelo 3D en el que impacta una bola sobre la muestra (MUB), como se puede observar en la [figura 7.1](#). Algunos grupos (AL-HASSANI ET AL., 1999 ; SCHIFFNER ET AL., 1999 ; HAN ET AL., 2000) (ROUHAUD ET AL., 2005) utilizan para este fin un modelo axil-simétrico. Se ha optado por el modelo 3D, porque además de ser más realista, es imprescindible para determinar la huella producida por bolas con distintos ángulos de impacto.

Una vez que se ha definido el modelo ([figura 7.1](#)) surge la cuestión de cuál es el modelo constitutivo que mejor describe el comportamiento del material. En principio, por tener un impacto parece lógico pensar que un modelo dependiente de la velocidad de deformación sería el más adecuado

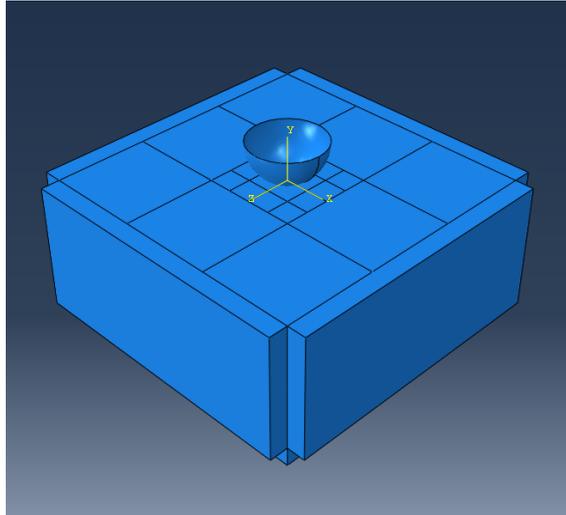


Figura 7. 1.- Modelo 3D con una sola bola.

Pero también hay que tener en cuenta que, en la realidad, en el proceso de SP, cuando la superficie de la muestra sufre múltiples impactos, se va a producir además del endurecimiento isotrópico un endurecimiento cinemático, de manera que este efecto debe de ser contemplado en la simulación. Por eso se ha optado por realizar dos simulaciones: una con el modelo constitutivo de Jonhson-Cook y otra con el modelo combinado más la velocidad de deformación, y comparar los resultados. Para poder establecer una correspondencia, el modelo de una bola se ha aplicado con los siguientes valores de referencia de los parámetros (VRP):

- \varnothing : 0.8 mm
- V : 40 m/s
- α : 90°

siendo \varnothing y V el diámetro y la velocidad de la bola, y α el ángulo de impacto.

Las propiedades del material que se ha utilizado en las simulaciones corresponden con las del acero D2205c las cuales se han detallado en el capítulo 6.

A modo de referencia en la [figura 7.2](#) se puede ver un esquema de una huella donde se indican los sentidos de los ejes coordenadas, el diámetro de la huella (o los semiejes) y el sentido de la deformación.

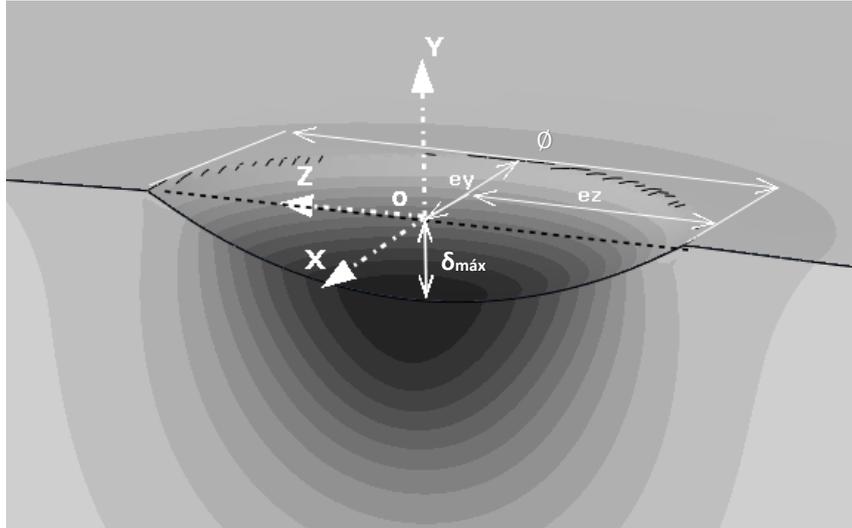


Figura 7.2.- Esquema de una huella con la orientación de los ejes, diámetro, semiejes y sentido de la deformación.

La figura 7.3 muestra el resultado de la simulación, donde se puede observar la deformación sufrida por el material después del impacto. En la figura 7.4 se presenta una gráfica con los resultados de los desplazamientos perpendiculares a la superficie que han sufrido los nodos de la malla de la capa superficial para los modelos MJC y MCV.

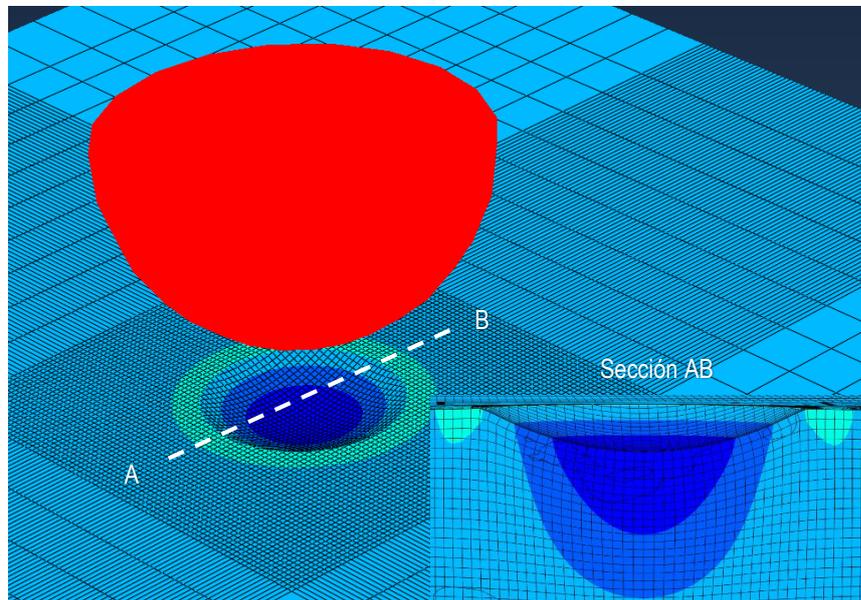


Figura 7.3.- Imagen del resultado de la simulación del modelo (MUB). Sección AB transversal sobre el plano YZ.

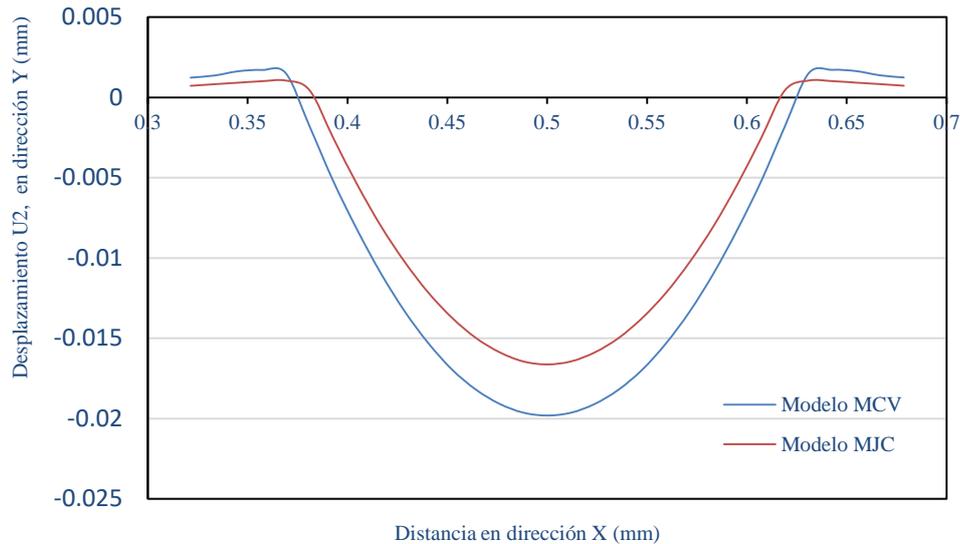


Figura 7.4.- Representación de las huellas para los modelos MJC y MCV. U2 es el desplazamiento de los nodos de la malla superficial en dirección 2 (esta dirección según la nomenclatura de Abaqus® corresponde con el eje Y).

Los valores del diámetro de la huella para ambos modelos, indicados en la figura 7.4, se han obtenido a partir de los puntos, a ambos lados de la curva, donde cambia el desplazamiento de signo. Este criterio se va a mantener para la determinación de los diámetros de todas las huellas.

Como se puede observar, el diámetro de la huella para ambos modelos es el mismo. Pero, la profundidad de la huella, aspecto muy importante para poder conocer el acabado superficial de la muestra después del proceso de SP, es diferente como se verá más adelante. La diferencia entre los desplazamientos verticales en el punto más bajo de cada huella es de 3 μm .

Dado que los cuerpos sometidos a un proceso de SP reciben múltiples impactos que hacen que el comportamiento del material, en su periodo plástico, sufra los dos tipos de endurecimiento. y viendo los resultados obtenidos para la huella con distintos modelos constitutivos, en este trabajo se opta por el modelo MCV.

7.2.- Huella con diferentes velocidades de impacto.

Se presentan a continuación la sección vertical de las huellas producidas, para los valores VRP, pero a diferentes velocidades de impacto: 20, 40, 60, 80, 100 m/s. Los resultados

gráficos se pueden observar en la [figura 7.5](#) y los valores numéricos de diámetro, desplazamiento máximo y superficie del círculo mayor de la huella en la tabla 7.1

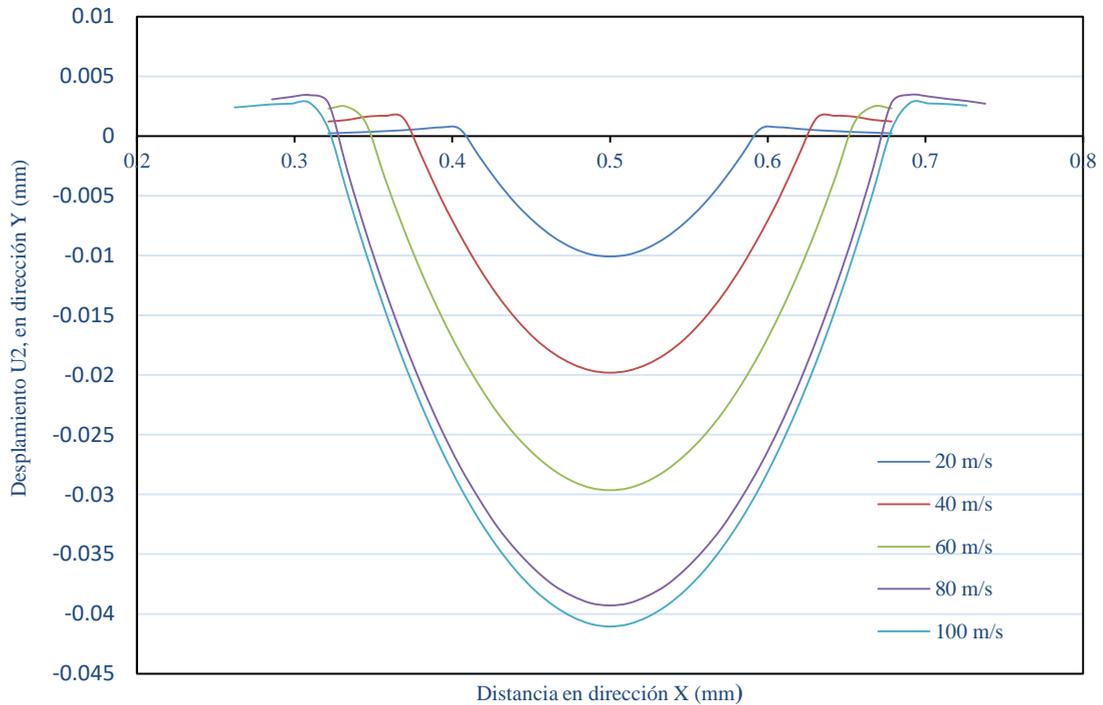


Figura 7.5.- Huella producida por una bola impactando sobre la muestra a distintas velocidades para los VRP.

Como se observa en la [figura 7.5](#), a medida que va aumentando la velocidad de la bola se incrementa el diámetro y la profundidad de la huella. El diámetro es el parámetro necesario para determinar el grado de cobertura de los impactos sobre la muestra, ya que nuestro criterio de cobertura es un criterio visual. Como se observa, a medida que aumenta la velocidad la huella es más profunda. Ésta empieza a ser menos pronunciada cuando se alcanza la velocidad de 80 m/s.

Tabla 7.1.- Valores de los parámetros obtenidos de las huellas generadas por la una bola impactando a distintas velocidades.

V (m/s)	ϕ (mm)	$\delta_{\text{máx.}}$ (mm)	Superficie (mm ²)
20	0.190	-0.010	0.028
40	0.261	-0.019	0.053
60	0.333	-0.029	0.087
80	0.357	-0.039	0.100
100	0.404	-0.048	0.128

7.3.- Huella con diferentes ángulos de impacto.

El siguiente estudio, relativo a los impactos con una sola bola, es conocer como cambia la huella en función del ángulo de impacto. Para ello se utilizó el mismo modelo MUB de simulación para los VRP. La dirección de impacto de la bola está contenida dentro del plano YZ. La velocidad de la bola se mantiene constante hasta su impacto sobre la muestra.

En la [figura 7.6](#) se puede ver el resultado de la simulación, en este caso, en planta no existe una simetría axial en la huella, y por tanto la superficie que se genera no tiene sección circular sino sección elíptica. Este hecho hace que sea necesario dos secciones verticales para caracterizar la huella. Estas secciones corresponden con los planos XY e YZ teniendo los ejes origen en el centro de la zona de impacto..

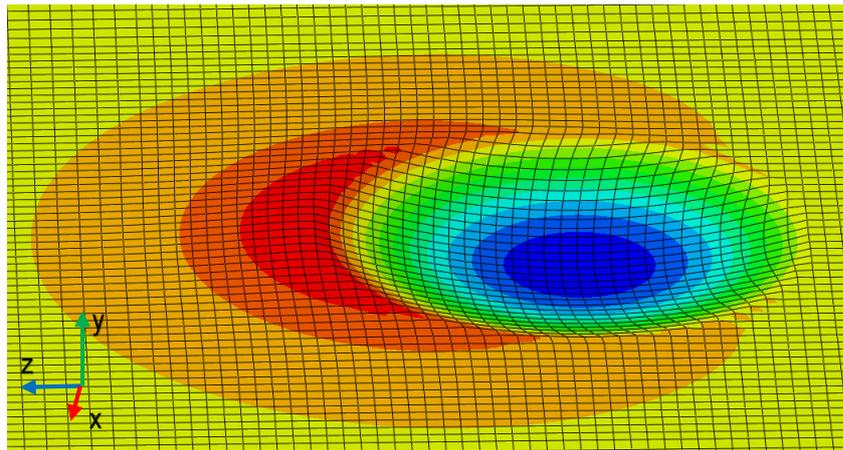


Figura 7.6.- Desplazamiento U2 – dirección Y. Simulación del modelo MUB para los VRP, con un ángulo de impacto de 60° respecto del eje Z.

Las gráficas que muestran los resultados obtenidos para cada ángulo de impacto pueden verse en la [figuras 7.7 a 7.11](#). La forma de la huella, correspondiente al plano más exterior de la misma, ya no es de sección circular sino elíptica. En las [figuras 7.7 a 7.11](#) se ha indicado las longitudes de los semiejes, e_x y e_z , de las mismas.

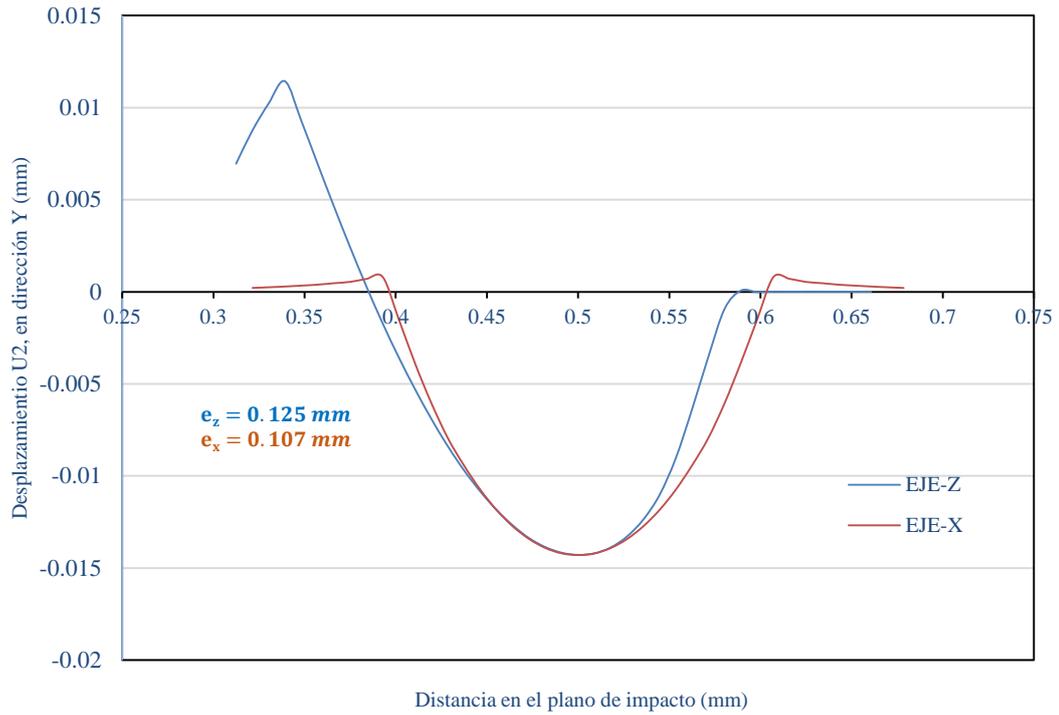


Figura 7.7.- Secciones XY e YZ de la huella provocada para los VRP con 40° de ángulo de impacto.

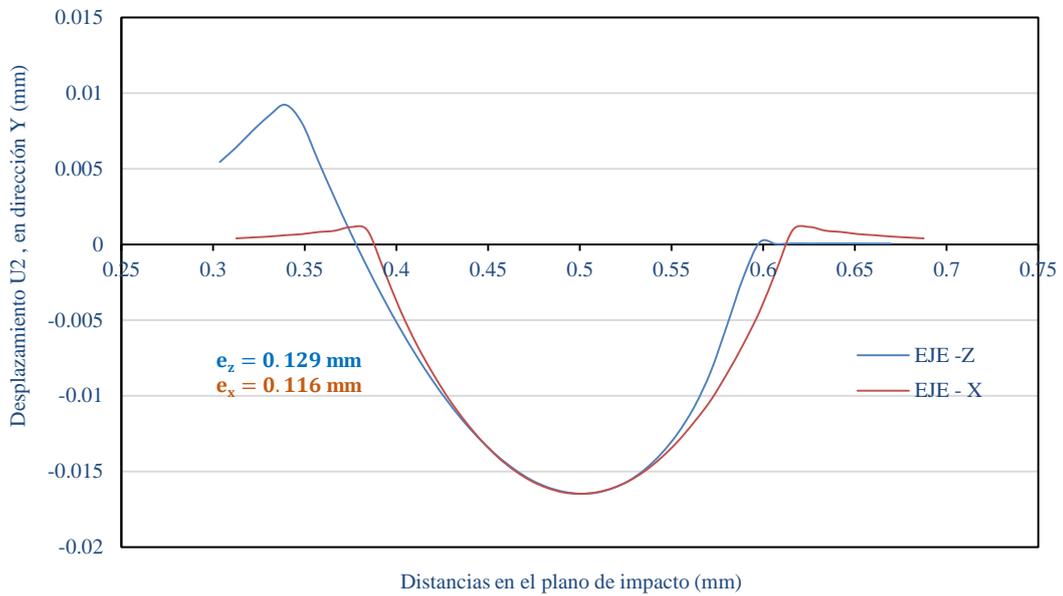


Figura 7.8.- Secciones XY e YZ de la huella provocada para los VRP con 50° de ángulo de impacto.

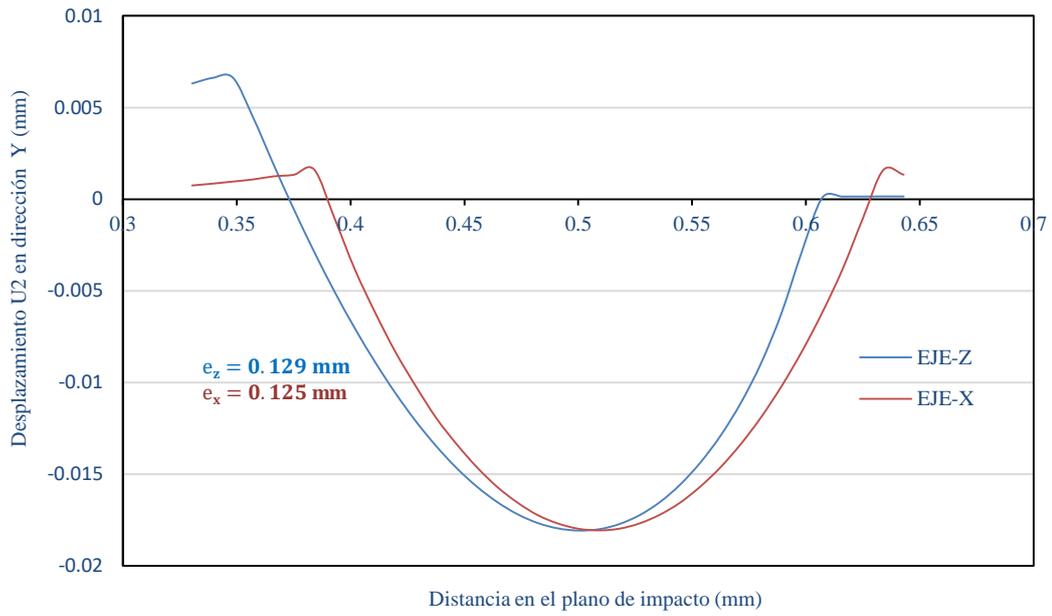


Figura 7.9.- Secciones XY e YZ de la huella provocada con los VRP con 60° de ángulo de impacto.

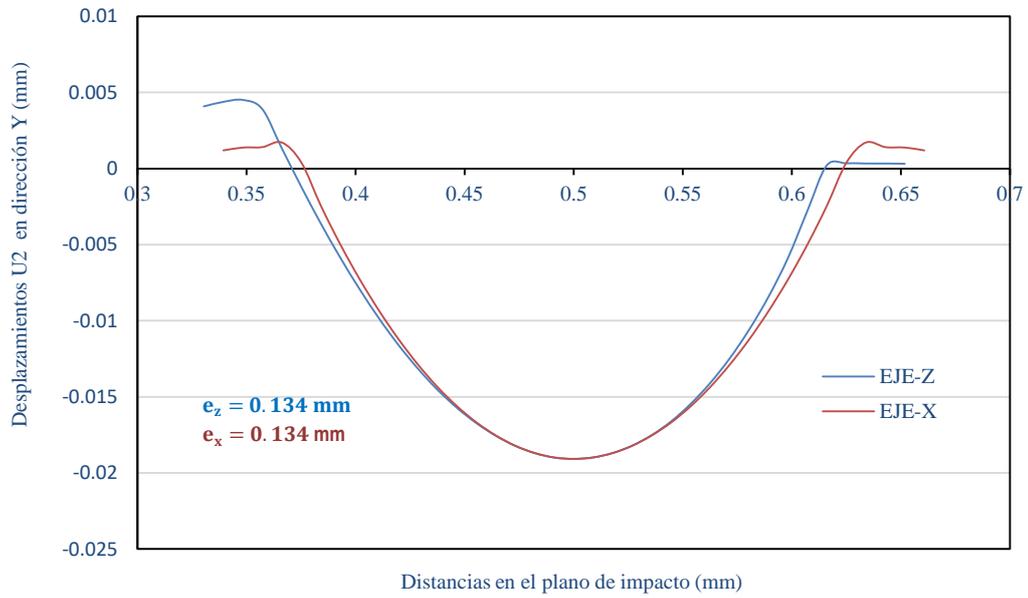


Figura 7.10.- Secciones XY e YZ de la huella provocada con los VRP con 70° de ángulo de impacto.

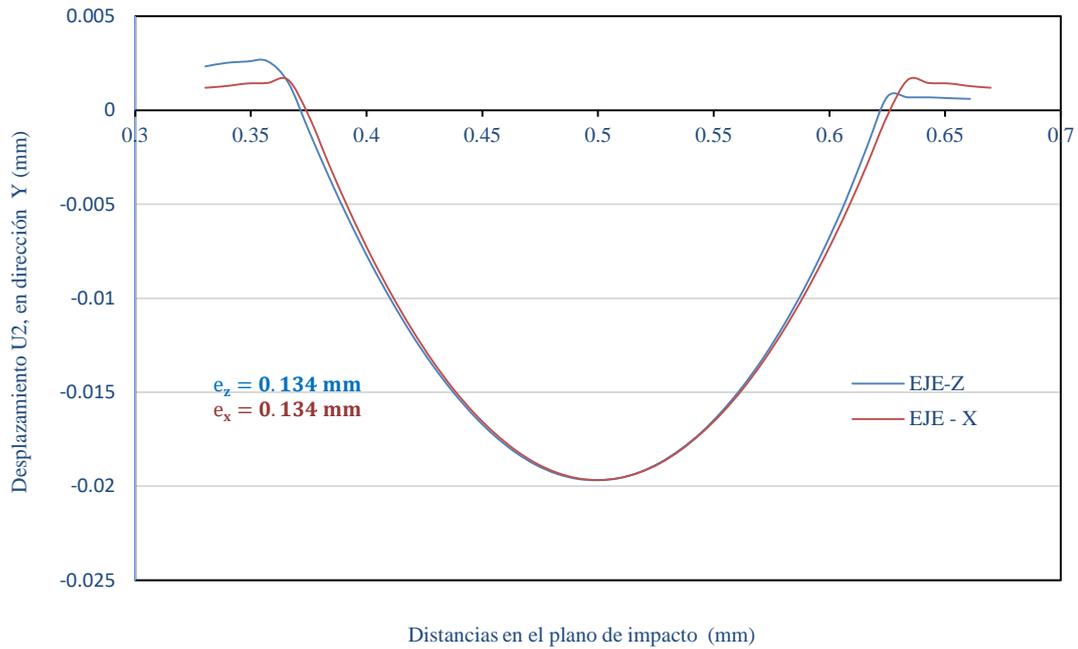


Figura 7.11.- Secciones XY e YZ de la huella provocada para los VRP con 80° de ángulo de impacto.

En la tabla 7.2 se han agrupado los resultados numéricos principales para los distintos ángulos de impacto

Tabla 7.2.- Semiejes (e_x y e_z de la elipse), profundidad de la huella y superficie de la elipse. Modelo MUB para los VRP.

Áng.de impacto (°)	e_z (mm)	e_x (mm)	δ (mm)	Superficie (mm ²)
40	0.125	0.107	-0.014	0.042
50	0.129	0.116	-0.016	0.047
60	0.129	0.125	-0.018	0.050
70	0.134	0.134	-0.019	0.056
80	0.134	0.134	-0.019	0.056
90	0.131	0.131	-0.019	0.053

Al analizar las dimensiones de los ejes de la elipse se nota que donde más diferencia existe entre ellos es en los valores para los ángulos de impacto más pequeños. A medida que va aumentando el ángulo de impacto hasta los 90° se observa que se van aproximando hasta llegar a ser iguales.

Como se puede observar en la tabla 7.2 los valores a partir de un ángulo de impacto de 70° son muy parecidos tanto en los semiejes como en la profundidad. Esto indica que las huellas son prácticamente las mismas.

7.4.- Huella con diferentes coeficientes de rozamiento.

Otro estudio ha sido comprobar si la huella cambia cuando se modifica el coeficiente de rozamiento en el contacto entre la bola y la muestra. Después de hacer el estudio para valores del coeficiente de rozamiento de Coulomb comprendidos entre 0.1 y 0.5, se ha concluido que la huella no cambia.

7.5.- Huella con diferentes tamaños de bola.

Se ha realizado un estudio de las huellas originadas por bolas de diámetros: 0.4 mm , 0.8 mm y 1.6 mm. Las secciones verticales de estas huellas se pueden ver en las figuras 7.12 y los valores numéricos más representativos en la tabla 7.3.

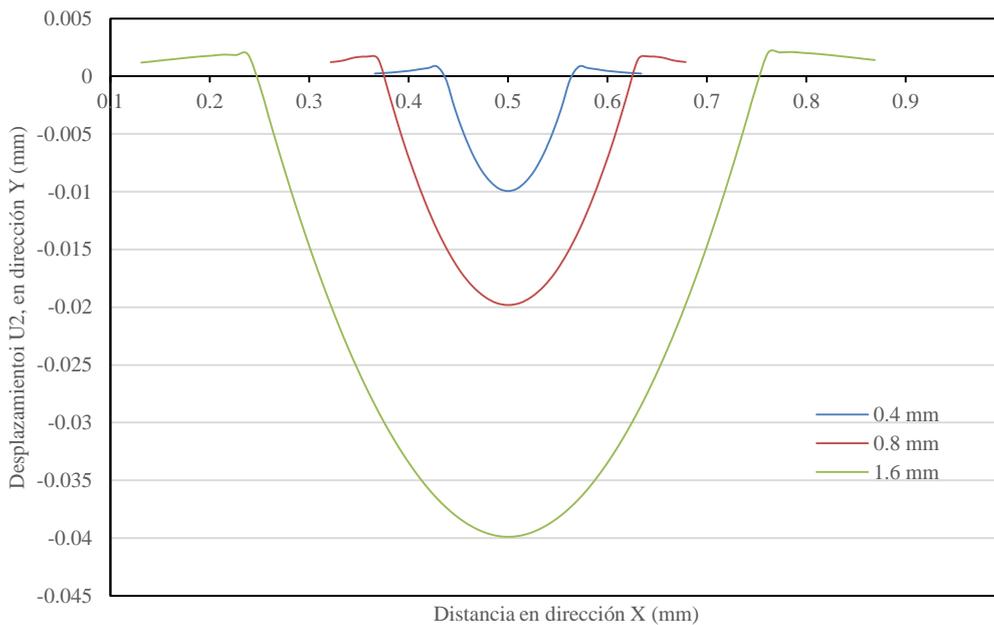


Figura 7.12.- Secciones YZ de la huella producida por una bola para los VRP, y con diámetros de 0.4 mm, 0.8 mm y 1 mm de diámetro.

Tabla 7.3.- Valores de los parámetros obtenidos de las huellas generadas por bolas de distintos diámetros.

\varnothing Bola (mm)	\varnothing Huella (mm)	$\delta_{\text{máx.}}$ (mm)	Superficie (mm ²)
0.4	0.143	-0.009	0.016
0.8	0.262	-0.019	0.054
1.6	0.524	-0.039	0.215

Se observa que entre 0.4 mm a 0.8 mm hay una diferencia de un 83,2% y entre 0.8 y 1.6 mm la diferencia es del 100% tanto en el diámetro como en la profundidad. Prácticamente los parámetros de la huella se doblan de un diámetro a otro.

Como se verá en el capítulo 8 y 9 el diámetro de la bola es el parámetro que más influye tanto en los perfiles de las tensiones residuales como en los parámetros de rugosidad.

En las figuras 7.13 a 7.15 se ha relacionado el diámetro de la huella con la velocidad y ángulo de impacto de la bola.

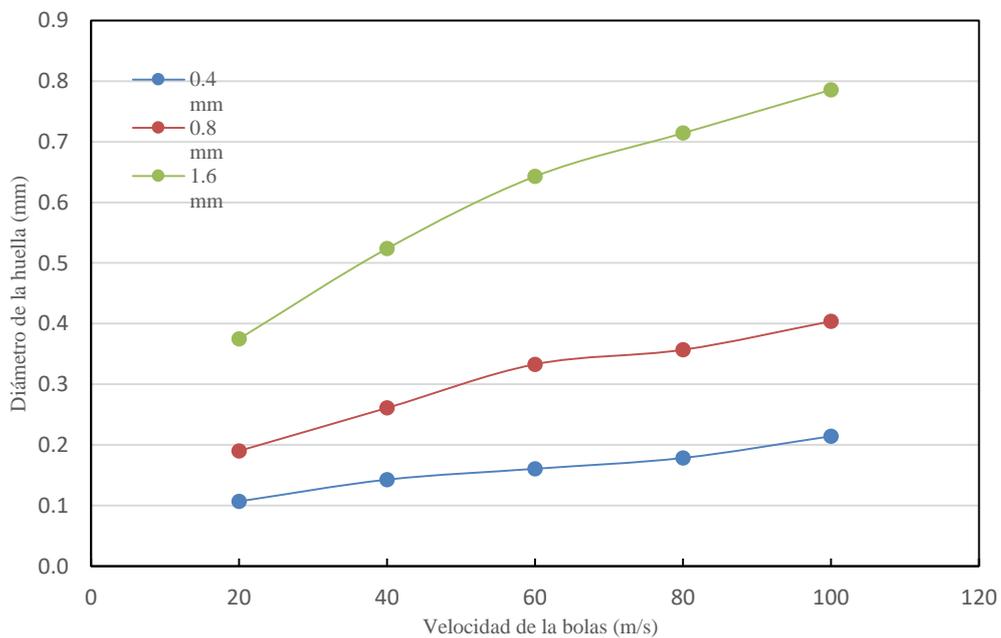


Figura 7.13.- Variación del diámetro de la huella generada por una bola en función de la velocidad para distintos diámetros de bola.

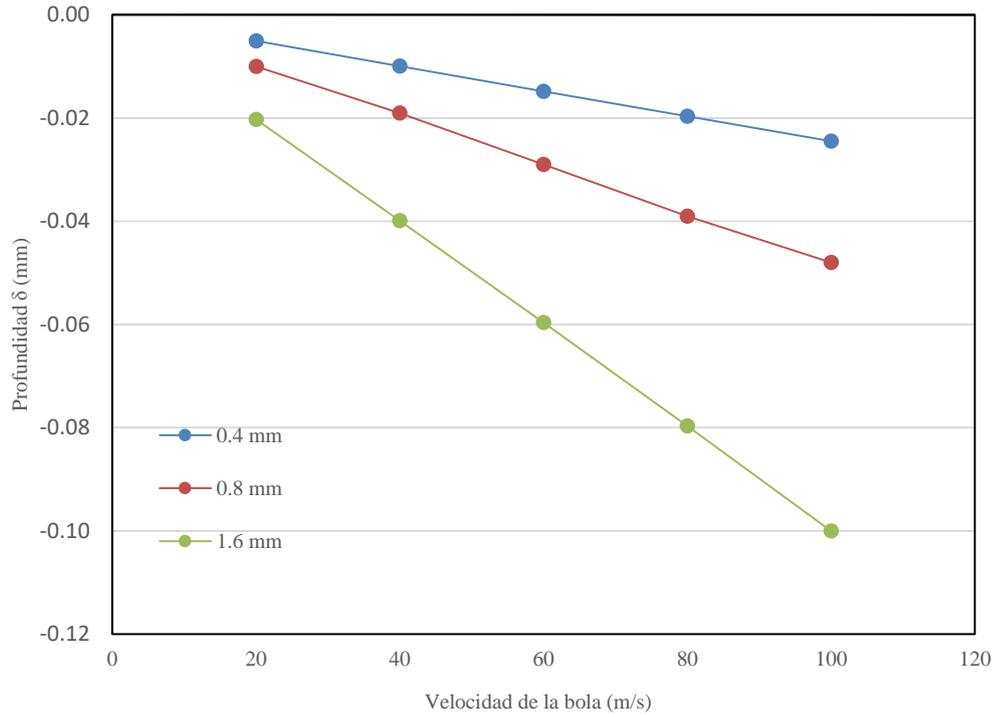


Figura 7.14.- Variación de la profundidad de la huella generada por una bola en función de la velocidad para distintos diámetros.

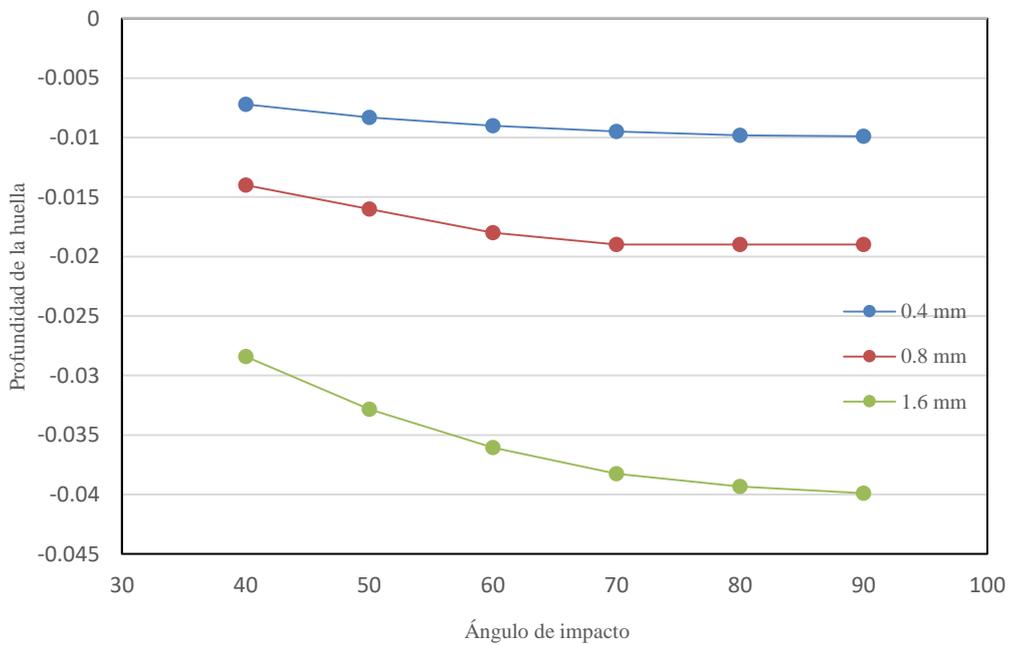


Figura 7.15.- Variación de la profundidad de la huella generada por una bola en función del ángulo de impacto para distintos diámetros.

Al observar las [figuras 7.13 a 7.15](#), podemos sacar las siguientes conclusiones:

- El diámetro de la huella generada por la bola al impactar aumenta al incrementarse la velocidad y el diámetro de la misma. La huella se hace más grande al aumentar al diámetro de la bola que al aumentar la velocidad. El factor que más influye en el tamaño de la huella es el diámetro de la bola. [Figura 7.13](#). SANJURJO ET AL., 2014 y PEÑUELAS ET AL. (2014) también realizaron un estudio de la variación de la huella producida por una bola en función de la velocidad para distintos diámetros (0.6 mm, 0.8 mm y 1 mm) con un modelo axil-simétrico, obteniendo resultados, cuya variación es análoga a la que nosotros hemos obtenido. Ambos grupos realizan el estudio para distintos modelos de comportamiento del material incluido el modelo combinado con la velocidad de la deformación.
- En cuanto a la profundidad de la huella, ésta aumenta a medida que aumenta la velocidad y el diámetro de la bola. Pero al igual que con el diámetro, el parámetro que más influye es el propio diámetro de la bola frente a la velocidad. [Figura 7.14](#). Para cada uno de los diámetros, los puntos muestran una tendencia casi lineal, que se puede aproximar bien por una curva de ajuste del tipo $y = a x + b$. En la tabla 7.4 se recopilan las ecuaciones de las rectas de ajuste, calculadas por mínimos cuadrados, que mejor aproximan la variación de los parámetros

Tabla 7.4.- Ecuaciones aproximadas para la determinación de la profundidad en función de la velocidad de la bola para distintos diámetros. (v en m/s y $\delta_{m\acute{a}x}$ en mm)

\emptyset (mm)	$\delta_{m\acute{a}x}$	R^2 (F. Correlación)
0.4	$\delta_{m\acute{a}x} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (v - 1)$	$R^2 = 1$
0.8	$\delta_{m\acute{a}x} = 10^{-4} \cdot (5 \cdot v - 2)$	$R^2 = 0.99$
1.6	$\delta_{m\acute{a}x} = 10^{-3} \cdot (v - 1)$	$R^2 = 0.99$

Estas expresiones permiten obtener valores muy aproximados de la profundidad para cualquier velocidad, dentro del intervalo comprendido entre 20 y 100 m/s. Por ejemplo, para una velocidad de 30 m/s y un diámetro de bola de 0.4 mm, el valor de la profundidad sería: 0.0058 mm

- También la profundidad aumenta a medida que aumentamos el ángulo de impacto. Pero, al igual que con el diámetro este incremento es mayor debido al diámetro de la bola. [Figura 7.15](#).

**CAPÍTULO 8.- ESTUDIO DE LAS TENSIONES
RESIDUALES.**

8.1.- Introducción.

En este capítulo se presenta un estudio de las tensiones residuales en función de las variables que afectan al proceso de SP, al material y al proyectil. Para ello se seguirá el orden

1.- Modelo constitutivo. Teniendo en cuenta el trabajo realizado por SANJURJO ET AL. (2014) se ha elegido como modelo constitutivo el modelo combinado que tiene en cuenta la velocidad de deformación, ya que según sus conclusiones es el modelo de comportamiento que mejor se ajusta a sus resultados experimentales.

2.- Estudio de la cobertura cuando impactan muchas bolas. En el capítulo 3 se han presentado planteamientos y modelos sobre la cobertura desarrollados por diferentes grupos. Uno de los aspectos menos claros se refiere a la influencia de la cobertura en el perfil de tensiones residuales. En este apartado se presentará un estudio de la evolución de las tensiones residuales para grados distintos de cobertura.

Una vez que las variables anteriores están definidas, podemos pasar a estudiar otras que influyen en el proceso de simulación.

3.- Se presentará, mediante simulación numérica, como varía el perfil de las tensiones residuales en función de:

- Velocidad de impacto, V
- Ángulo de impacto, α
- Coeficiente de rozamiento, μ

8.2.- Simulación del proceso de SP. Modelo de referencia.

Se utilizarán los mismos datos de entrada de SANJURJO ET AL. (2014) CON el objeto de comparar los resultados obtenidos.

- Tamaño de las bolas: $\varnothing = 0.8$ mm de diámetro.
- Velocidad de las bolas: $V = 40$ m/s.
- Contacto: Rozamiento de Coulomb, con un coeficiente de $\mu=0.4$
- Propiedades del material ACERO AISI 2205 – D2205C: Tablas: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6

- Resultados experimentales de las tensiones. Tabla 8.1.

Tabla 8 1.- Valores experimentales de las tensiones residuales (SANJURJO ET AL., 2014).

Profundidad (mm)	Tensiones residuales (MPa)
0	-521.4
3.80E-02	-647.1
0.08	-705.7
0.12	-721.8
0.16	-583.3
0.228	-522.2
0.288	-362.4
0.348	-161.9
0.4	-13.5

El modelo de referencia, ya ensamblado, lo podemos ver en la figura 8.1.

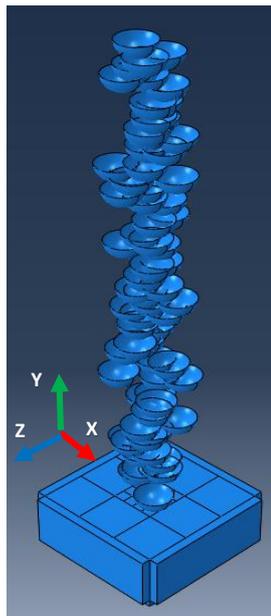


Figura 8 1.- Modelo de simulación multi-impacto

8.3.1.- Modelo de cobertura.

La cobertura, como ya se ha indicado, constituye uno de los aspectos más importantes en la simulación del proceso de SP. Después de analizar los distintos modelos de cobertura, se ha elegido un modelo basado en las siguientes premisas:

- Sistema aleatorio de cobertura, dado que en él se representa de manera más adecuada la pauta de impactos en un proceso real de SP.

- El número de impactos necesarios para una cobertura dada se ha determinado utilizando el modelo de BAGHERIFARD ET AL. (2010) fundamentalmente por dos motivos: es el modelo más sencillo de aplicar, y además da unos resultados muy similares a otros modelos que emplean un sistema aleatorio guiado, como ya se comentó en el capítulo anterior.

Una vez estudiada la huella que produce una sola bola en la muestra, se va a determinar, mediante las ecuaciones 5.1 y 5.2 (BAGHERIFARD ET AL., 2010) el número de bolas necesarias para un grado de cobertura concreto. Luego se generan los puntos de impacto de una forma aleatoria sobre una zona previamente definida de la muestra.

Este modelo ha sido utilizado por diferentes grupos en sus trabajos de simulación del proceso de SP (BAGHERIFARD ET AL., 2010 ; MIAO ET AL., 2009 ; MYLONAS Y LABEAS., 2011 ; SANJURJO ET AL., 2014). En algunos casos las coordenadas del punto de impacto se obtienen mediante un programa matemático (el más utilizado ha sido MatLab®). En otros se ha implementado el procedimiento en una subrutina de usuario en Python para incorporarla directamente al programa Abaqus® de elementos finitos.

En los procesos de SP reales se busca llegar a un grado de cobertura total de la zona. Algunos autores buscan definir un grado de cobertura visual del 98% (GAUGLIANO, 2001; MEGUID ET AL., 2002 ; MIAO ET AL., 2009 ; SANJURJO ET AL., 2014). Otros han definido un grado de cobertura en función de la plastificación de la zona (BAGHERIFARD ET AL., 2012 ;TARO ET AL., 2015). En este segundo procedimiento la medida se realiza experimentalmente sobre la muestra conforme se aplica sobre ella el proceso de SP.

Se supone que, mediante el sistema aleatorio de impacto, se van a producir solapamientos de las huellas en la zona de impacto. Según se señala en el trabajo presentado por BAGHERIFARD ET AL. (2010), un 80% de cobertura sería suficiente para cubrir la zona, reduciendo el número de solapamientos, pero obteniéndose un perfil de tensiones residuales idéntico al que obtendría con un 98% de cobertura. Para profundizar en este aspecto, se realizará un estudio con el objeto de determinar cómo varía la tensión residual en función de la cobertura. Con este fin se realizarán simulaciones con diferentes números de impactos hasta llegar a un valor de cobertura del 98%.

A continuación, se presenta en dos tablas el número de bolas necesarias para alcanzar el grado de cobertura en función del diámetro, del ángulo de impacto y de la velocidad de las mismas (tablas 8.2. y 8.3). El número de bolas se determina utilizando las ecuaciones 5.1 y 5.2 de la siguiente forma:

Tabla 8 2.- Número de bolas necesarias en función del grado de cobertura, del diámetro y de la velocidad.

$\varnothing = 0.4 \text{ mm} - \alpha = 90^\circ$			$\varnothing = 0.8 \text{ mm} - \alpha = 90^\circ$			$\varnothing = 1.6 \text{ mm} - \alpha = 90^\circ$		
Cobert. (%)	V (m/s).	Nº Bolas	Cobert. (%)	V (m/s)	Nº Bolas	Cobert. (%)	V (m/s)	Nº Bolas
98	20	434	98	20	137	98	20	35
	40	244		40	73		40	18
	60	193		60	45		60	12
	80	156		80	39		80	10
	100	108		100	30		100	8
80	20	179	80	20	56	80	20	15
	40	100		40	30		40	8
	60	79		60	18		60	5
	80	64		80	16		80	4
	100	45		100	13		100	3
70	20	134	70	20	42	70	20	11
	40	75		40	22		40	6
	60	59		60	14		60	4
	80	48		80	12		80	3
	100	33		100	9		100	2

Tabla 8 3.- Número de bolas necesarias en función del grado de cobertura, del diámetro y del ángulo de impacto.

$\varnothing = 0.4 \text{ mm} - V = 40 \text{ m/s}$			$\varnothing = 0.8 \text{ mm} - V = 40 \text{ m/s}$			$\varnothing = 1.6 \text{ mm} - V = 40 \text{ m/s}$		
Cobert. (%)	α (°).	Nº Bolas	Cobert. (%)	α (°).	Nº Bolas	Cobert. (%)	α (°).	NºBolas
98	40	372	98	40	93	98	40	26
	50	298		50	83		50	20
	60	298		60	76		60	19
	70	260		70	69		70	18
	80	260		80	69		80	18
80	40	153	80	40	38	80	40	11
	50	122		50	34		50	8
	60	122		60	32		60	8
	70	107		70	29		70	7
	80	107		80	29		80	7
70	40	114	70	40	29	70	40	8
	50	92		50	25		50	6
	60	92		60	24		60	6
	70	80		70	21		70	5
	80	80		80	21		80	5

De las tablas 8.2 y 8.3 se deduce que, para un grado de cobertura concreto, el número de impactos necesarios depende en primer lugar del diámetro de la bola. En segundo lugar, el factor que más influye es la velocidad de la misma y, en tercer lugar, el ángulo de impacto. Esto se puede ver ilustrado en la [figura 8.2](#) donde se representa para un determinado grado de cobertura.

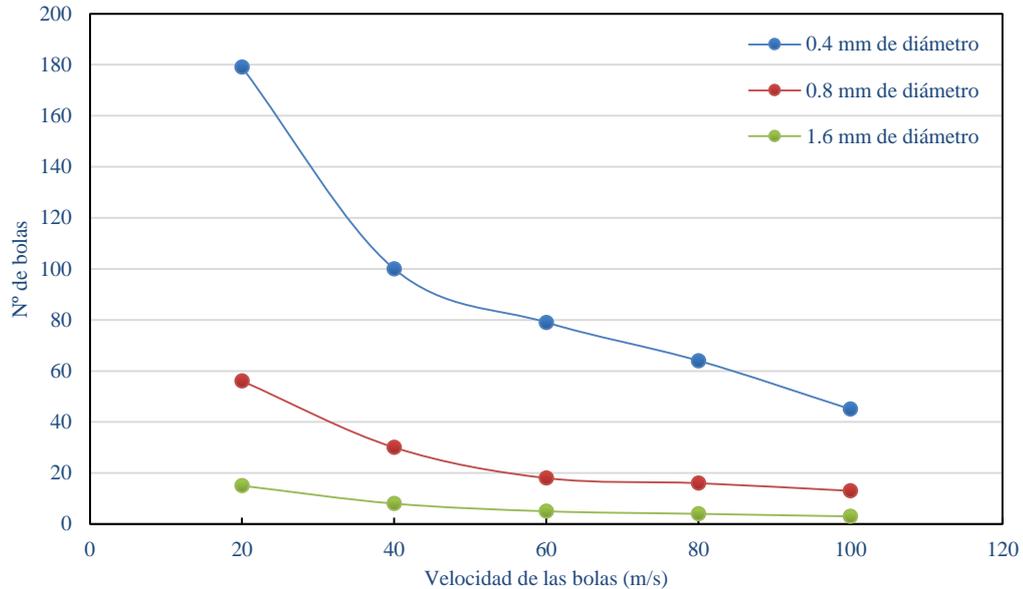


Figura 8 2.- Gráfica del número de bolas en función de la velocidad de impacto y del diámetro de la bola.

Como el tiempo de ejecución de la simulación es proporcional al número de bolas considerado, al incrementar el tamaño de la bola y/o su velocidad se consigue reducir el número de bolas y, por tanto, el tiempo computacional.

Efectivamente, este es uno de los aspectos a tener en cuenta, pero no podemos olvidar que el objetivo fundamental que se pretende conseguir con el SP es incrementar la vida a fatiga de un material. Para lo cual es necesario conocer cómo afectan el diámetro de la bola, la velocidad de misma y el ángulo de inclinación tanto a las tensiones residuales, en magnitud y en profundidad, como a la rugosidad superficial que se genera en las mismas.

8.4.- Tensiones residuales.

En primer lugar, y antes de estudiar la variación de las tensiones residuales en función de las variables anteriormente señaladas, se van a presentar los resultados obtenidos por

SANJURJO ET AL., 2014 de las tensiones residuales S11 para los modelos constitutivos definidos en el apartado 5.4 cotejados con sus propios resultados experimentales

Para obtener estos resultados ellos eligen, dentro de la zona de impacto, un paralelepípedo de dimensiones 0.5 x 0.5 x 0.6 mm (figura 6.3). Para determinar las tensiones residuales a distintas profundidades, dentro del volumen de 0.5 x 0.5 x 0.6 se han tomado, con la malla indicada en la figura 6.5, planos paralelos al plano XZ separados entre sí 0.05 mm. En cada plano se han obtenido los valores de las tensiones residuales en el punto centroidal de cada elemento finito (figura 8.3), es decir, un total de 1763 valores. La tensión residual a una determinada profundidad se determina como media de los 1763 valores obtenidos en cada capa.

Según los ejes utilizados (figura 8.2), los valores de las tensiones residuales corresponden a las tensiones σ_x y σ_z , que según la nomenclatura de Abaqus[®], se denominan S11 y S33

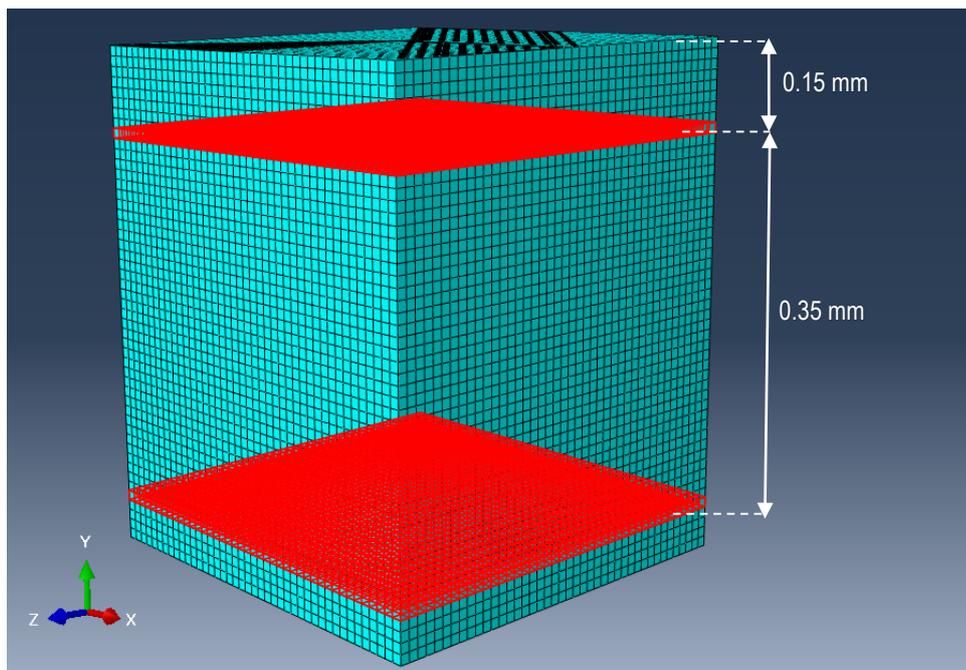


Figura 8 3.- Imagen de las capas de elementos finitos a 0.15 mm y 0.50 mm de profundidad en la zona de estudio del impacto.

En la figura 8.4. se representan las gráficas de los valores de las tensiones residuales obtenidas para los distintos modelos constitutivos utilizados y se comparan con los resultados experimentales (SANJURJO ET AL., 2014).

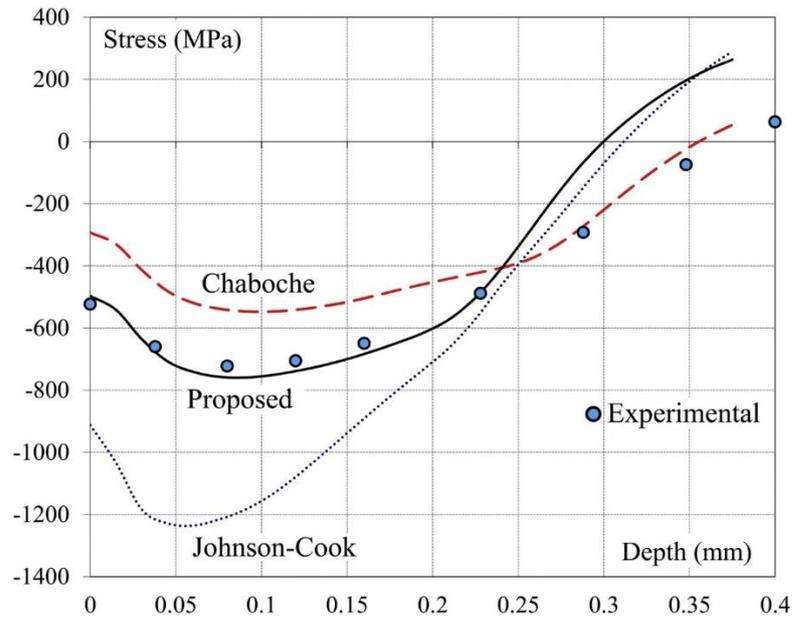


Figura 8.4.- Perfiles numéricos y experimentales de las tensiones residuales (SANJURJO ET AL., 2014)

Antes de presentar el estudio de las tensiones residuales en función de los parámetros del proceso, en la figura 8.5 se ha representado un esquema con la nomenclatura que se va a utilizar posteriormente en el análisis de las tensiones residuales.

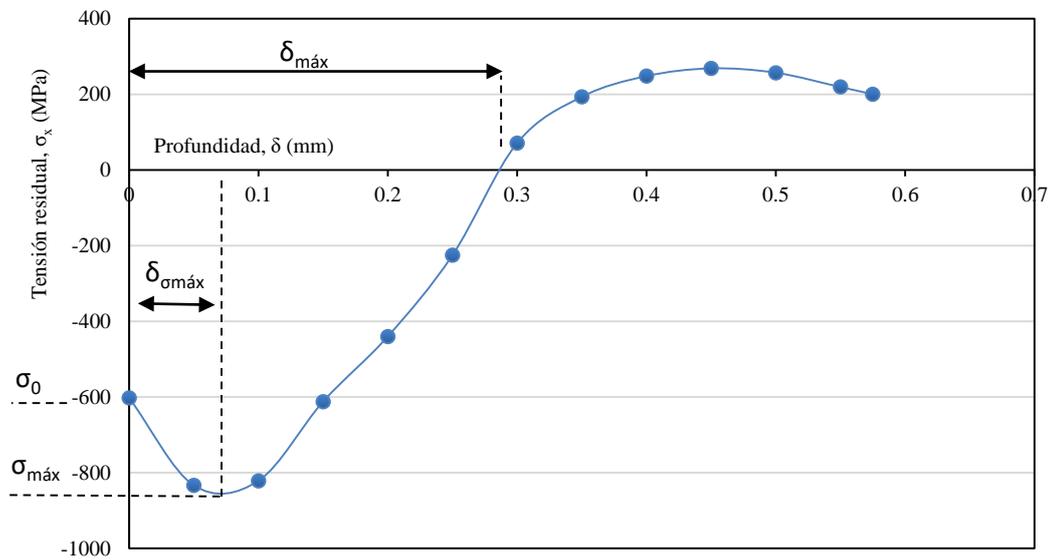


Figura 8.5.- Esquema con la nomenclatura de tensiones residuales y profundidad

En la figura 8.5, σ_x es la tensión tensión en dirección del eje X, de la profundidad (S11 nomenclatura de Abaqus®), σ_0 es la tensión residual en la superficie, $\sigma_{m\acute{a}x}$ es la máxima

tensión residual, $\delta_{m\acute{a}x}$ y $\delta_{\sigma m\acute{a}x}$ son la máxima profundidad y la profundidad a la que la tensión adquiere el valor máximo.

A continuación, se expone el estudio realizado de las tensiones residuales en función de los siguientes parámetros:

- Grado de cobertura.
- Velocidad de impacto.
- Ángulo de impacto.
- Diámetro de las bolas

8.4.1.- Grado de cobertura.

Antes de comenzar a analizar las tensiones residuales obtenidas para distintos grados de cobertura, es necesario indicar que las expresiones de BAGHERIFARD ET AL. (2010) son ecuaciones deterministas, y por tanto, con ellas se obtiene un determinado número de bolas para un único grado de cobertura, pero, el sistema utilizado, como sistema para incorporar las bolas sobre la muestra, es un sistema estocástico que tiene gran influencia para grados de cobertura bajos.

Las expresiones utilizadas de BAGHERIFARD ET AL. (2010) son ecuaciones deterministas, de modo que fijan un número de proyectiles para una cobertura dada. Sin embargo, el procedimiento utilizado en la simulación para generar los puntos de impacto de los proyectiles es totalmente aleatorio. Esto significa que, cuando es pequeño el número de proyectiles, la cobertura, variable, resultante de la simulación coincide con la que para, un mismo número de proyectiles, se obtiene de aplicar las fórmulas de BAGHERIFARD ET AL. (2010).

Esto hace que se obtengan diferentes resultados para el mismo grado de cobertura. Por tanto, para grados de cobertura bajos, se realizan cuatro cálculos aleatorios de los que se obtienen los valores promedio. En la [figura 8.6](#) se puede observar dos imágenes del resultado de dos simulaciones al 50% de cobertura. En la [figura 8.7](#) se puede ver distintos grados de cobertura de la zona de impacto. Como se puede observar en la [figura 8.7 a\)](#) y [b\)](#), el grado de cobertura es parcial y diferente aun cuando el número de proyectiles es el mismo. Mientras que en las imágenes [c\)](#) y [d\)](#) de la [figura 8.7](#), al ser cubierta prácticamente toda la zona, los resultados son prácticamente los mismos entre un cálculo aleatorio y otro.

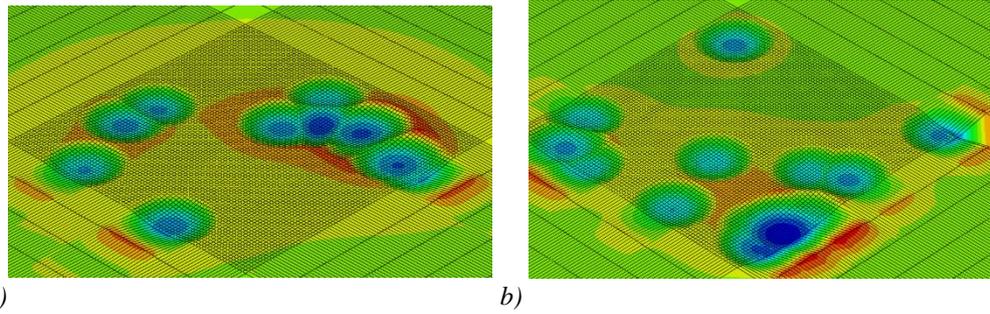


Figura 8 6.- Imágenes de dos simulaciones al 50% de cobertura. En ellas se aprecia el sistema estocástico.

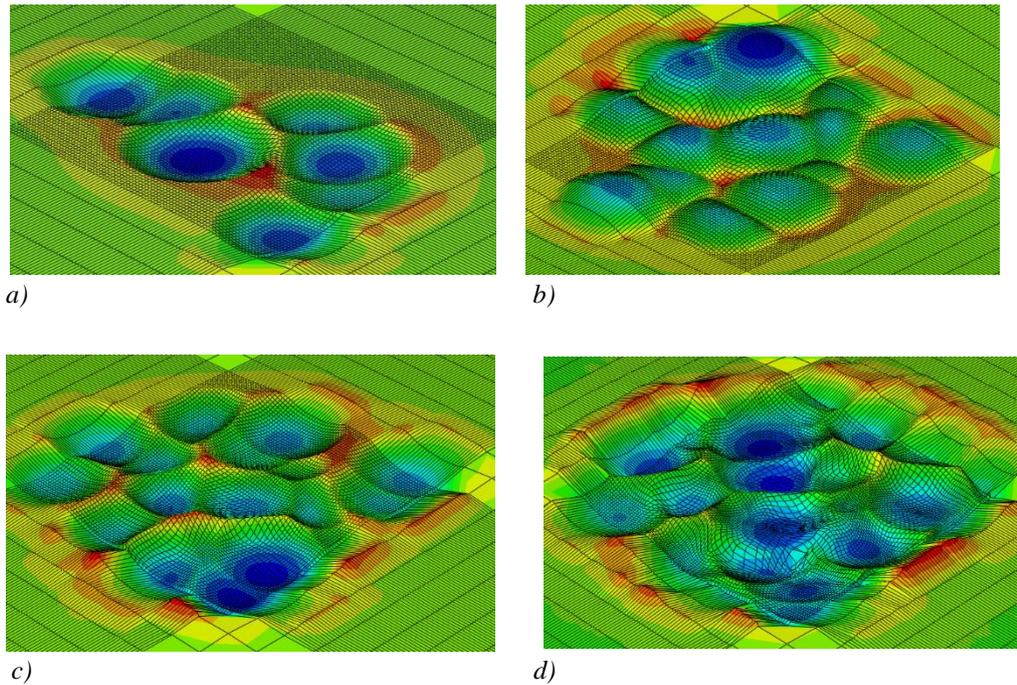


Figura 8 7. – Imagen de simulación de SP para diferentes grados de cobertura. a) 50%; b) 70%; c) 85%; d) 98%.

Según las ecuaciones 5.1 y 5.2, para conseguir una cobertura del 100% serían necesarios infinitos impactos, de modo que el 98% se considera como una cobertura completa. Desde el punto de vista práctico, a veces se habla de coberturas del 200%, 300%, 400%, etc, queriendo indicar que se ha multiplicado por 2, 3 y 4, etc., el número de bolas necesarias para una cobertura del 98%.

Utilizando el modelo numérico 3D con los VRP se ha realizado un estudio de las tensiones residuales que se obtienen para distintas coberturas: 50%, 98%, 200%, 400%. De acuerdo con las ecuaciones 5.1 y 5.2 (BAGHERIFARD ET AL., 2010), el número de bolas necesarias en cada caso ha sido de 13, 73, 146 y 292, respectivamente.

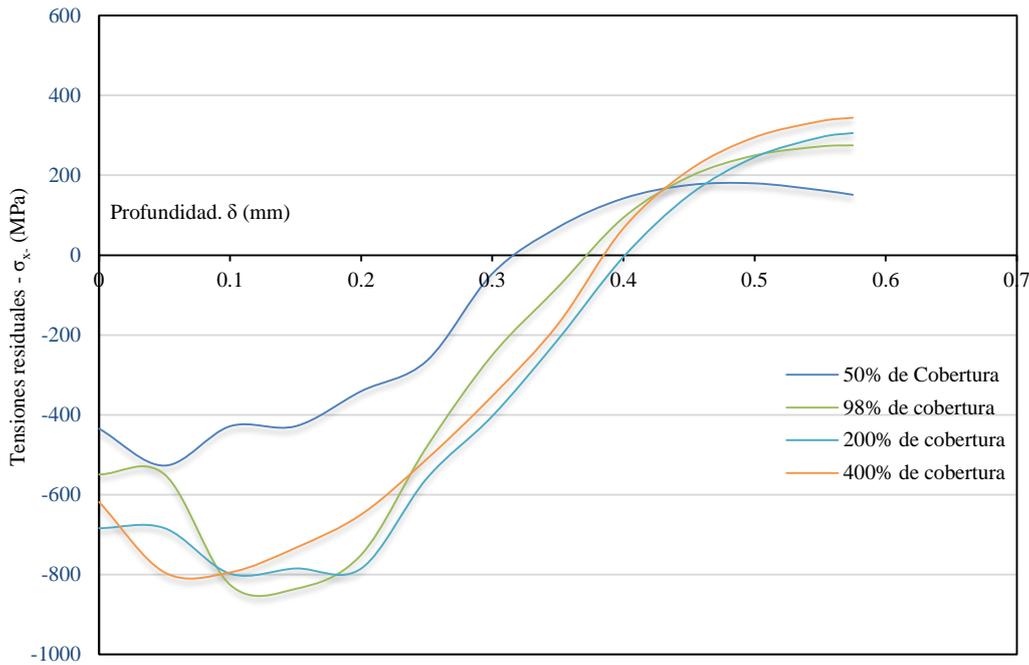


Figura 8 8.- Variación de las tensiones residuales en función del grado de cobertura.

Con un 50% de cobertura, el perfil de tensiones residuales muestra valores inferiores a los perfiles para los casos del 98, 200 y 400%. Estos últimos son muy similares, para todo el intervalo de profundidades considerado, es decir, se concluye que por encima del 98% de cobertura los perfiles de tensiones son casi idénticos, el sistema se satura y aunque se incremente el número de impactos sobre la muestra, no se consigue una mejora evidente en las tensiones residuales.

Además, un exceso de impactos hace que se incremente el número de solapamientos sobre cada punto de la muestra y se podría llegar a generar sobre la misma pequeñas fisuras (BAGHERIFARD ET AL., 2012- a).

8.4.2.- Velocidad de impacto

La velocidad de impacto, como ya se ha comentado, es el segundo parámetro que más influye sobre la huella que describen las bolas y, lógicamente, sobre la cobertura. Se analiza cómo cambia el perfil de las tensiones residuales en función de este parámetro, para el mismo modelo numérico 3D, con los VRP y distintas velocidades. Para diferentes velocidades de impacto: 20, 40, 60, 80 y 100 m/s, la [Figura 8.9](#) muestra gráficamente los resultados con una cobertura del 98% de acuerdo con las ecuaciones 5.1 y 5.2.

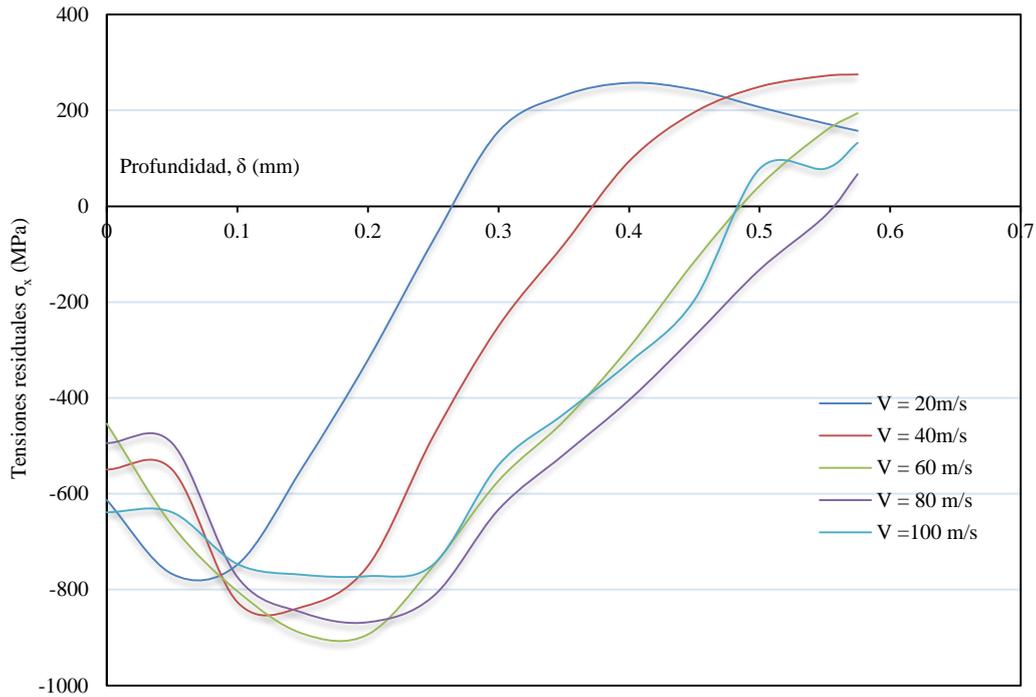


Figura 8 9.- Perfiles de las tensiones residuales para diferentes velocidades de impacto.

En los perfiles se observa que las tensiones $\sigma_{m\acute{a}x}$ de compresión no cambian sustancialmente de una velocidad a otra. Sin embargo, se produce un cambio importante en relación con el valor de δ en el que se alcanzan.

A medida que aumenta la velocidad de impacto de las bolas, la distribución de tensiones σ_x alcanza una profundidad mayor dada por $\delta_{m\acute{a}x}$, cuyo valor está indicado en la tercera fila de la tabla 8.3. El incremento de $\delta_{m\acute{a}x}$ es también un aspecto muy importante, ya que mejora la vida a fatiga de los materiales. La figura 8.10 se puede ver como cambia σ_x para velocidades de proyectil de 20 m/s y de 60 m/s .

Tabla 8 4.- Valores más relevantes de las tensiones residuales en función de la velocidad de las bolas.

	V =20 m/s	V = 40 m/s	V= 60 m/s	V =80 m/s	V =100 m/s
σ_0 (MPa)	-613.09	-549.28	-453.52	-494.16	-638.40
$\sigma_{m\acute{a}x}$. (MPa)	-747.96	-835.93	-893.16	-868.15	-771.82
$\delta_{m\acute{a}x}$. (mm)	0.26	0.38	0.49	0.55	0.49

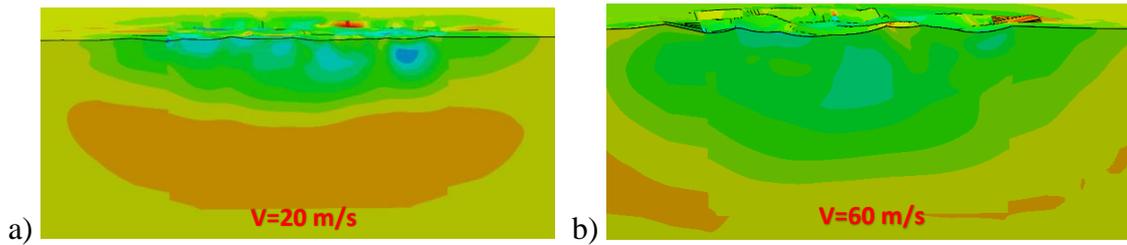


Figura 8 10.- Simulación de la tensión residual para diferentes velocidades. Sección sobre el plano central YZ. El resto de parámetros según los VRP

Los valores de $\sigma_{\text{máx}}$ se mantienen en el intervalo comprendido entre los -750 MPa y los 900 MPa (un 16% de diferencia máxima). Este resultado indica que la variación de las distribuciones de σ_x , no es muy grande. Pero lo que sí es significativo es que $\sigma_{\text{máx}}$ se alcanza, no a la máxima velocidad (100 m/s), sino a la velocidad de 60 m/s. A partir de esta velocidad, desciende ligeramente el valor de $\sigma_{\text{máx}}$ hasta llegar a -771.82 MPa a la velocidad de 100 m/s de las bolas.

El segundo cambio significativo ocurre en la profundidad δ de las tensiones residuales. Para poder conocer cómo cambia la σ_x con δ se ha determinado el área generada (en las curvas de la [figura 8.9](#)) por las tensiones residuales de compresión, desde la superficie, para cada velocidad. Estas áreas se determinan integrando la ecuación de la curva entre δ_0 y $\delta_{\text{máx}}$. De estas áreas se destaca:

- El área crece un 30% entre la velocidad de 20 y la de 40 m/s, y entre la de 40 y la de 60 m/s.
- Entre la velocidad de 60 y 80 m/s y entre 80 y 100 m/s sólo crece un 3% entre cada intervalo.

Otra conclusión que puede extraerse de las curvas representadas en la [figura 8.8](#) es que las curvas de 20, 40 y 60 m/s están muy separadas, mientras que las curvas de 60, 80 y 100 m/s están muy próximas. Lo que significa que a medida que aumenta la velocidad la variación de las tensiones es menor.

De todos los resultados obtenidos podemos concluir:

- En general, la velocidad de las bolas incrementa la profundidad $\delta_{\text{máx}}$ de las tensiones residuales de compresión principalmente.
- $\sigma_{\text{máx}}$ no cambia sustancialmente con la velocidad.

- A partir de una velocidad de 60 m/s, el cambio en los perfiles de las tensiones residuales de compresión, tanto en magnitud como en profundidad, es relativamente pequeño, tendiendo a estabilizarse.

A estas mismas conclusiones llegaron MEGUID ET AL. (2002) y HONG ET AL. (2008), con otros materiales y con modelos numéricos diferentes.

8.4.3.- Ángulo de impacto.

El ángulo de impacto es otra de las variables a tener en cuenta a la hora de intentar estandarizar un proceso de SP. Como se ha expuesto anteriormente, en el estudio de la variación de la huella, con el modelo numérico MUB la huella ya no es circular. Partiendo del modelo de simulación 3D, para los VRP, en la [figura 8.10](#) se muestran las gráficas con los resultados obtenidos de σ_x para diferentes ángulos de impacto.

Como se puede observar en la [figura 8.10](#), los perfiles de las tensiones σ_x para ángulos de impacto de 70°, 80° y 90° son muy parecidos. El único cambio está en la tensión σ_0 , se pasa de -686.05 MPa a 70° a -545.28 MPa a 90° de ángulo de impacto.

A 60° de ángulo de impacto, $\sigma_{\text{máx}}$ es de -743.09 MPa, mientras que para 90° es de -837.75 MPa.

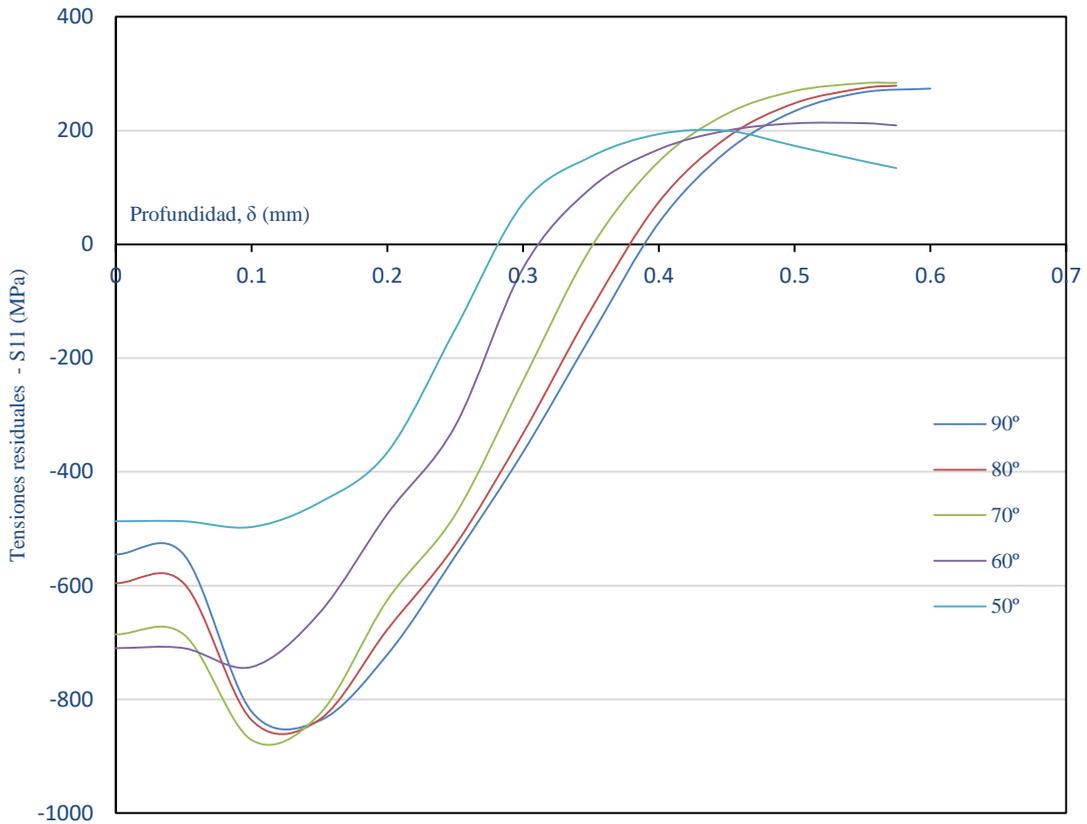


Figura 8 .11.- Tensiones residuales para los VRP, para diferentes ángulos de impacto.

Como se expuso en el apartado 8.4.2, una manera de analizar de forma conjunta la tensión y la profundidad, consiste en determinar el área generado por las tensiones de compresión para cada uno de los perfiles (tabla 8.6)

Tabla 8 5.- Áreas generadas por los perfiles de compresión para cada ángulo de impacto Variación entre un ángulo de impacto y otro.

Ángulo de impacto (º)	Magnitud de la superficie (Mpa.mm)	% de Variación.
90	250.85	
60	193.60	+ 22.82%
50	124.87	+35.50%.

Según el estudio realizado hay una diferencia de un 22.82% del área entre un ángulo de impacto de 90º y uno de 60º, y de un 50.22 % entre la de 90º y la de 50º. Entre 60º y 50º hay una diferencia de un 35.5%.

Por tanto, los casos en que puede mejorarse de forma más notable la resistencia a fatiga de un material, es decir, mayores valores de la tensión máxima y capas más profundas de

tensiones residuales, se consiguen para ángulos de impacto superiores a 70° . En la realidad, en un proceso de SP, aunque el dispositivo que lanza las bolas se disponga en dirección perpendicular a la superficie de la muestra, las bolas al salir por la boquilla se dispersan un poco encontrándose sus trayectorias dentro de cono de base circular sobre la superficie de la muestra en la zona de impacto. Este hecho hace pensar que un grupo de bolas van a incidir sobre el cuerpo con un cierto ángulo de impacto. No obstante, los ángulos de impacto de las distintas bolas no difieren mucho de 90° y, por tanto, no van a dar lugar a grandes variaciones en el perfil de la tensión residual de compresión.

8.4.4.- Tamaño de los proyectiles

El tamaño de las bolas es un parámetro que influye en el perfil de las tensiones residuales. En el estudio de las huellas desarrolladas en el capítulo anterior, se mostró que el factor que más influye en el tamaño y profundidad de la huella es el diámetro de la bola. Por esta razón, se ha realizado también un estudio de la variación de las tensiones residuales con el diámetro de la bola. Se han empleado diámetros de 0.6, 0.8, y 1 mm, los demás parámetros según los VRP. En la [figura 8.12](#) se muestran los resultados

Lo primero que se observa es que $\sigma_{\text{máx}}$ prácticamente no cambia de un diámetro a otro. Ahora bien, igual que con la velocidad de impacto, se observa en la [figura 8.11](#) que la profundidad de la zona con la tensión residual de compresión crece.

Para poder valorar conjuntamente σ_x y su profundidad δ se ha determinado el área generada, integrando cada curva entre la cota superficial y $\delta_{\text{máx}}$. En la [tabla 8.7](#) se muestran estos valores.

De este modo se observa que entre el diámetro de 0.6 mm y el de 0.8 mm hay una diferencia de un 35.66% mientras que de 0.8 a 1mm hay una diferencia de un 10.2%.

Los valores de $\sigma_{\text{máx}}$ son muy parecidos, como se muestra en la [tabla 8.8](#).

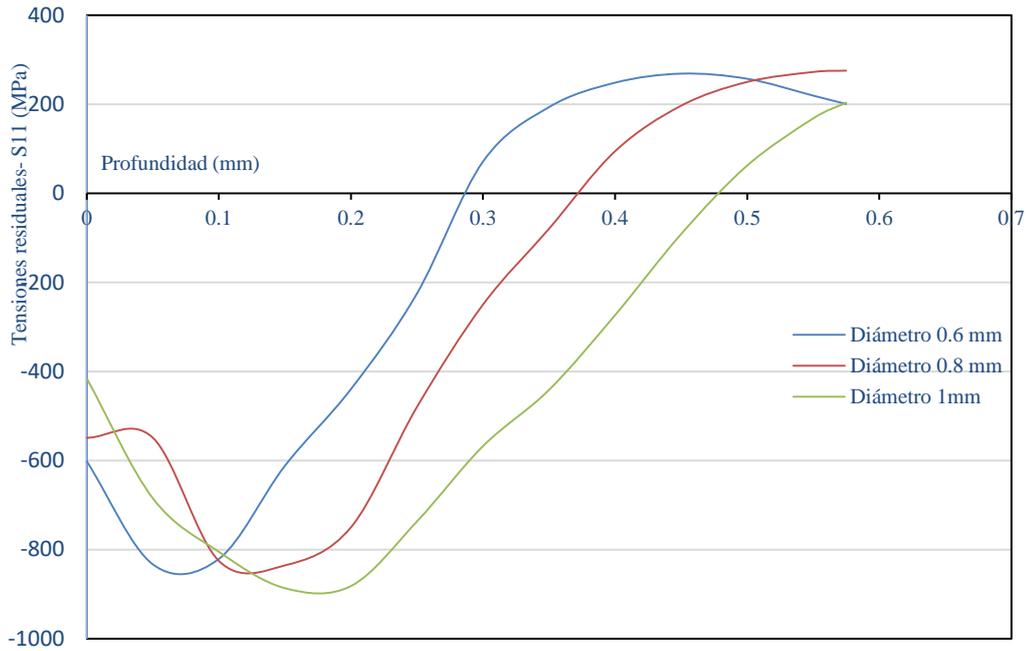


Figura 8.12.- Perfil de las tensiones residuales para diámetros de 0.6, 0.8 y 1 mm, con un 98% de cobertura, una velocidad de 40 m/s, y con 90° de ángulo de impacto.

Tabla 8 6.- Áreas generadas por los perfiles de compresión para cada diámetro de bola. Variación entre un diámetro y otro.

\varnothing (mm)	Magnitud de la superficie (MPa.mm)	% de variación.
0.6	161.39	
0.8	250.85	+ 35.66%
1	279.36	+10.2%.

Tabla 8 7.- Valores de las tensiones residuales de compresión máximas y profundidad a la que tienen lugar. % de variación de unos perfiles a otros.

\varnothing (mm)	$\delta_{\sigma_{\text{máx}}}$ (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	% de Variación
0.6	0.05	-833.56	
0.8	0.15	-835.93	0.28
1	0.15	-886.83	5.74

Estos resultados indican que existe un incremento de las tensiones residuales a medida que aumenta el diámetro de las bolas. SANJURJO (2012) estudió la morfología de las bolas experimentalmente. Observó un grupo de muestra de bolas de 0.6 mm de diámetro de forma esférica, y comprobó que existía una cierta dispersión tanto en forma (no se

mantenía la esfericidad) como en el diámetro. Llegaron a la conclusión de que era mejor para las simulaciones utilizar bolas de 0.8 mm de diámetro.

En las simulaciones realizadas para conocer la influencia del diámetro sobre el perfil de las tensiones residuales, no se ha probado con diámetros mayores ya que la zona de impacto es de 1 mm² y, por tanto, se alcanzarían coberturas al 98% con pocos proyectiles, por lo que habría que aumentar el área de la superficie de impacto, lo que llevaría a resultados con pequeñas variaciones de unas simulaciones a otras.

**CAPÍTULO 9.- ESTUDIO DEL ACABADO
SUPERFICIAL.**

9.1.- Introducción

Al analizar los resultados obtenidos del proceso de SP, es necesario tener en cuenta, no sólo las tensiones residuales, sino también el acabado superficial. Existen diferentes parámetros para caracterizar la rugosidad, algunos de los cuales están recogidos por las normas europeas. Los más utilizados son:

- R_a ... Altura media aritmética.
- R_q ... Rugosidad media cuadrática.
- R_z ... Altura de diez puntos.
- R_{ku} ... Parámetro de asimetría (*skewness*)
- R_{sk} ... Coeficiente de Kurtosis

Aunque anteriormente varios grupos ya habían medido experimentalmente la rugosidad de la superficie resultante de un proceso de SP (BRODAMANN ET AL., 1986 ; YIM ET AL., 1990 ; WAGNER, 1999 ; SOADY ET AL., 2013) los primeros en estudiarla mediante una simulación numérica por elementos finitos del proceso de SP fueron DAI ET AL. (2004), obteniendo una gran coincidencia entre sus resultados numéricos y los experimentales. Otros grupos estudiaron, también mediante simulación numérica, la variación de la rugosidad en función del tamaño de las bolas y la velocidad de impacto. Dedujeron que los parámetros de rugosidad aumentan al incrementarse la velocidad y el tamaño de la bola, hasta un punto en el que se estabilizan (MYLONAS Y LABEAS., 2011 ; BAGHERIFARD ET AL., 2012-b). Más concretamente, su evolución con la velocidad y tamaño de la bola se divide en tres fases o etapas: una primera etapa en la que se produce un aumento de los valores de los parámetros de rugosidad con el incremento de la velocidad o tamaño de bola, una segunda fase en la que siguen creciendo, pero se van formando picos más elevados que en la primera fase, y una tercera fase en la que se estabilizan los valores de los parámetros, ya que no se observan incrementos sustanciales (MIAO ET AL. 2009).

En general, los autores coinciden en que la rugosidad aumenta con la velocidad del proyectil, para valores de ésta comprendidos entre 20 y 80 m/s. A partir de dicha velocidad, los valores se estabilizan. También es cierto que no todos los estudios suelen realizarse para velocidades superiores a 120 m/s.

En el presente capítulo se expone el estudio realizado, con el modelo de elementos finitos, con el objeto de analizar la influencia sobre la rugosidad de la superficie resultante de un proceso de SP, no sólo en función del tamaño y velocidad de las bolas, sino también del

ángulo de impacto y del grado de cobertura. Previamente, en los dos siguientes apartados, se definen de forma precisa los parámetros de rugosidad enumerados más arriba, y se describe el proceso seguido para obtener dichos parámetros a partir de los resultados del modelo de elementos finitos.

En los anteriores análisis numéricos se parte de una superficie inicialmente lisa. Sin embargo, con el objetivo de ampliar el estudio, buscando una mayor aproximación al proceso real, se planteó la cuestión de cómo influiría en los resultados finales (tensiones residuales y rugosidad) el hecho de que la superficie inicial tuviera una rugosidad previa. En el último apartado de este capítulo se expone el estudio llevado a cabo en relación a esta cuestión. Es necesario indicar que en la revisión bibliográfica realizada sólo se ha encontrado un estudio de los parámetros de rugosidad partiendo de superficies rugosas iniciales obtenidas por funciones bi-sinusoidales (YANG ET AL., 2015).

9.2.- Parámetros de rugosidad

Diferentes procesos de fabricación producen superficies con distinta rugosidad. Por otra parte, diferentes aplicaciones requieren diferentes propiedades superficiales. Para describir las características de las superficies se utilizan diversos parámetros, refiriéndose cada uno a una propiedad particular de la superficie, que puede ser la más relevante para cada aplicación particular.

La rugosidad se puede estudiar en perfiles superficiales, obtenidos numérica o experimentalmente, en dos dimensiones (distribución de alturas de los puntos de un segmento dentro de la superficie) o en tres dimensiones (distribución de alturas de los puntos en un área de la superficie). La mayor parte de los resultados suelen presentarse a partir de los perfiles determinados en dos dimensiones.

Experimentalmente, se emplean programas de imagen que ayudan a definir la rugosidad con ayuda de un microscopio, analizando perfiles sucesivos a lo largo de toda la superficie. Finalmente, se determinan los valores que caracterizan la rugosidad de todos los perfiles así obtenidos.

A continuación, se exponen los parámetros más utilizados para caracterizar la rugosidad, que se encuentran recogidos en normas relativas a los acabados superficiales en procesos de tecnología mecánica. Estos se dividen en parámetros verticales, parámetros horizontales y parámetros híbridos.

9.2.1.- Parámetros verticales.

9.2.1.1.- Altura media aritmética (R_a)

Este es el parámetro de rugosidad más utilizado para caracterizar la calidad del acabado superficial en los procesos de fabricación. Se define como la desviación absoluta media de las irregularidades respecto de la línea media sobre una longitud de muestreo l (figura 9.1):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (9.1)$$

o bien, en función de las desviaciones y_i ($i=1, \dots, n$) respecto de la media en n puntos:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (9.2)$$

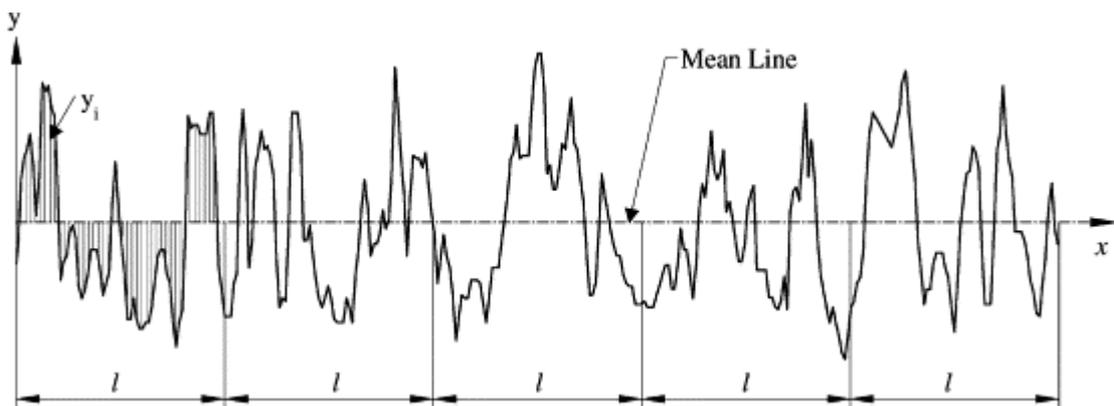


Figura 9 1.- Esquema para obtener el parámetro de rugosidad R_a . (GADELMAWLA ET AL. 2002).

Aunque es el parámetro que mejor define la variación vertical del acabado de una superficie, resulta poco sensible cuando la superficie tiene un acabado muy suave. Es un parámetro de primer orden.

9.2.1.2.- Rugosidad media cuadrática (R_q).

Este parámetro se corresponde con el promedio cuadrático de las irregularidades respecto de la línea media, también conocido como RMS:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l (y(x))^2 dx} \quad (9.3)$$

o bien, en función de n valores discretos y_i ($i=1, \dots, n$):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2} \quad (9.4)$$

Tiene un mayor grado de sensibilidad que la media aritmética definida anteriormente. Es un parámetro de primer orden.

9.2.1.3.- Altura de diez puntos (R_z)

Para disponer de un parámetro más sensible a la influencia de picos altos o valles profundos que R_a o R_q , se utiliza la altura de diez puntos (R_z), que tiene dos definiciones según se considere la normativa ISO o DIN. De acuerdo con ISO, se define como la diferencia de altura entre el promedio de los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos (v_1, \dots, v_5) a lo largo de una cierta longitud de evaluación (UNE-ISO-EN-130:2002) (figura 9.2):

$$R_{Z(ISO)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (9.5)$$

Según DIN, se define como el promedio de la suma de los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos a lo largo de la longitud de evaluación (DIN 4769-1, 1975):

$$R_{Z(DIN)} = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (9.6)$$

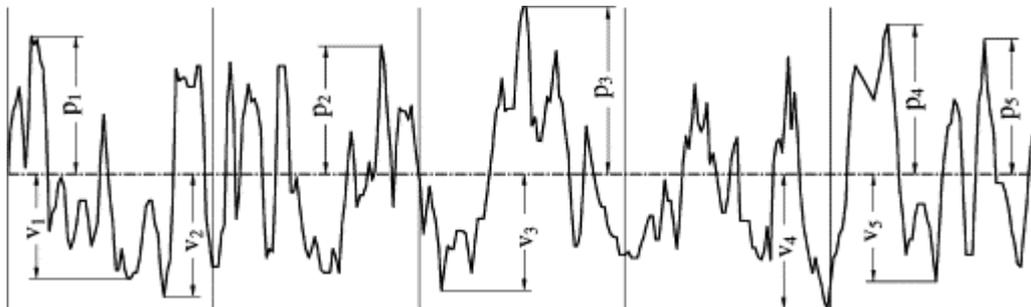


Figura 9 2.- Esquema para obtener el parámetro de rugosidad R_z (GADELMAWLA ET AL. 2002).

9.2.1.4.- Parámetro de asimetría R_{sk} (*Skewness*).

La falta de simetría de un perfil viene descrita por el tercer momento central de la función de densidad de probabilidad de amplitud del perfil $p(y)$, medida a lo largo de una cierta longitud de evaluación (Gadelmawla et al. 2002):

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} y^3 p(y) dy \quad (9.7)$$

o bien, en función n valores discretos y_i ($i=1, \dots, n$):

$$R_{sk} = \frac{1}{nR_q^3} \left(\sum_{i=1}^n y_i^3 \right) \quad (9.8)$$

Se utiliza para medir la simetría del perfil respecto la línea media. Este parámetro es sensible a la existencia de valles profundos o altos picos en el siguiente sentido: si existe simetría de picos y valles, el parámetro se hace cero; si el perfil tiene pocos picos o picos suaves y con valles profundos, la asimetría es negativa; por el contrario, si tenemos picos altos con valles suaves la asimetría es positiva (figura. 9.3). El parámetro de asimetría puede usarse para distinguir entre dos perfiles que tienen los mismos valores R_a o R_q pero con formas diferentes. Es un parámetro de segundo orden.

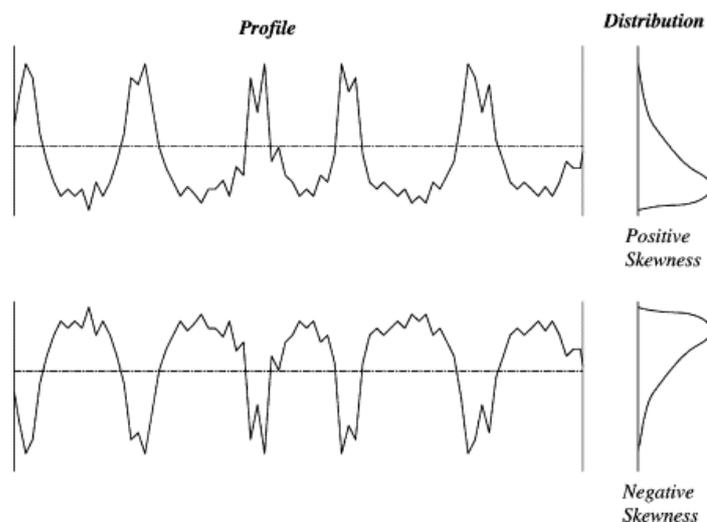


Figura 9.3.-Representación del parámetro de rugosidad R_{sk} para dos superficies distintas, pero con el mismo R_a (GADELMAWLA ET AL. 2002).

9.2.1.5.- Coeficiente de Kurtosis (R_{ku})

El coeficiente de Kurtosis es el cuarto momento central de la función de densidad de probabilidad de amplitud de perfil $p(y)$, medida a lo largo de una cierta longitud de evaluación (GADELMAWLA ET AL. 2002):

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} y^4 p(y) dy \quad (9.9)$$

o bien, en función n valores discretos y_i ($i=1, \dots, n$).

$$R_{ku} = \frac{1}{nR_q^4} \left(\sum_{i=1}^n y_i^4 \right) \quad (9.10)$$

Describe la nitidez de la densidad de probabilidad del perfil. Si $R_{ku} < 3$, la curva de distribución se dice que es plana-kurtótica y tiene relativamente pocos picos altos y valles bajos. Si $R_{ku} > 3$, la curva de distribución se dice que es leptokurtótica y tiene relativamente muchos picos altos y valles bajos. La [figura. 9.4](#) muestra estos dos tipos de Kurtosis. Es un parámetro de segundo orden.

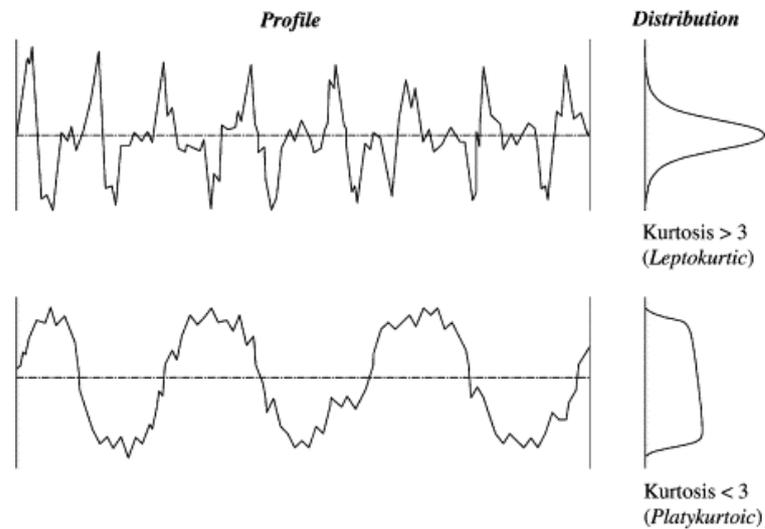


Figura 9 4.-Representación del parámetro de rugosidad R_{ku} (kurtosis) para dos superficies distintas. (GADELMAWLA ET AL. 2002).

El coeficiente de Kurtosis también se puede utilizar para diferenciar entre superficies, que tienen formas diferentes y un mismo valor de R_a .

9.2.1.6.- Otros parámetros verticales.

Otros parámetros para caracterizar verticalmente la superficie son:

- *Máximo pico* (R_p): se define como la altura máxima del perfil por encima de la línea media dentro de la longitud de evaluación, como muestra en la [figura 9.5](#).

- *Máximo valle* (R_v): se define como la profundidad máxima del perfil por debajo de la línea media dentro de la longitud de evaluación, como muestra en la [figura 9.5](#).

- *Media de picos* (R_{pm}): se define como la media de la altura máxima de los picos (R_p) obtenidos para cada longitud de muestreo:

$$R_{pm} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_{pi} \right) \quad (9.11)$$

donde n es el número de muestras a lo largo de la longitud de evaluación del perfil.

- *Media de valles* (R_{vm}): se define como la media de la profundidad máxima de valles (R_v) obtenida para cada longitud de muestreo:

$$R_{vm} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (9.12)$$

donde n es el número de muestras a lo largo de la longitud de evaluación del perfil.

- *Máxima altura del perfil* ($R_{m\acute{a}x}$), también conocido simplemente como *pico-valle* (PV): se define como la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más bajo a lo largo de la longitud de evaluación del perfil:

$$R_{m\acute{a}x} = R_p + R_v \quad (9.13)$$

Este parámetro es muy sensible a los picos altos o valles profundos.

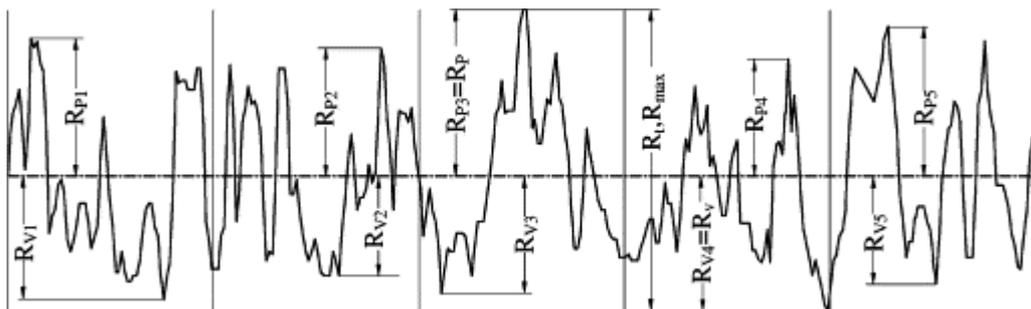


Figura 9 5.-Esquema para la obtención de otros parámetros de rugosidad. (GADELMAWLA ET AL. 2002).

9.2.2.- Parámetros horizontales

Los parámetros de espaciado o parámetros horizontales son aquellos que describen las características horizontales de las variaciones superficiales. Los parámetros de separación son muy importantes para definir algunas operaciones de fabricación, una lubricación consistente y el comportamiento a fricción de superficies. Así mismo, mediante el control de los parámetros de espaciado, es posible obtener una mejor delimitación de acabados. El más utilizado es el *espaciamiento medio de picos* (S_m), que se define como la separación media entre picos consecutivos del perfil:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (9.14)$$

siendo n el número de picos situados en la zona de evaluación, y S_i la distancia medida sobre la línea media entre dos posiciones consecutivas en que el perfil cruza la línea media de abajo a arriba (es decir, con pendiente positiva), como muestra la [figura 9.6](#).

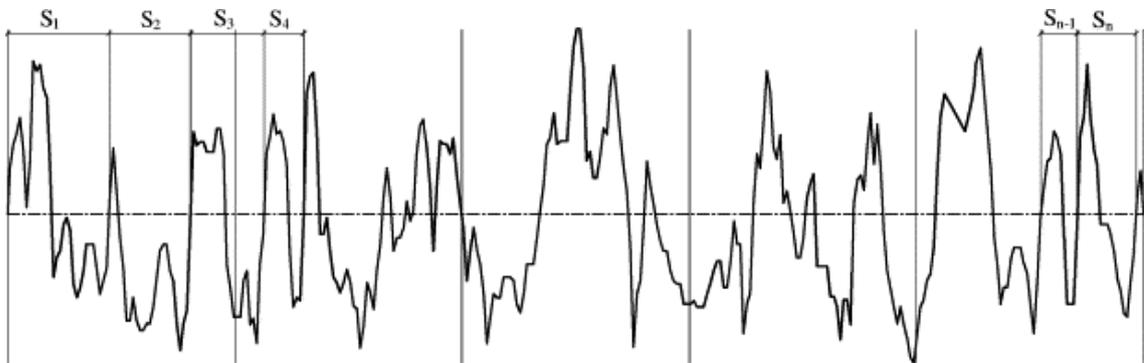


Figura 9 6.-Representación del parámetro de rugosidad S_m . (GADELMAWLA ET AL. 2002).

9.2.3.- Parámetros híbridos

Son parámetros que combinan la amplitud y el espaciamiento. Dentro de estos parámetros destacan:

- *Factor escalonamiento del perfil* (S_t), que se define como la relación entre la altura media aritmética (R_a) y la separación media del perfil (S_m):

$$S_t = \frac{R_a}{S_m} \quad (9.15)$$

- *Factor de ondulación del perfil (W_t):* que se define como la relación entre el rango total de todo el perfil y la altura media aritmética (R_a):

$$W_t = \frac{1}{R_a} \sum_{i=1}^{n-1} l_i \quad (9.16)$$

siendo n el número de puntos de la zona de evaluación, y l_i las respectivas longitudes de los elementos analizados.

9.3.- Determinación de los parámetros de rugosidad

Utilizando la simulación numérica desarrollada del proceso de SP, y para el material descrito en el capítulo cuarto, se ha estudiado la rugosidad de la superficie. Se ha considerado inicialmente, antes de cualquier impacto, una superficie lisa ideal, analizando la rugosidad resultante después del proceso de SP. En un segundo estudio, con el objetivo de buscar una aproximación más cercana a un proceso real, se ha partido de una superficie rugosa.

De todos los parámetros de rugosidad antes descritos, el estudio se ha centrado en los cuatro parámetros verticales: R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} . Para obtener sus valores, se ha tomado como muestra una área centrada de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ dentro de la zona de impacto de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ (figura 6.3), que es la misma zona de estudio ya utilizada para las tensiones residuales. En este caso, lógicamente el análisis se basa en los resultados de los desplazamientos de la superficie, y como puntos de estudio se han considerado los 22188 nodos que contiene la malla de elementos finitos en el área superficial de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$.(figura 6.5).

Para determinar los parámetros de rugosidad de la superficie considerada, es necesario conocer los valores de los desplazamientos producidos en los nodos superficiales. Básicamente, existen dos formas:

- a) Tomar los desplazamientos de puntos situados en líneas en distintas direcciones, y calcular los parámetros de rugosidad de cada línea, posteriormente se realizan medias de los valores de dichos parámetros de rugosidad, incluyendo cada vez más líneas, hasta llegar a un valor estable. Al calcular los valores medios de los parámetros de forma sucesiva, se consigue la estabilización a partir de la décima línea (TARO ET AL., 2015). La [figura 9.7](#) muestra los perfiles de rugosidad de 7 líneas en diferentes direcciones dentro de la misma superficie, después de haber sometido la muestra a un proceso de SP.

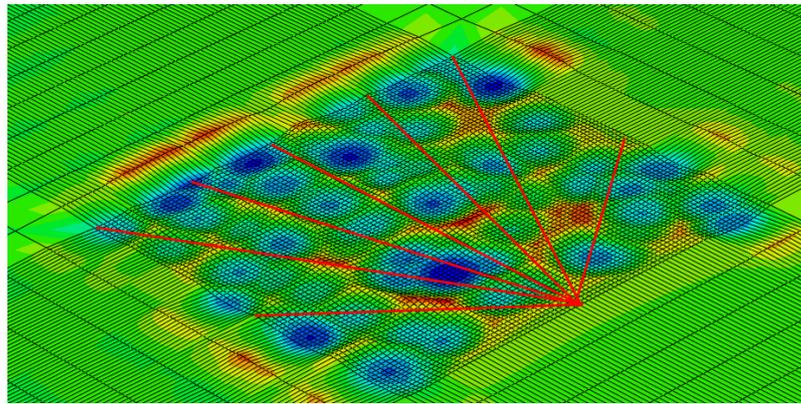


Figura 9 7.- Perfil de rugosidad de las líneas de la superficie indicadas en la imagen inferior, tras ser sometida a un proceso de SP tomando los VRP.

- b) Tomar los desplazamientos de todos los nodos de la superficie y, a partir de ellos, obtener los parámetros de rugosidad. En la [figura 9.8](#) se puede ver el perfil de rugosidad superficial de toda la zona de impacto de la muestra.

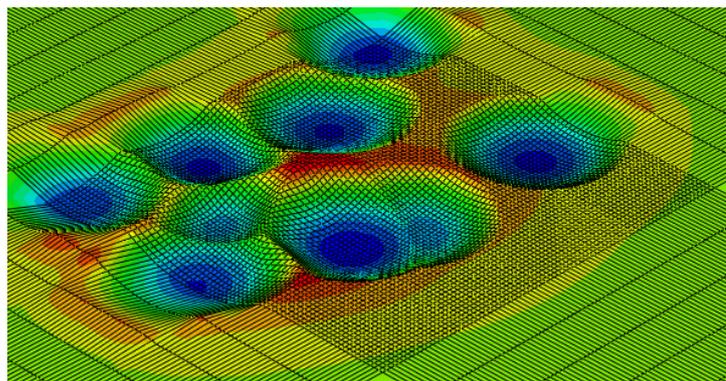


Figura 9 8.- Simulación numérica de la rugosidad superficial correspondiente a la muestra después de un proceso de SP (tomando en la simulación los VRP para una velocidad impacto de 20 m/s).

En el presente trabajo se ha optado por tomar los valores de los desplazamientos de todos los nodos de la superficie. Requiere más tiempo de cálculo, pero así la información obtenida es más completa.

9.3.1.- “Parámetros de rugosidad” de una huella.

Antes de realizar un estudio paramétrico de la rugosidad, se ha estudiado los “parámetros de rugosidad” generados por una sola huella en función del diámetro de la bola y de la velocidad de impacto.

Tabla 9 1.- “Parámetros de rugosidad” Ra y Rq de la huella generada por una bola de distintos diámetros al impactar sobre una muestra a diferentes velocidades de impacto.

\varnothing (mm)	V (m/s)	R _a (μ m)	R _q (μ m)		V (m/s)	\varnothing (mm)	R _a (μ m)	R _q (μ m)			
0.4	20	1.737	2.545	20		0.4	1.737	2.545			
	40	4.632	5.955			0.6	3.011	4.124			
	60	8.026	9.705			0.8	3.541	5.156			
	80	9.731	12.486			1	4.842	6.787			
	100	11.747	13.439			1.2	5.775	8.485			
	120	13.826	15.167								
0.6				40		0.4	4.632	5.955			
						0.6	6.971	9.288			
						0.8	8.575	11.405			
						1	10.731	14.254			
						1.2	13.250	17.534			
						120	18.435	24.743	60	0.4	8.026
0.8					0.6	8.984	12.228				
					0.8	11.715	15.373				
					1	14.151	19.245				
					1.2	15.867	23.879				
					80	14.353	20.444	80		0.4	9.731
					100	18.712	26.117		0.6	11.653	15.984
120	23.101	34.302	0.8	15.353	20.444						
1					1	19.643	28.288				
					40	10.731	14.254		1.2	21.762	31.184
					60	15.151	19.245		100	0.4	9.747
					80	19.643	24.288	0.6		15.368	20.558
					100	24.092	32.922	0.8		18.712	26.117
					120	28.332	41.259	1		22.092	32.922
1.2					1.2	23.874	37.954				
					40	13.250	17.534	120		0.4	9.826
					60	16.867	23.879				

80	23.762	31.184	0.6	18.435	24.743
100	29.874	40.954	0.8	23.101	33.302
120	35.659	51.202	1	28.332	41.259
			1.2	30.659	46.202

Los resultados se pueden observar en las figuras 9.9 a 9.12, y en las tablas 9.1.

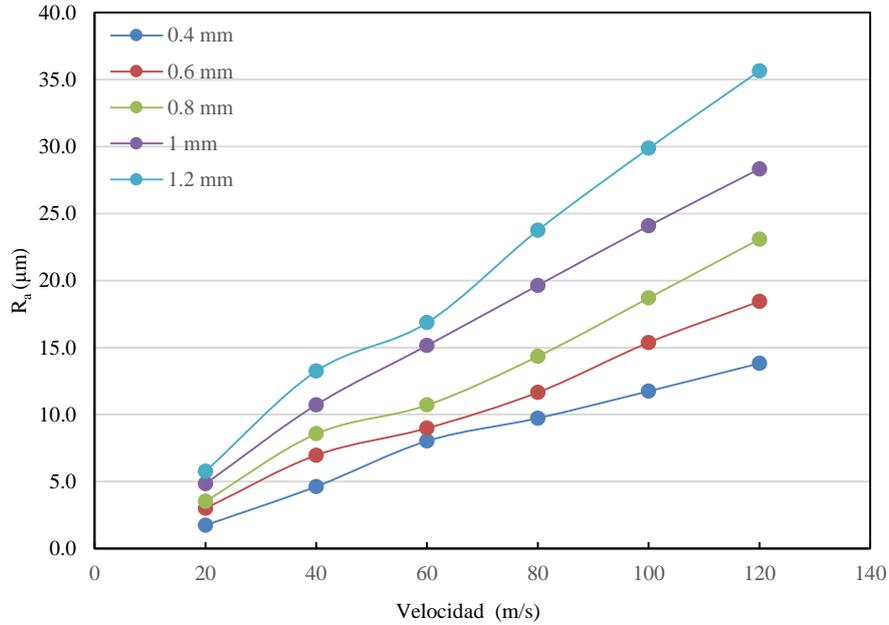


Figura 9.9.- Graficas de las evolución del parámetros R_a en función de la velocidad de impacto, correspondiente a la huella generada por una sola bola de distintos diámetros (%C = 98).

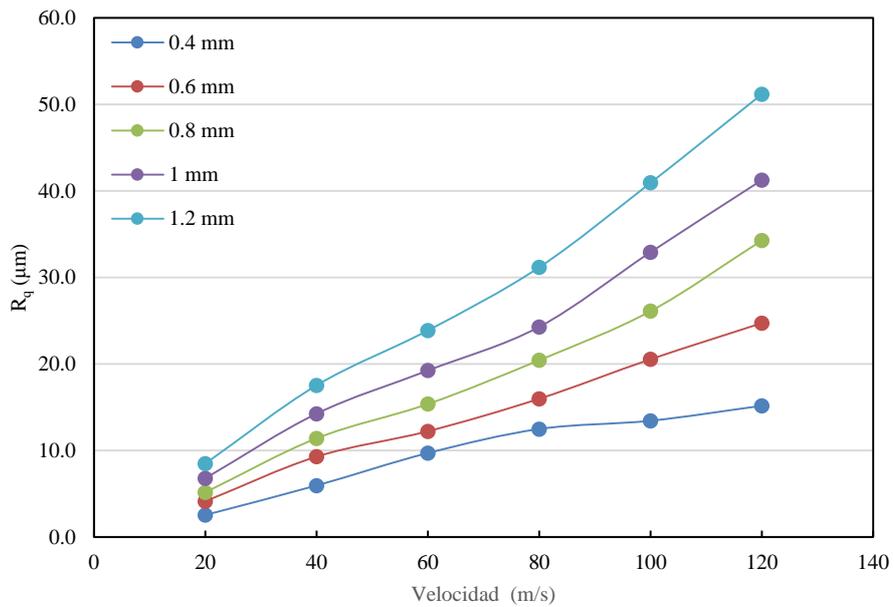


Figura 9.10.- Graficas de las evolución del parámetros R_q en función de la velocidad de impacto, correspondiente a la huella generada por una sola bola de distintos diámetros (%C = 98).

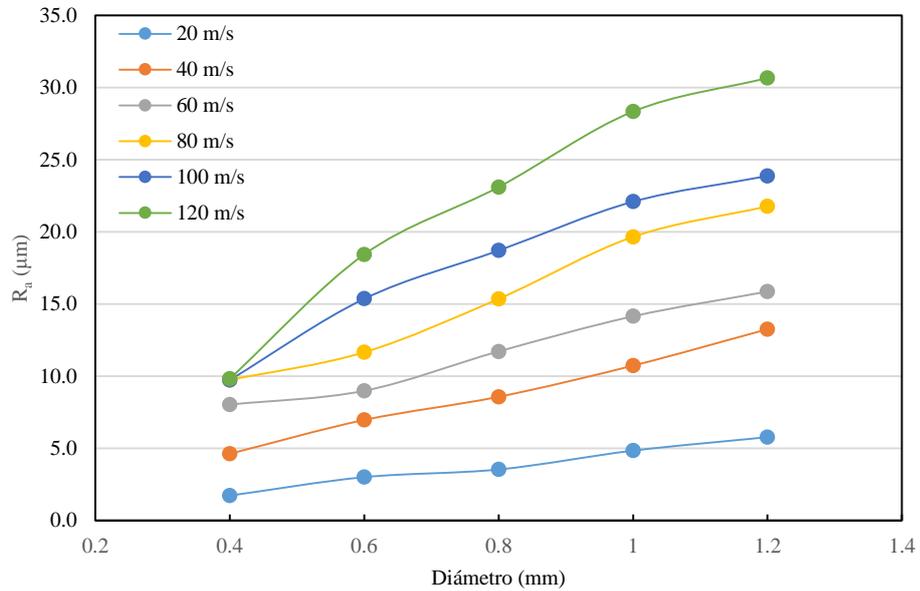


Figura 9.11.- Graficas de las evolución del parámetros R_a en función del diámetro de las bolas, correspondiente a la huella generada por una sola bola impactando a distintas velocidades (%C = 98).

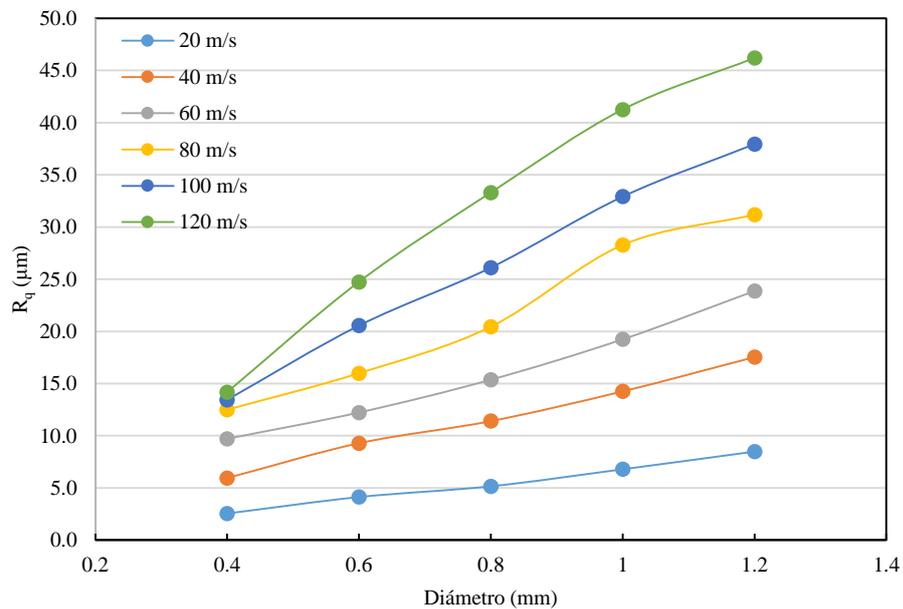


Figura 9.12.- Graficas de las evolución del parámetros R_q en función del diámetro de las bolas, correspondiente a la huella generada por una sola bola impactando a distintas velocidades (%C = 98).

Estas gráficas se comentarán en el apartado 9.4.2, en comparación con los resultados obtenidos de los parámetros de rugosidad de toda la zona de impacto.

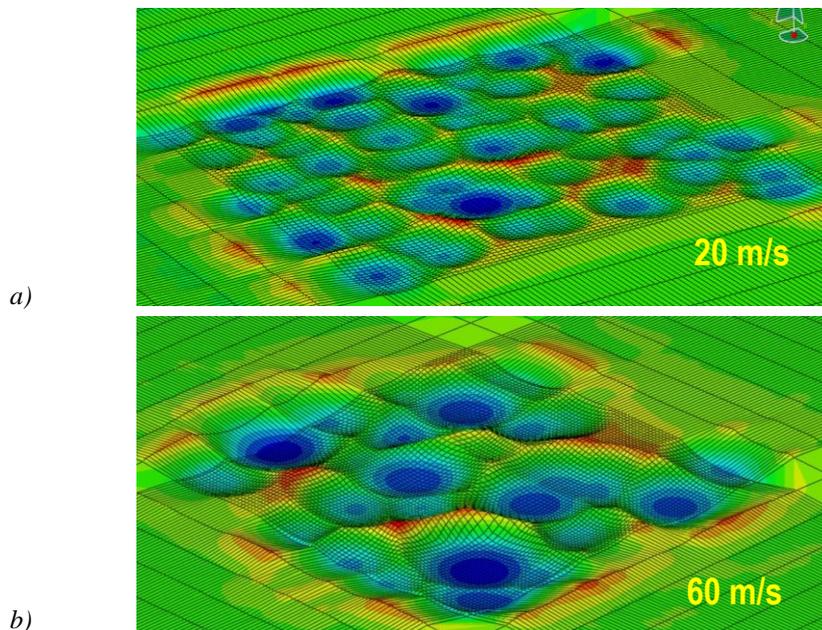
9.4.- Estudio paramétrico de la rugosidad

En este apartado se expone el estudio realizado sobre la variación de los parámetros de rugosidad en función de las siguientes variables del proyectil y del proceso de SP:

- Velocidad de impacto.
- Ángulo de impacto.
- Diámetro de las bolas.
- Grado de cobertura.

9.4.1.- Variación de la rugosidad con la velocidad de impacto

La velocidad de impacto, es uno de los parámetros que más influye sobre la huella que describen las bolas y, lógicamente, sobre la cobertura. Se estudiará ahora cómo cambian los parámetros de rugosidad en función de la velocidad de impacto, utilizando el modelo numérico 3D de referencia, en el que sólo se modifica en cada caso la velocidad de impacto, que toma los valores: 20, 40, 60, 80 y 100 m/s. La [figura 9.13](#) muestra las superficies que resultan con velocidades de impacto de 20, 60 y 100 m/s.



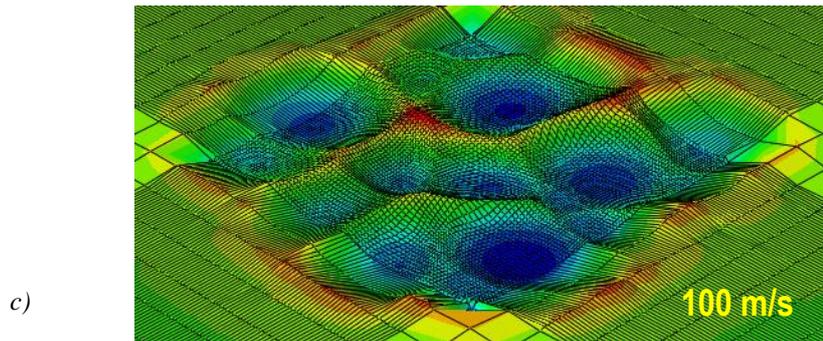


Figura 9.13.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP a velocidades de 20, 60 y 100 m/s.

Para cada velocidad de impacto considerada, se han calculado los desplazamientos verticales de los 22188 nodos de la superficial. Posteriormente, el tratamiento numérico ha consistido en calcular el desplazamiento medio, y determinar a continuación los valores de los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , mediante las ecuaciones (9.2), (9.4), (9.8) y (9.10) respectivamente, considerando la diferencia de los desplazamientos nodales respecto de su valor medio. Los valores correspondientes de los parámetros de rugosidad se han representado frente a la velocidad de impacto en las figuras 9.14 a 9.17.

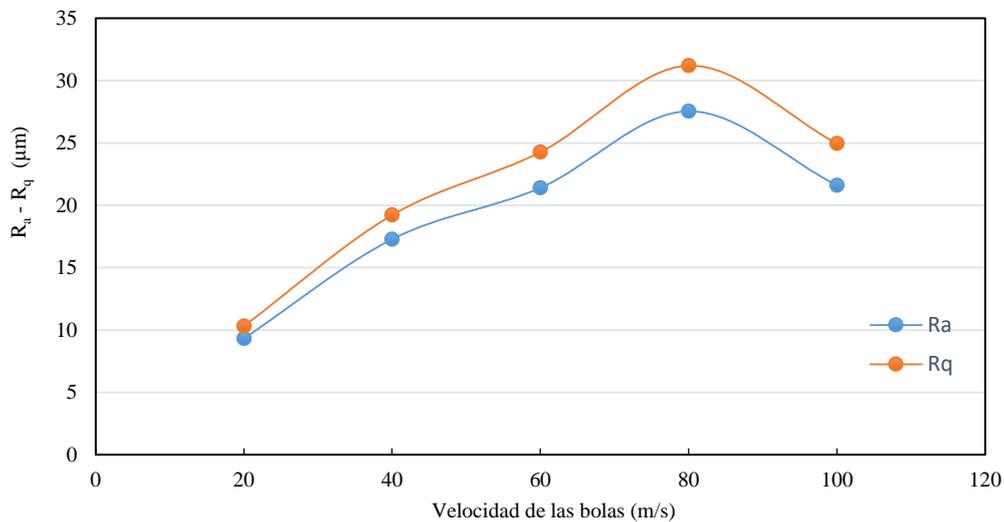


Figura 9.14.- Variación de los parámetros de rugosidad R_a y R_q con la velocidad de impacto

Los parámetros R_a y R_q son muy parecidos en cuanto a la información que proporcionan sobre la rugosidad de una superficie, aunque R_q es más sensible que R_a a rugosidades con perfiles rugosos bajos. En la figura 9.14 se observa cómo ambos van aumentando con la

velocidad de impacto, hasta llegar a la velocidad de 80 m/s, a partir de la cual comienzan a disminuir. Este resultado está en consonancia con los resultados obtenidos por TARO ET AL. (2015) en los que también aparece una estabilización del parámetro R_a a partir de un determinado valor de la velocidad, aunque, dado que su trabajo se centra en el USP, trabajan con velocidades notablemente menores.

Como ya se ha comentado anteriormente, puede ocurrir que dos superficies con el mismo R_a y R_q tengan diferentes perfiles de rugosidad. Para discriminar sus características, es necesario estudiar otros parámetros, como son el parámetro de asimetría y el parámetro de kurtosis.

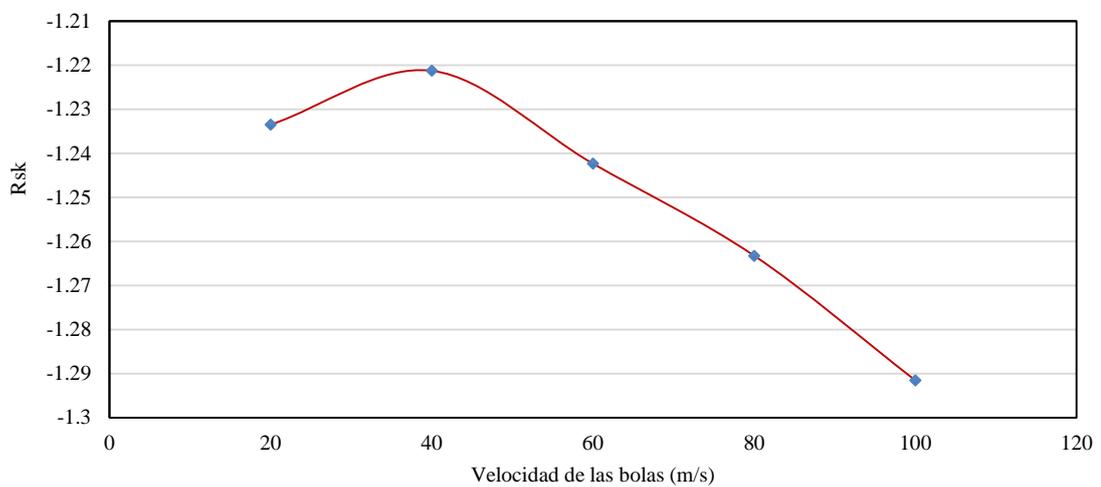


Figura 9.15.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la velocidad de las bolas.

En la [figura 9.15](#) se observa que el parámetro R_{sk} tiene valores negativos, que van haciéndose más negativos al aumentar la velocidad de impacto. El hecho de que su valor sea negativo indica que en el perfil de rugosidad tiene picos suaves y profundos valles. Como el parámetro va creciendo (en valor absoluto) a medida que aumenta la velocidad, los valles son más profundos, resultado lógico, como se puede ver en las imágenes que forman la [figura 9.13](#).

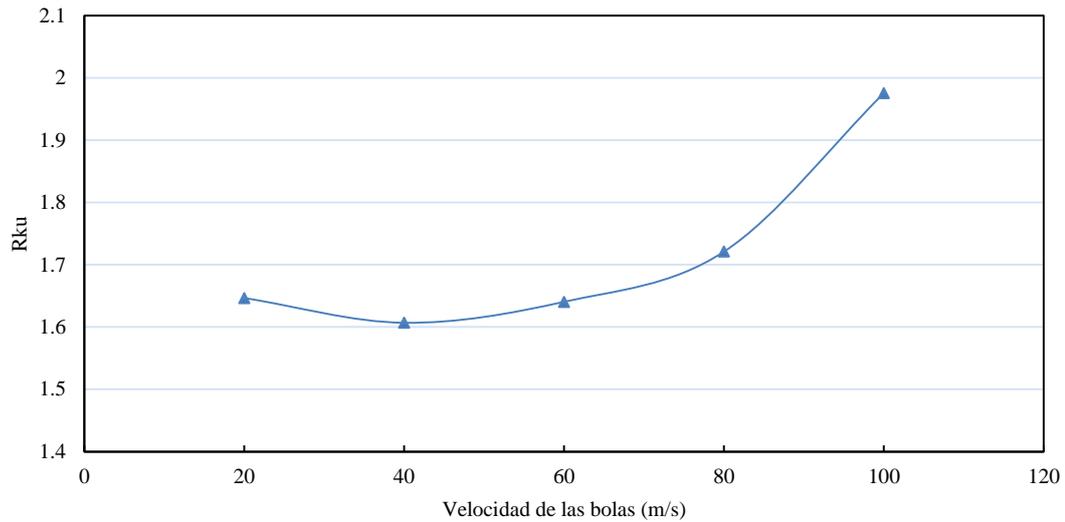


Figura 9.16.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la velocidad de las bolas.

En la figura 9.16 se observa que R_{ku} prácticamente no varía con la velocidad de impacto, excepto para velocidades muy altas en que aumenta ligeramente, hasta $R_{ku} \cong 2$ para 100 m/s. También en la figura 9.16 puede apreciarse que el valor de R_{ku} es siempre menor de tres para todo el rango de velocidades de impacto considerado, en consonancia con que el perfil de rugosidad de la superficie tratada con SP tenga amplios picos y pocos valles

Debido el efecto que producen las bolas al impactar sobre la superficie, es normal que el perfil de rugosidad tenga predominantemente valles profundos, y que éstos estén más separados a medida que va aumentando la velocidad (figura 9.17).

Para ilustrar mejor la variación de la rugosidad con la velocidad, la figura 9.17 muestra los perfiles 2D de la rugosidad en el eje Z obtenidos con tres velocidades de impacto. En dicha figura se observa que todos los perfiles mostrados se caracterizan por tener valles profundos. Estos valles son más intensos a medida que va aumentando la velocidad. Los picos son suaves, presentando formas casi redondeadas. Esta imagen concuerda con los resultados obtenidos para los parámetros de rugosidad R_{sk} y R_{ku} .

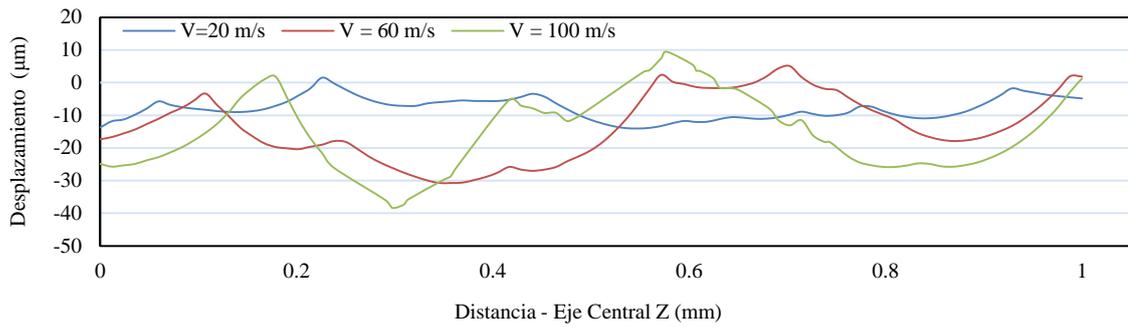
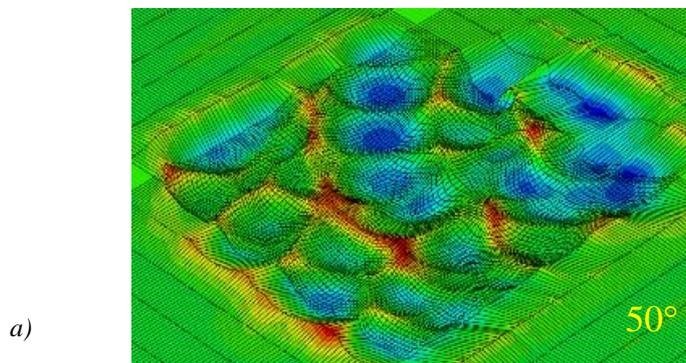


Figura 9 17.- Perfiles de rugosidad 2D en el eje central Z de la superficie de impacto, obtenidos para varias velocidades de impacto (valores de referencia VRP).

9.4.2.- Variación de la rugosidad con el ángulo de impacto

En el apartado 7.3 se concluyó que la forma de la huella producida por el impacto de una sola bola varía completamente con el ángulo de impacto de la misma. Con objeto de ver si la variación de este parámetro en el proceso de SP tiene una influencia notable sobre los parámetros de rugosidad, en el caso de ensayos con muchas bolas (cobertura del 98%), se realizaron simulaciones numéricas del modelo de referencia, pero considerando ángulos de impacto de 50°, 60°, 70°, 80° y 90°. La figura 9.18 muestra las superficies que resultan con ángulos de impacto de 50°, 60° y 80°.

Con un proceso similar al descrito al principio del subapartado anterior, se obtuvieron los valores de los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , que se han representado frente al ángulo de impacto en las figuras 9.19 a 9.23.



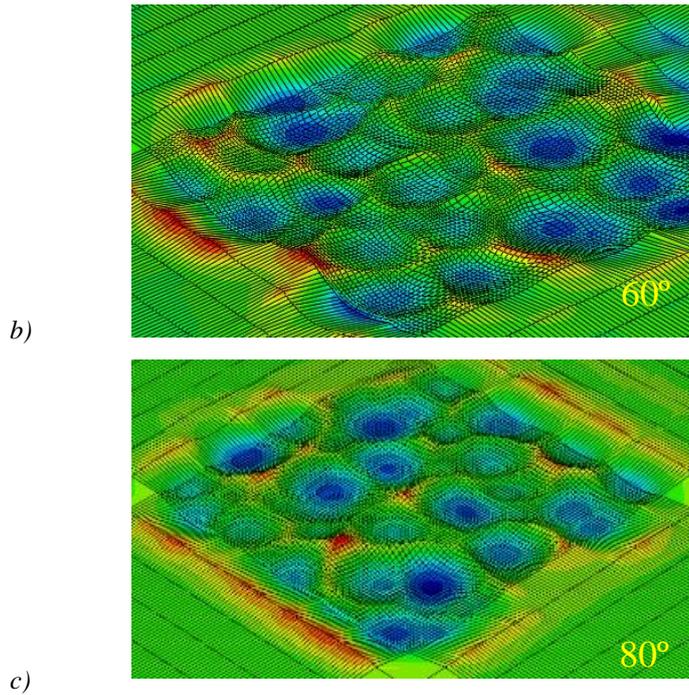


Figura 9.18.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP, para ángulos de impacto de 50°, 60° y 80°.

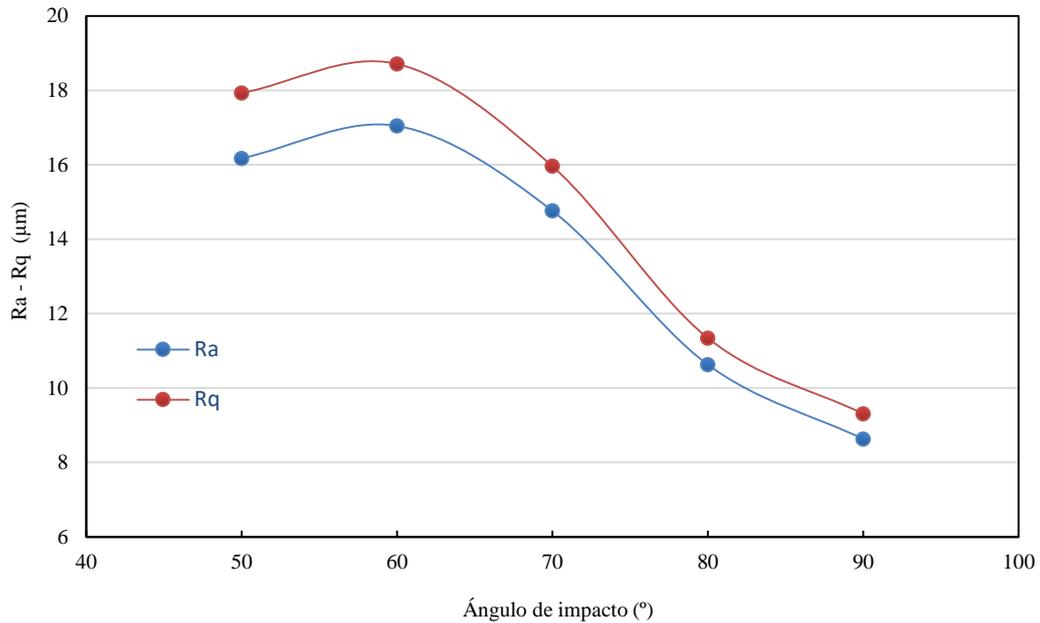


Figura 9.19.- Evolución de los parámetros de rugosidad R_a y R_q para ángulos de impacto de 50°, 60°, 70°, 80° y 90° (parámetros VRP).

En la [figura 9.19](#) se observa que, cuando la dirección de impacto se acerca a la perpendicular a la superficie (90°), los valores de los parámetros R_a y R_q van disminuyendo, a partir de los valores máximos, que se alcanzan en torno a 60°. Esta forma

de variación de los parámetros indica que la altura de picos y la profundidad de valles van reduciéndose a medida que el ángulo de impacto se aproxima a la vertical.

Como se expuso en el capítulo 5, la huella generada por una sola bola, a medida que la dirección de impacto se aleja de la vertical, presenta unas pile-up en una de sus zonas, originando que R_a y R_q aumenten. Por el contrario, al acercarse la dirección de impacto a la vertical, estos pile-up van desapareciendo y, por tanto, los valores de los parámetros de rugosidad disminuyen.

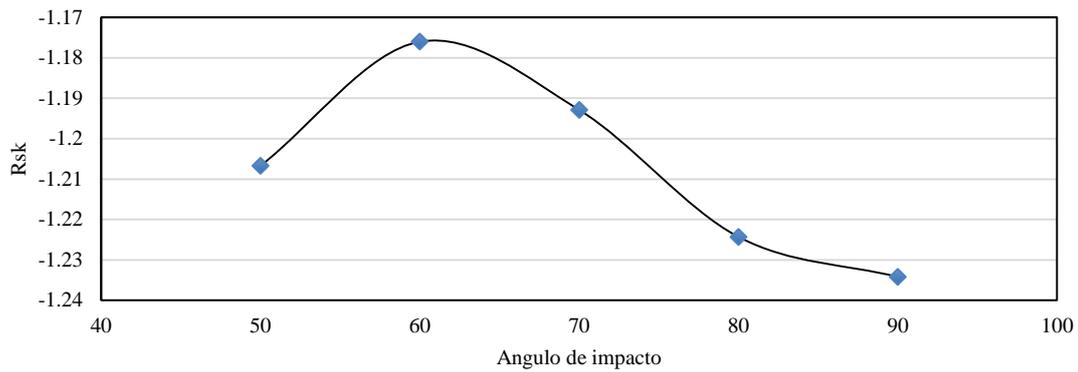


Figura 9 20.- Evolución del parámetro R_{sk} en función del ángulo de impacto.

En cuanto a los valores de R_{sk} , en la figura 9.20 puede verse que son todos negativos, indicando que los perfiles de rugosidad en toda la superficie se caracterizan por tener pocos picos y valles profundos. Ahora bien, a medida que el ángulo de impacto crece, el valor de R_{sk} va aumentando en valor absoluto, lo que indica que los valles van siendo más profundos. La tasa de crecimiento es muy pronunciada entre los 60° y los 80° , pero su pendiente es menor entre 80° y 90° .

Si se comparan las figuras 9.15 y 9.20, se observa que el parámetro R_{sk} sigue una tendencia similar en ambos casos, aumentando en valor absoluto a medida que se incrementa la velocidad o la dirección de impacto se aproxima a la vertical. Estos resultados se corresponden con el hecho de que, a mayor velocidad y/o dirección de impacto más próxima a la perpendicular a la superficie, las huellas que provocan las bolas son de mayor profundidad.

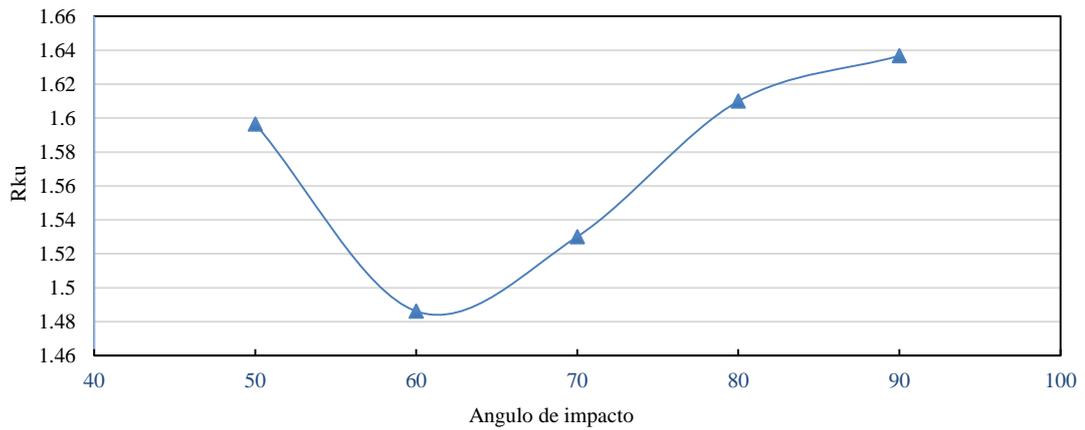


Figura 9.21.- Evolución del parámetro R_{ku} en función del ángulo de impacto.

En la figura 9.21 puede apreciarse que los valores de R_{ku} son todos inferiores a tres, lo que indica la presencia de valles profundos y picos suaves. Con $\alpha = 50^\circ$, el valor de R_{ku} es mayor, debido a que se provocan peaks mayores, como se expuso al describir la morfología de la huella producida por un solo impacto, en el capítulo anterior. De todas formas, los valores de R_{ku} con α cambian muy poco, ya que pasan de un valor mínimo de 1.48 a un máximo de 1.63.

Para ilustrar mejor la variación de la rugosidad con el ángulo de impacto, en la figura 9.22 se muestran los perfiles en 2D de la rugosidad en el eje Z para distintos ángulos de impacto.

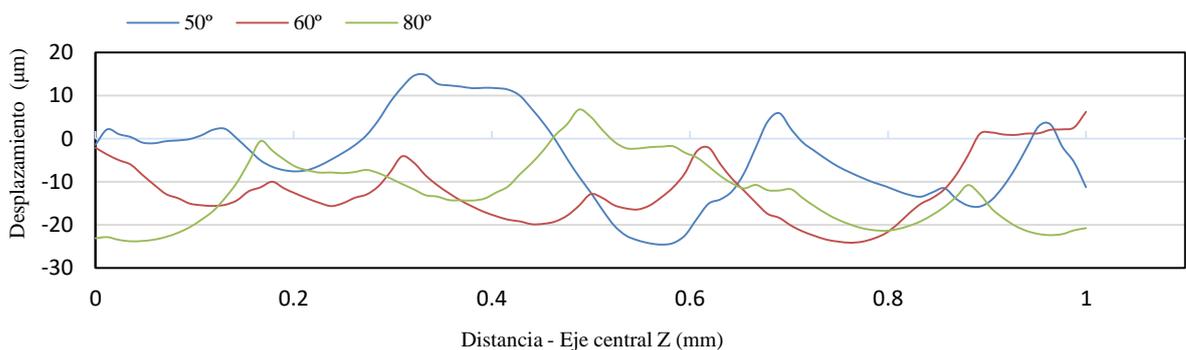


Figura 9.22.- Perfiles de rugosidad 2D, para varios ángulos de impacto, en el eje Z de la superficie.

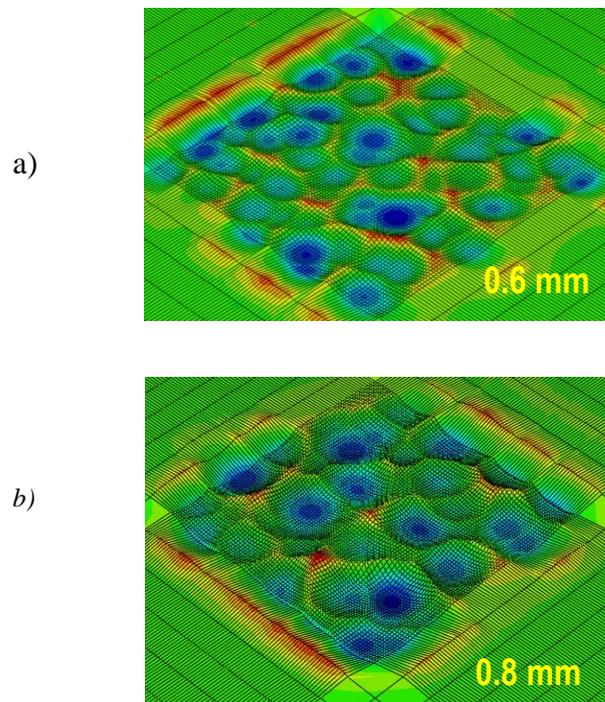
Al analizar los perfiles de la figura 9.22, se observa que cuando $\alpha=50^\circ$ los valles son profundos y los picos se encuentran por encima de la línea media. Esto se debe a los pile-up que se generan con un ángulo de impacto bajo. Este hecho es la causa de que el valor de R_{ku} puede tener, con este ángulo de impacto, un valor elevado. Cuando $\alpha = 60^\circ$

empiezan a dominar los valles más profundos, lo que se corresponde con la disminución tanto del parámetro R_{sk} como de R_{ku} .

9.4.3.- Variación de la rugosidad con el diámetro de las bolas

En el capítulo 5 se concluyó que el diámetro de la bola es una de las variables que más influyen en el tamaño de la huella, tanto en diámetro como en profundidad. Por ello también se ha realizado un estudio de la variación de los parámetros de rugosidad con el tamaño de las bolas.

En el caso general del proceso de SP con muchas bolas, se han ejecutado las simulaciones numéricas con las variables del modelo de referencia (valores de VRP), pero con bolas de diámetro 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 1.2 mm. La [figura 9.23](#) muestra las superficies que resultan con bolas de 0.6, 0.8 y 1.0 mm de diámetro. Posteriormente, en cada caso estudiado, se han calculado los parámetros de rugosidad y representado sus valores frente al diámetro de las bolas en las [figuras 9.24 a 9.27](#).



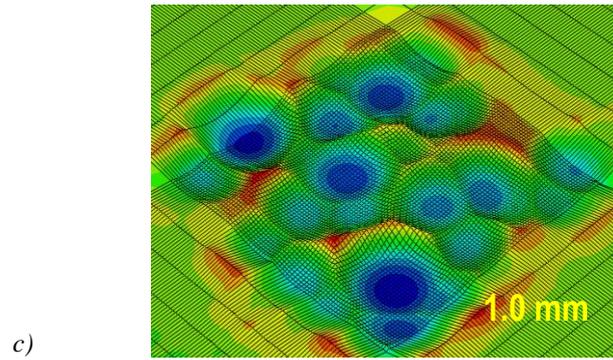


Figura 9.23.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP para diámetros de bola de 0.6, 0.8 y 1.0 mm.

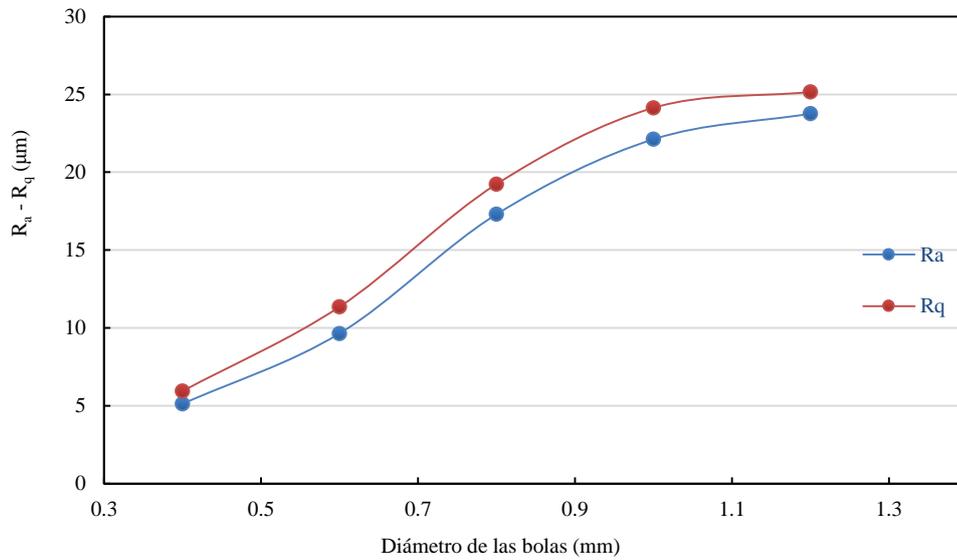


Figura 9.24.- Evolución de los parámetros de rugosidad R_a y R_q para diámetros de bola de 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 1.2 mm.

En la [figura 9.24](#) se observa que los parámetros de rugosidad R_a y R_q aumentan de valor a medida que crece el diámetro de las bolas que impactan sobre la muestra, en consonancia con la [figura 9.23](#), que muestra cómo cambia la morfología de la superficie al pasar el diámetro de 0.6 a 1.0 mm, pudiendo apreciarse cómo las huellas tienen mayor diámetro y profundidad cuando el diámetro de bola es mayor.

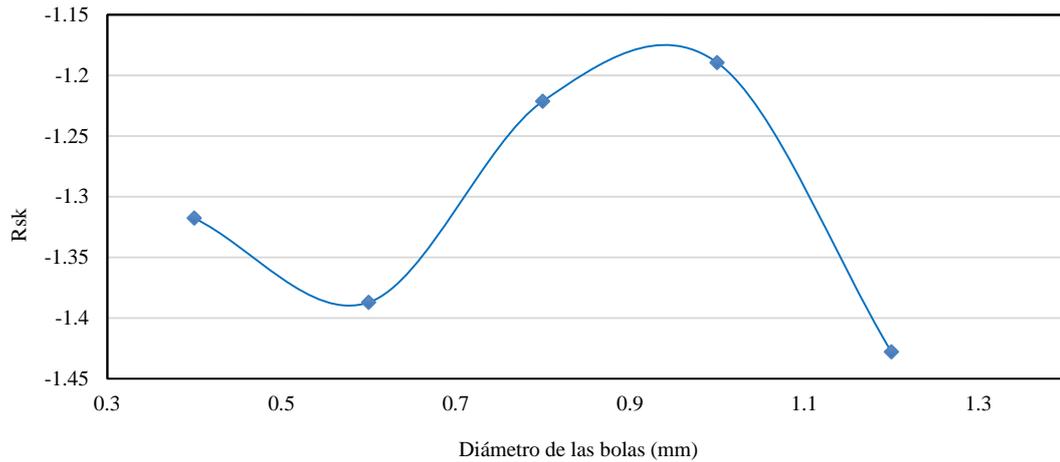


Figura 9.25.- Evolución del parámetro Rsk en función del diámetro de las bolas.

En la [figura 9.25](#) puede observarse que R_{sk} es negativo para todos los diámetros de bola, lo que indica que el relieve de toda la superficie tiene picos suaves y valles profundos. A medida que va creciendo el diámetro, el valor absoluto de R_{sk} va disminuyendo en valor absoluto. Esta disminución puede interpretarse como que la superficie se va suavizando, de modo que existe menos diferencia entre picos y valles, como también se aprecia en la [figura 9.27](#).

En los apartados anteriores se ha observado que este parámetro aumenta cuando se incrementa la velocidad de las bolas, y cuando el ángulo de impacto se aproxima a la vertical, lo que indica que los picos van siendo cada vez menores y/o los valles cada vez más profundos. Sin embargo, con el aumento de diámetro, este parámetro disminuye, lo que parece indicar que el perfil de rugosidad es menos simétrico entre los picos y los valles, como se puede ver en la [figura 9.27](#).

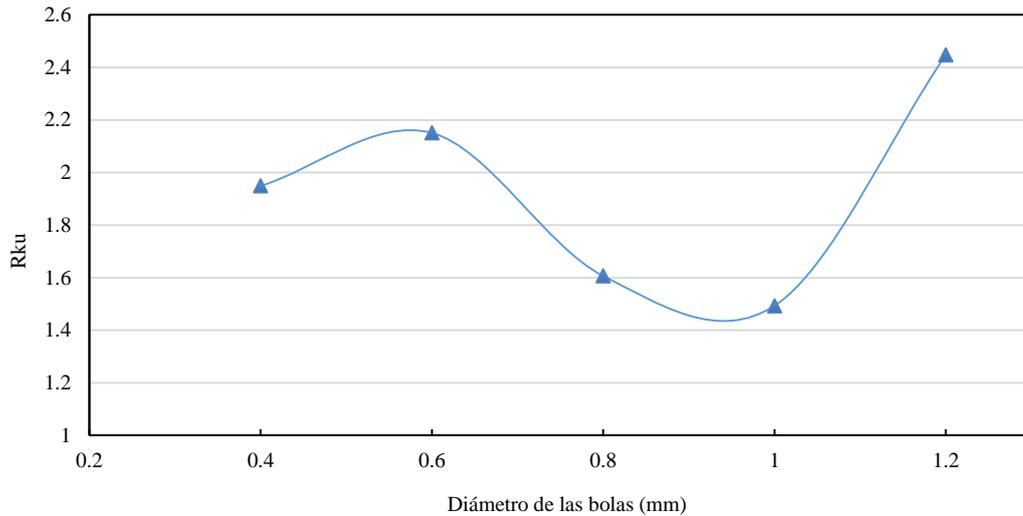


Figura 9.26.- Evolución del parámetro R_{ku} en función del diámetro de las bolas

Según la figura 9.26, el diámetro de las bolas hace también que R_{ku} disminuya al aumentar éste. Como sucedía con R_{sk} , sigue un comportamiento opuesto a lo que ocurre al aumentar la velocidad de las bolas (figura 9.15) o el ángulo de impacto (figura 9.20), pero R_{ku} es menos sensible a los cambios. También, en la figura 9.26, se observa que R_{ku} tiene valores inferiores a tres, lo que indica que hay dominio de valles y picos amplios en el perfil de rugosidad. El hecho de que vaya disminuyendo este valor indica, al igual que ocurre con R_{sk} , que a medida que aumenta el diámetro, el perfil en su conjunto se suaviza más y existe menos diferencia entre picos y valles.

Para ilustrar mejor la variación de la rugosidad con el aumento del diámetro, la figura 9.27 muestra los perfiles 2D del eje Z para diámetros de 0.6 y 1 mm, en ambos casos se presentan valles amplios frente a picos suaves. En el perfil de 1 mm los valles son más profundos, pero en su conjunto el perfil se suaviza, existiendo menos diferencia entre los picos y los valles. Este hecho justifica que los valores de los parámetros R_{sk} y R_{ku} vayan disminuyendo a medida que aumenta el diámetro de la bola.

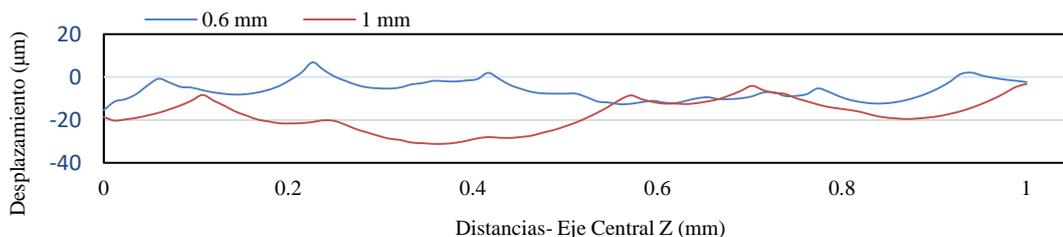


Figura 9.27.- Perfiles de rugosidad 2D, para diferentes diámetros de bolas, en el eje central Z de la superficie

9.4.4.- Variación de la rugosidad con el grado de cobertura.

Ya se comentó en el capítulo 5 que la cobertura es una variable muy importante a tener en cuenta en el proceso de SP.

En el modelo de cobertura elegido las bolas van impactando en posiciones aleatorias de la zona de impacto de la muestra hasta conseguir la cobertura prescrita.

El número de bolas necesarias para conseguir un porcentaje de cobertura dado se ha determinado mediante las ecuaciones 5.1 y 5.2.

Se han ejecutado las simulaciones numéricas con las variables del modelo de referencia (valores VRP), pero con coberturas del 50% (13 bolas), 98% (73 bolas), 200% (146 bolas), 250% (184 bolas), 300% (223 bolas) y 400% (292 bolas). La [figura 9.28](#) muestra las superficies que resultan para coberturas del 50%, 98%, 200% y 400%.

Es necesario indicar que lo más habitual es una cobertura del 98%. Coberturas superiores a este valor, por ejemplo del 200%, 300% o 400%, significa que se ha multiplicado el número de bolas de la cobertura de 98% por 2, 3 o 4.

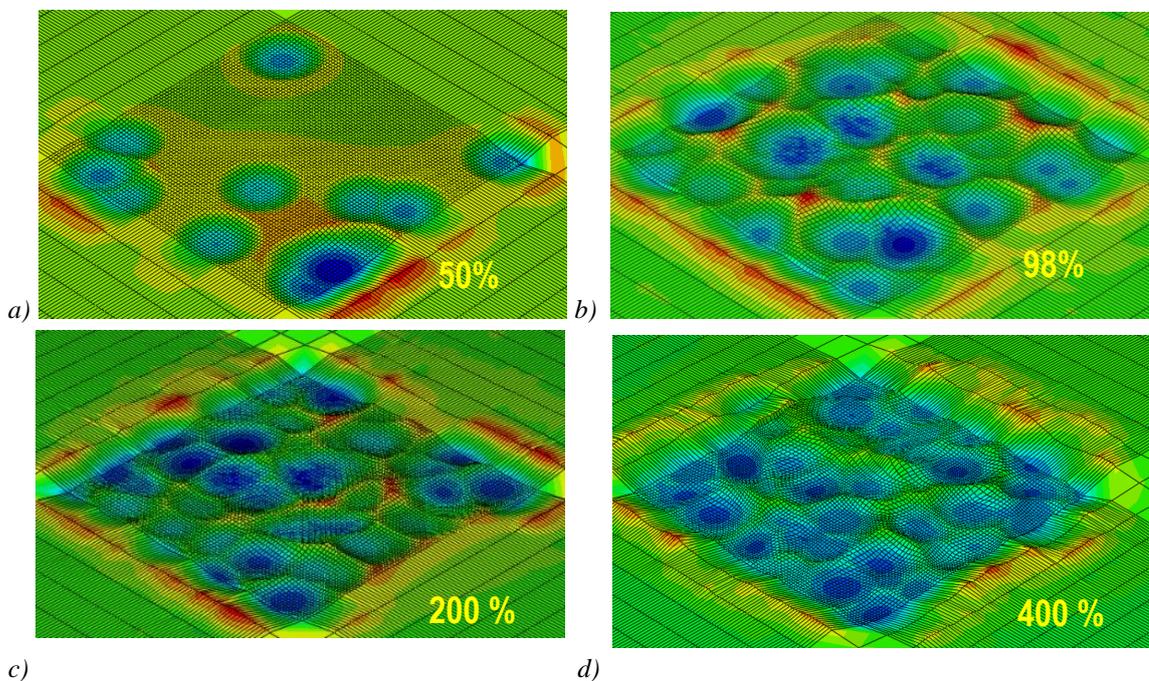


Figura 9.28.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP para diferentes grados de cobertura.

En las figuras 9.29 a 9.32 se representa la variación de los parámetros de rugosidad en función del grado de cobertura, calculados en cada caso a partir de los desplazamientos de los nodos de la superficie, proporcionados por el programa de elementos finitos. Para un grado de cobertura del 50% se han realizado 5 simulaciones con objeto de obtener un valor promedio de los parámetros de rugosidad por ser necesario un número pequeño de bolas para una cobertura tan pequeña.

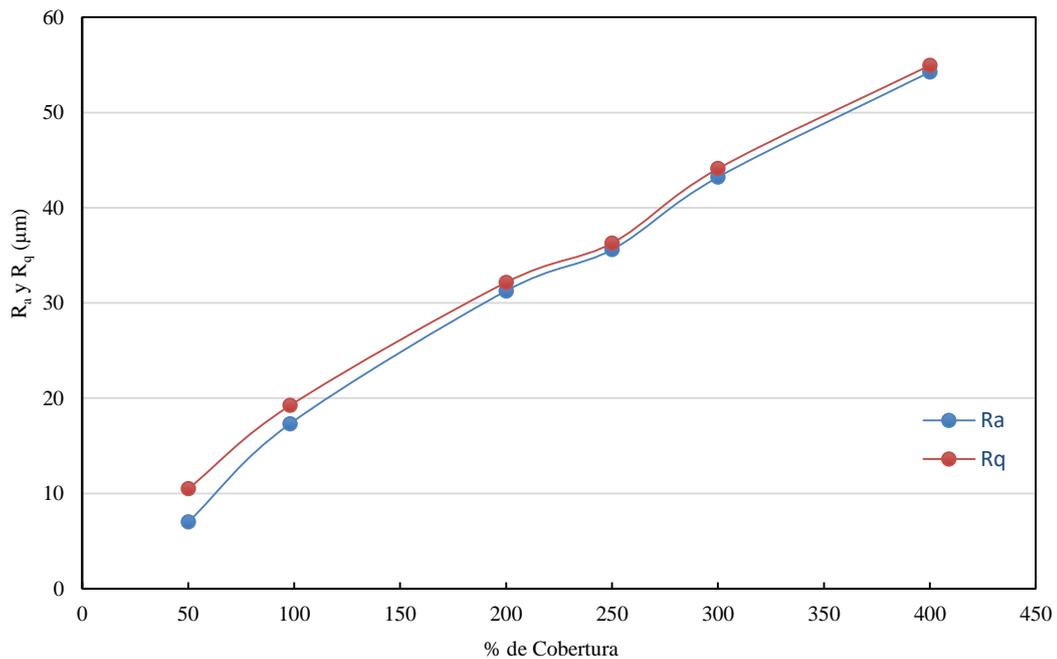


Figura 9.29.- Graficas de la evolución de los parámetros de rugosidad R_a y R_q para 50, 98, 200, 250,300 y 400 % de cobertura.

La figura 9.29 muestra la evolución de los parámetros R_a y R_q con el porcentaje de cobertura. Como se puede ver, el valor de ambos aumenta a medida que se incrementa el grado de cobertura sobre la zona de impacto. Ambos parámetros tienen una variación muy similar, de modo que prácticamente las gráficas son paralelas. El hecho de que aumenten ambos parámetros indica que los valles son más profundos a medida que aumenta la cobertura y/o los picos más elevados.

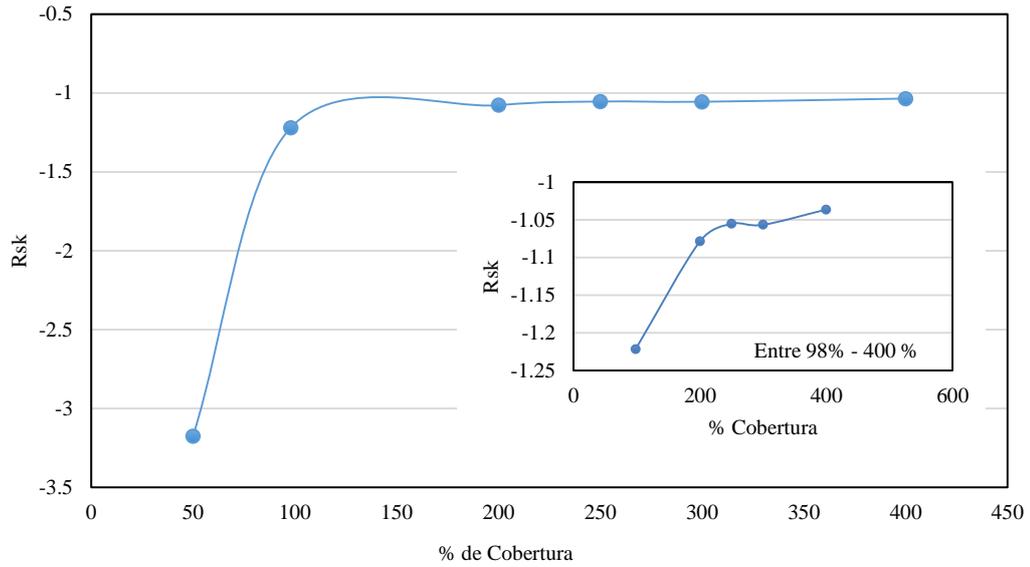


Figura 9 30.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la cobertura.

En cuanto al parámetro de asimetría R_{sk} , en la [figura 9.30](#) se observa que R_{sk} es negativo, de manera que la rugosidad presenta valles profundos y picos suaves. Al 50% de cobertura, el parámetro R_{sk} es elevado debido a que la zona de impacto presenta diferencias entre las zonas impactadas y las que no lo han sido ([figura 9.30](#)). Sin embargo, a partir del 98% de cobertura el parámetro parece que se estabiliza. En la gráfica más pequeña incorporada en la [figura 9.30](#), en la que no aparece el valor de R_{sk} correspondiente al 50% de cobertura, puede apreciarse de manera más precisa el cambio del parámetro R_{sk} entre el 98% y el 400%, que pasa de -1.22 al 98% a -1.03 al 400% de cobertura. Esta disminución (en valor absoluto) se debe a que, a medida que aumenta la cobertura, los solapamientos de los impactos de las bolas sobre la superficie son mayores. Esto hace que los valles se hagan más profundos y los picos se suavicen. Este cambio es un poco más acentuado entre el 98% y el 200%, quedando prácticamente estabilizado entre el 200% y el 400%.

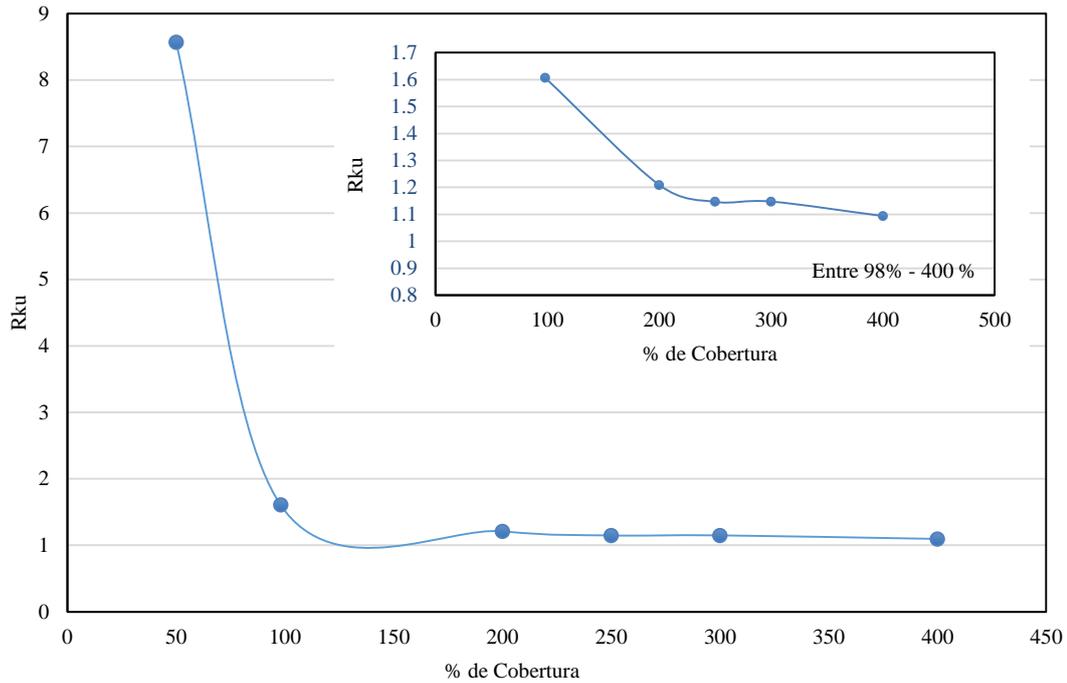


Figura 9.31.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la cobertura.

La [figura 9.31](#) muestra que, al igual que ocurre con el parámetro R_{sk} , existe una gran diferencia entre el valor del parámetro R_{ku} al 50% de cobertura con el resto. Como se comentó más arriba, se debe a que existe, dentro de la zona de estudio, un 50% de superficie con impactos y otro 50% sin impactos. Esta diferencia, en la evaluación conjunta, hace que el parámetro presente un valor bastante diferente al obtenido para las restantes coberturas.

La gráfica pequeña situada en la parte superior derecha de la [figura 9.31](#) muestra con detalle la variación de R_{ku} entre el 98% y el 400% de cobertura. Se aprecia que los valores de R_{ku} también van disminuyendo desde un valor de 1.5 al 98% a un valor de 1 al 400% de cobertura. La mayor bajada se produce entre el 100 y 200%, estabilizándose entre el 200 y el 400%. Esta misma tendencia es la que presentaba el parámetro R_{sk} .

Para visualizar con más detalle la rugosidad de la zona impactada, en la [figura 9.32](#) se muestra el perfil 2D del eje central Z para coberturas entre el 98% y 400%.

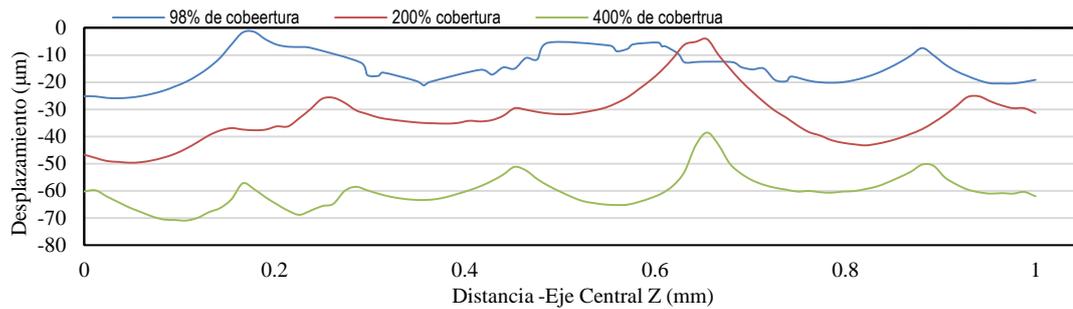


Figura 9 32.- Perfiles de rugosidad 2D, con distintos grados de cobertura, en el eje central Z de la superficie.

Mediante estos perfiles es posible justificar el crecimiento de los parámetros R_a y R_q a medida que aumenta la cobertura, ya que fácilmente se observa que los valles son cada vez más profundos, llegando la profundidad media del perfil hasta las $70 \mu\text{m}$ con un 400% de cobertura.

En la figura 9.32 también se aprecia que, a medida que aumenta el grado de cobertura, los perfiles se van suavizando, disminuyendo la diferencia entre picos y valles. Este hecho se ha destacado para justificar la razón por la que los parámetros R_{sk} y R_{ku} van disminuyendo progresivamente.

9.4.5.- Comparación entre la influencia de las variables.

Agrupando los datos obtenidos de las simulaciones realizadas, se han elaborado unas tablas que permiten conocer los parámetros de rugosidad (R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku}), $\sigma_{\text{máx}}$ y $\delta_{\sigma_{\text{máx}}}$ en función del diámetro de las bolas y de la velocidad de las mismas. Todo ello para el material utilizado en este estudio: Acero D2205c.

Tabla 9 2.- Parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , $\sigma_{\text{máx}}$ y $\delta_{\sigma_{\text{máx}}}$ en función de la velocidad de impacto, para cada diámetro de bola. (el resto de parámetros corresponden a los VRP)

ϕ (mm)	V (m/s)	RUGOS. DIN - 4678	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_{ku}	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	$\delta_{\sigma_{\text{máx}}}$ (mm)
0.4	20	N8	4.525	4.895	-1.199	1.558	-701.61	0.1
	40	N8	5.122	5.939	-1.318	1.949	-791.80	0.1
	60	N8	6.054	7.218	-1.249	2.212	-771.24	0.1
	80	N9	7.466	8.899	-1.101	2.267	-768.15	0.1
	100	N9	9.539	11.299	-0.916	2.110	-722.18	0.1
	120	N9	11.876	14.301	-1.035	2.210	-761.59	0.1
0.6	20	N9	6.455	07.010	-1.195	1.525	-769.82	0.1
	40	N9	9.643	11.352	-1.387	2.151	-833.57	0.1

	60	N10	12.568	15.114	-1.390	2.250	-750.89	0.1
	80	N10	17.411	20.513	-1.330	2.179	-775.24	0.1
	100	N10	21.494	25.687	-1.295	2.175	-729.45	0.1
	120	N11	27.297	32.559	-1.315	2.152	-692.70	0.1
0.8	20	N9	9.330	10.328	-1.233	1.646	-767.33	0.1
	40	N10	17.295	19.229	-1.221	1.607	-893.16	0.2
	60	N10	21.411	24.268	-1.242	1.640	-837.82	0.2
	80	N11	27.555	31.203	-1.263	1.721	-868.15	0.2
	100	N11	31.616	37.960	-1.292	1.975	-771.82	0.2
	120	N11	37.236	42.490	-1.273	1.728	-680.78	0.2
1.0	20	N9	12.261	12.851	-1.364	1.873	-758.46	0.1
	40	N10	22.113	24.127	-1.189	1.493	-886.83	0.2
	60	N11	27.296	32.264	-1.232	1.653	-778.01	0.2
	80	N11	33.714	38.270	-1.218	1.648	-646.97	0.2
	100	N11	40.543	45.835	-1.247	1.690	-441.87	0.2
	120	N12	51.008	58.955	-1.235	1.640	-590.84	0.2
1.2	20	N10	14.647	15.699	-1.486	2.414	-593.23	0.1
	40	N10	23.755	25.146	-1.428	2.447	-843.26	0.2
	60	N11	29.609	36.761	-1.472	2.498	-829.22	0.3
	80	N11	34.609	41.759	-1.472	2.498	-812.22	0.3
	100	N11	41.369	46.728	-1.244	1.708	-644.39	0.3
	120	N12	51.037	58.043	-1.292	1.951	-619.95	0.4

Tabla 9 3.- Parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , $\sigma_{m\acute{a}x}$ y $\delta_{\sigma_{m\acute{a}x}}$ en función del diámetro de bola, para cada velocidad de impacto. (98% de cobertura, 90° de ángulo de impacto)

V (m/s)	Ø(mm)	RUGOS. DIN. 4678	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_{ku}	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	$\delta_{\sigma_{m\acute{a}x}}$ (mm)
20	0.4	N8	4.524	4.894	-1.199	1.557	-701.61	0.1
	0.6	N9	6.454	7.010	-1.194	1.525	-769.82	0.1
	0.8	N9	9.329	10.328	-1.233	1.646	-767.33	0.1
	1	N9	12.261	12.850	-1.363	1.873	-758.46	0.1
	1.2	N10	14.646	15.698	-1.486	2.414	-593.23	0.1
40	0.4	N8	5.121	5.939	-1.317	1.948	-791.80	0.1
	0.6	N9	9.642	11.351	-1.387	2.150	-833.57	0.1
	0.8	N10	17.295	19.229	-1.221	1.606	-893.16	0.2
	1	N10	22.116	24.127	-1.189	1.493	-886.83	0.2
	1.2	N10	23.755	25.146	-1.427	2.447	-843.26	0.2
60	0.4	N8	6.053	7.218	-1.249	2.212	-771.24	0.1

	0.6	N10	12.568	15.113	-1.390	2.249	-750.89	0.1
	0.8	N10	21.411	24.267	-1.242	1.640	-837.82	0.2
	1	N11	27.296	32.264	-1.231	1.652	-778.01	0.2
	1.2	N11	29.609	36.760	-1.472	2.498	-829.22	0.3
80	0.4	N9	7.466	8.899	-1.102	2.267	-768.15	0.1
	0.6	N10	17.411	20.513	-1.329	2.179	-775.24	0.1
	0.8	N11	27.555	31.203	-1.264	1.720	-868.15	0.2
	1	N11	33.714	38.269	-1.218	1.648	-646.97	0.2
	1.2	N11	34.609	41.758	-1.472	2.498	-812.22	0.3
100	0.4	N9	9.539	11.299	-0.916	2.109	-722.18	0.1
	0.6	N10	21.494	25.686	-1.295	2.175	-729.45	0.1
	0.8	N11	31.616	37.959	-1.291	1.975	-771.82	0.2
	1	N11	40.542	45.835	-1.246	1.689	-641.87	0.2
	1.2	N11	41.368	46.728	-1.243	1.708	-644.39	0.3
120	0.4	N9	11.876	14.301	-1.035	2.210	-761.59	0.1
	0.6	N11	27.297	32.559	-1.315	2.152	-692.70	0.1
	0.8	N11	37.236	42.490	-1.273	1.728	-680.78	0.2
	1	N12	51.008	58.955	-1.235	1.640	-590.84	0.2
	1.2	N12	51.037	58.043	-1.292	1.951	-619.95	0.4

Las [figuras 9.33 a 9.36](#) muestran la misma información de las tablas 9.2 y 9.3 de manera gráfica. En ellas se ha representado la evolución de los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} en función del diámetro de las bolas (0.4, 0.6, 0.8, 1, y 1.2 mm), para cada velocidad de impacto (20, 40, 60, 80, 100, 120 m/s). En todos los casos, la cobertura es del 98% y el ángulo del impacto de 90°.

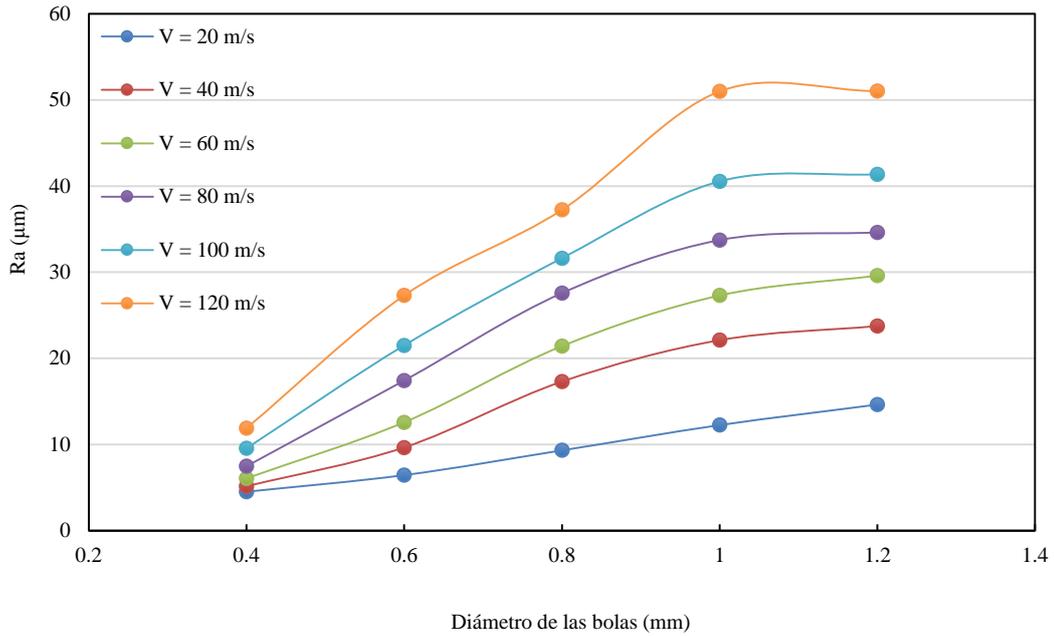


Figura 9.33.- Variación del parámetro de rugosidad R_a con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.

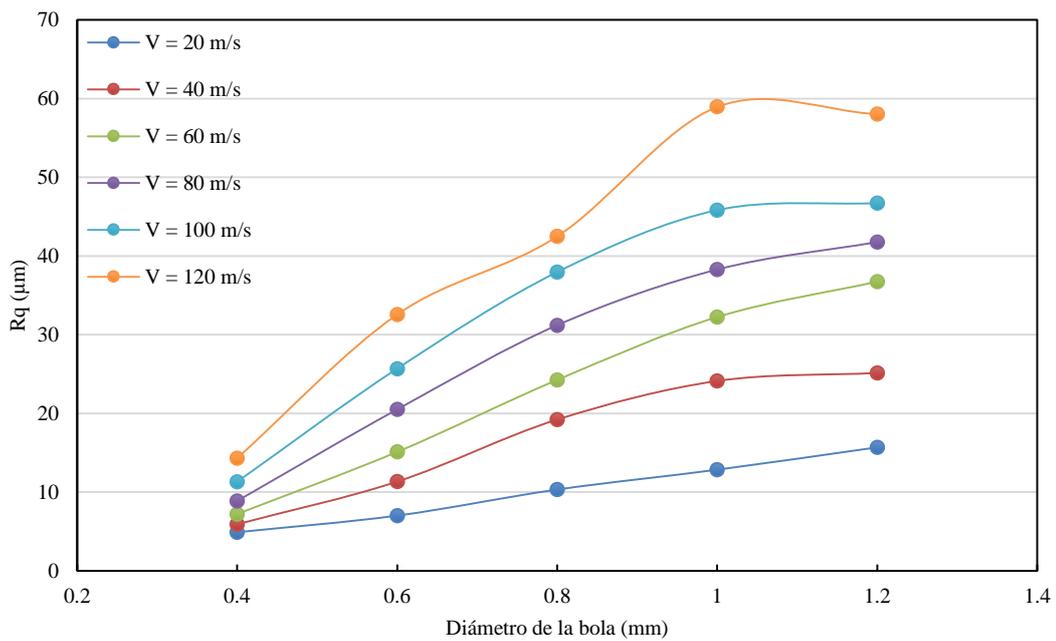


Figura 9 34.- Variación del parámetro de rugosidad R_q con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.

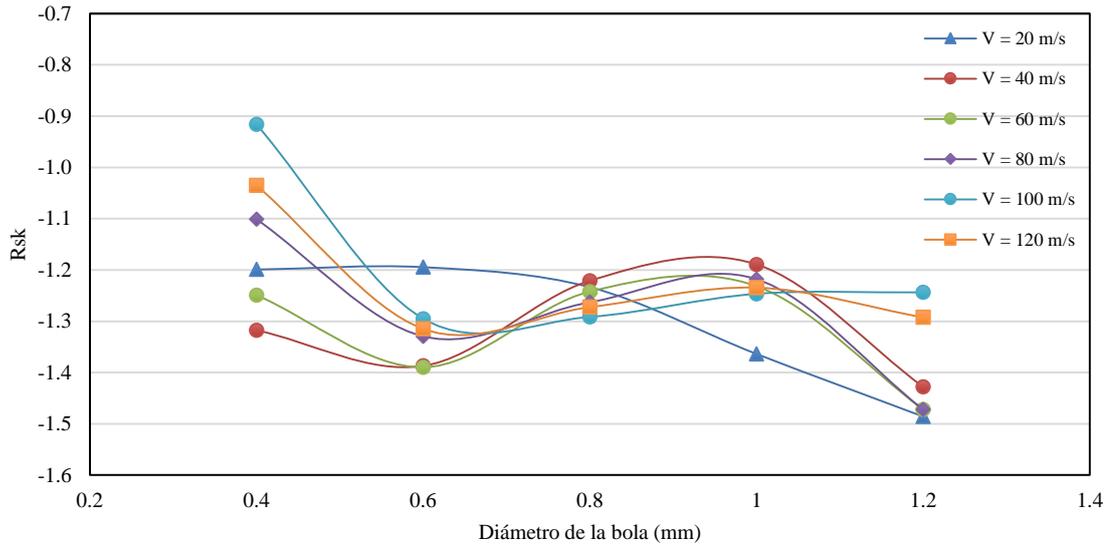


Figura 9.35.- Variación del parámetro de rugosidad R_{sk} con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.

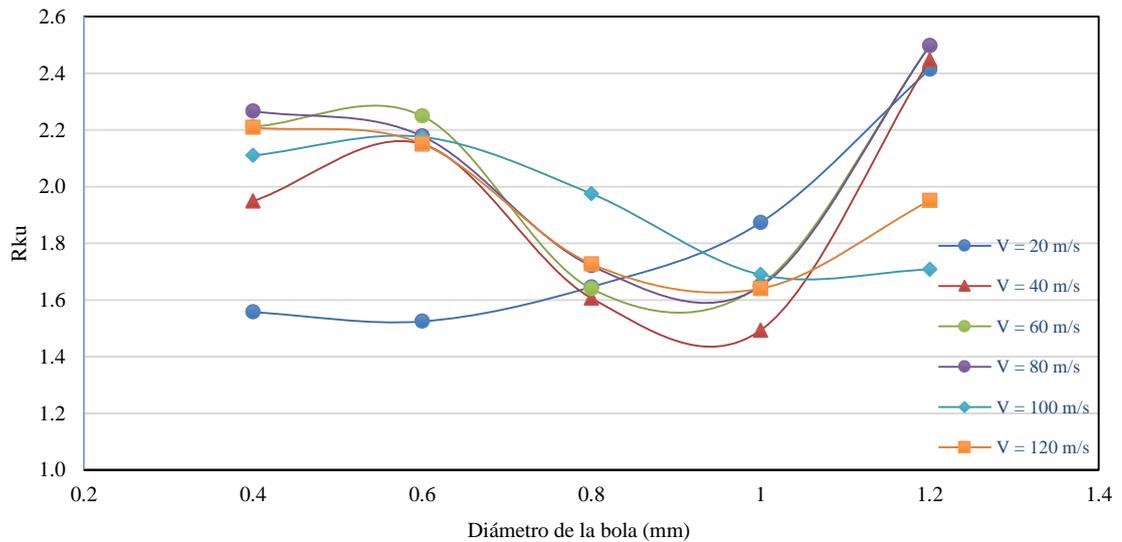


Figura 9.36.- Variación del parámetro de rugosidad R_{ku} con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.

En las figuras 9.33 y 9.34 se observa que, para todas las velocidades de impacto, los parámetros de rugosidad R_a y R_q aumentan de valor al incrementarse el diámetro de las bolas. Sin embargo, a partir de un diámetro de 1 mm de diámetro de bola, la tasa de incremento es menor e incluso, a velocidades de 100 m/s y de 120 m/s, parece que los valores de los parámetros tienden a ser constantes. La misma tendencia de las gráficas de las figuras 9.33 y 34 se observa en las gráficas de las figuras 9.11 y 9.12 donde se representan los parámetros de rugosidad R_a y R_q correspondientes a la huella generada

por una bola al impactar sobre una superficie. Esta relación puede ser muy interesante en trabajos futuros.

Es necesario indicar, que no se ha probado a ejecutar las simulaciones con otros diámetros de bola mayores. La razón estriba en que el modelo diseñado tiene una superficie de impacto de 1 mm x 1 mm, y con bolas de mayor diámetro, la cobertura del 98% se alcanzaría con un reducido número de bolas. Este hecho podría influir en los resultados obtenidos para los parámetros de rugosidad. Para utilizar diámetros mayores, sería necesario redefinir el modelo de simulación numérica incrementando la superficie de impacto. Pero esto implicaría un notable incremento del número de elementos finitos necesarios para mallar esa zona-lo que conllevaría un aumento considerable del tiempo computacional.

En las [figuras 9.35](#) y [9.36](#) se representa la evolución de los parámetros R_{sk} y R_{ku} en función del diámetro de las bolas, para cada velocidad de impacto. Se observa que ambos parámetros evolucionan de la misma manera para todas las velocidades, excepto para 20 m/s en que la forma de la curva es un poco diferente. Según la [figura 9.35](#), para bolas de 0.4 mm de diámetro existe una gran diferencia entre los valores del parámetro R_{sk} para las distintas velocidades de impacto, pero esta diferencia se reduce considerablemente en los demás diámetros de bola estudiados. La tabla 9.4 muestra los valores de los parámetros R_{sk} y R_{ku} para distintas velocidades de impacto, pero específicamente para diámetros de 0.4 y 0.8 mm. En ella se puede observar cómo la diferencia de valores de ambos parámetros para un diámetro de 0.4 mm es mucho más acusada que para un diámetro de 0.8 mm. A medida que aumenta el diámetro de las bolas, la morfología de la superficie se estabiliza, con la aparición de valles amplios y profundos con picos suaves; aunque aumente su profundidad, como indican los parámetros R_a y R_q .

Tabla 9 4.- Valores de R_{sk} y R_{ku} para diámetros de bola de 0.4 mm y de 0.8 mm, con velocidades de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 m/s.

V (m/s)	Ø (mm)	R_{sk}	R_{ku}	V (m/s)	Ø (mm)	R_{sk}	R_{ku}
20	0.4	-1.199	1.557	20	0.8	-1.233	1.646
40	0.4	-1.317	1.948	40	0.8	-1.221	1.606
60	0.4	-1.249	2.212	60	0.8	-1.242	1.640
80	0.4	-1.101	2.267	80	0.8	-1.263	1.720
100	0.4	-0.916	2.109	100	0.8	-1.291	1.975
120	0.4	-1.035	2.210	120	0.8	-1.273	1.728

Por otra parte, las figuras 9.37 a 9.40 muestran la variación de los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} con la velocidad de impacto, para los diferentes diámetros de bola considerados (0.4, 0.6, 0.8, 1.0, y 1.2 mm). En todos los casos, las curvas se refieren a una cobertura del 98% y un ángulo del impacto de 90° .

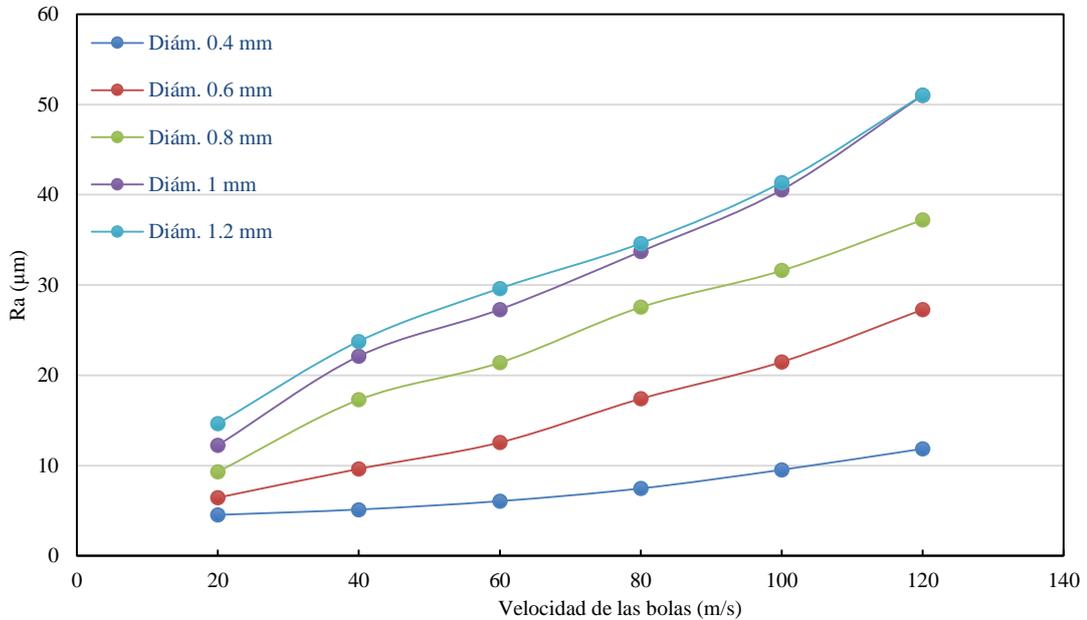


Figura 9.37.- Variación del parámetro de rugosidad R_a con la velocidad de impacto para distintos diámetros de bola.

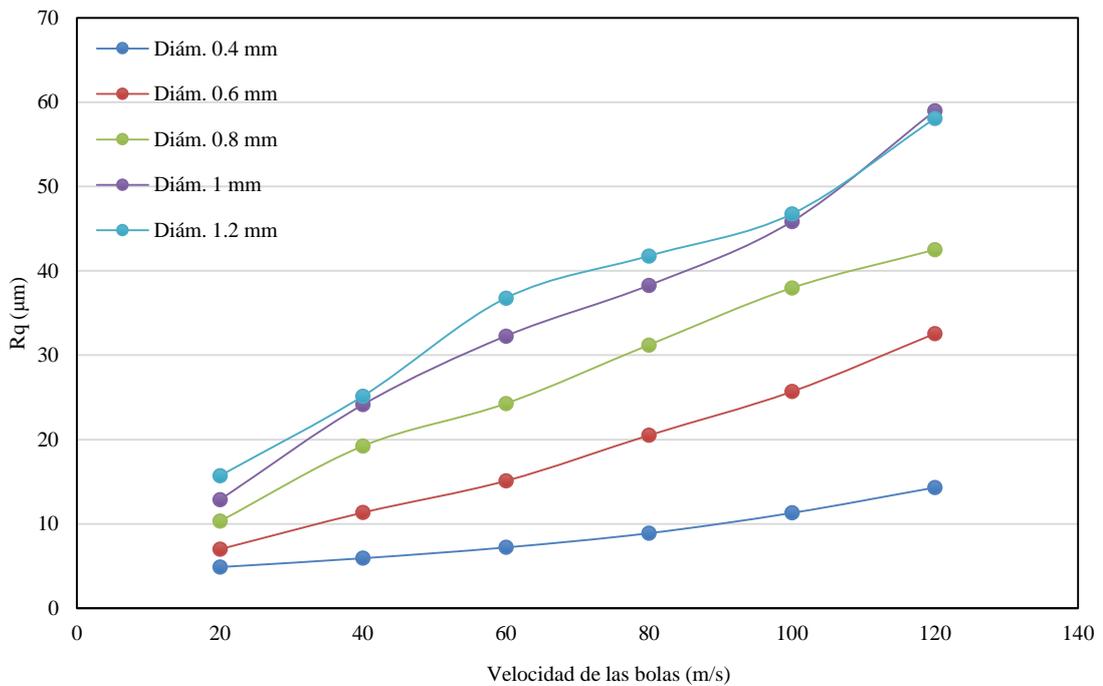


Figura 9.38.- Variación del parámetro de rugosidad R_q para con la velocidad de impacto para distintos diámetros de bola.

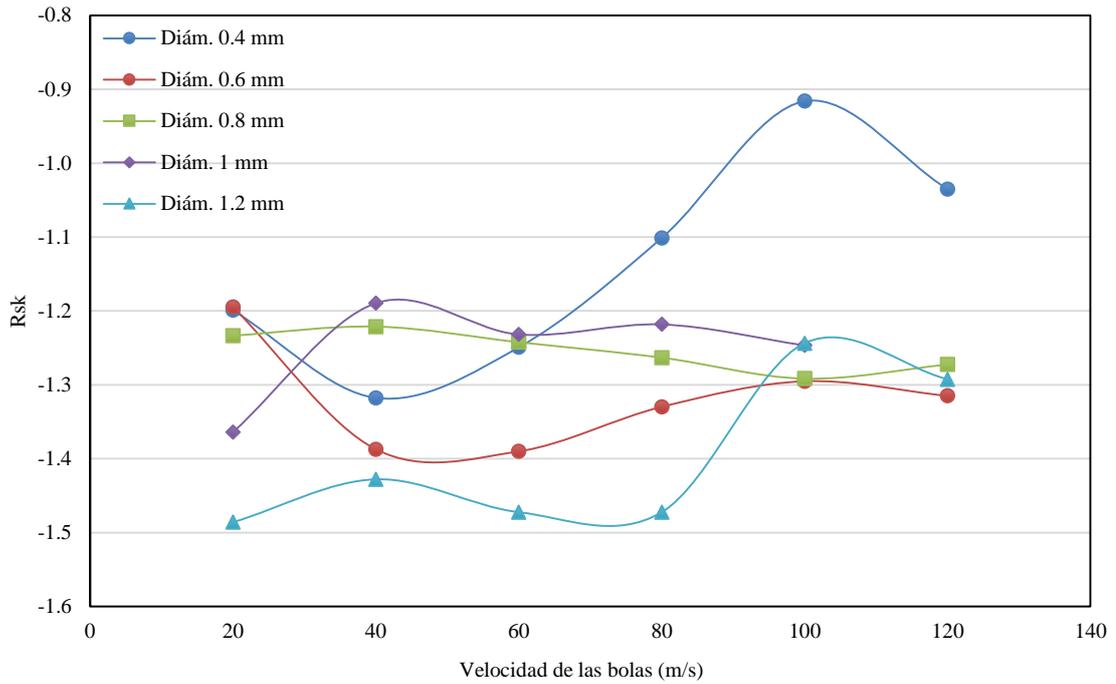


Figura 9.39.- Variación del parámetro de rugosidad R_{sk} con la velocidad de impacto de las bolas para distintos diámetros de bola.

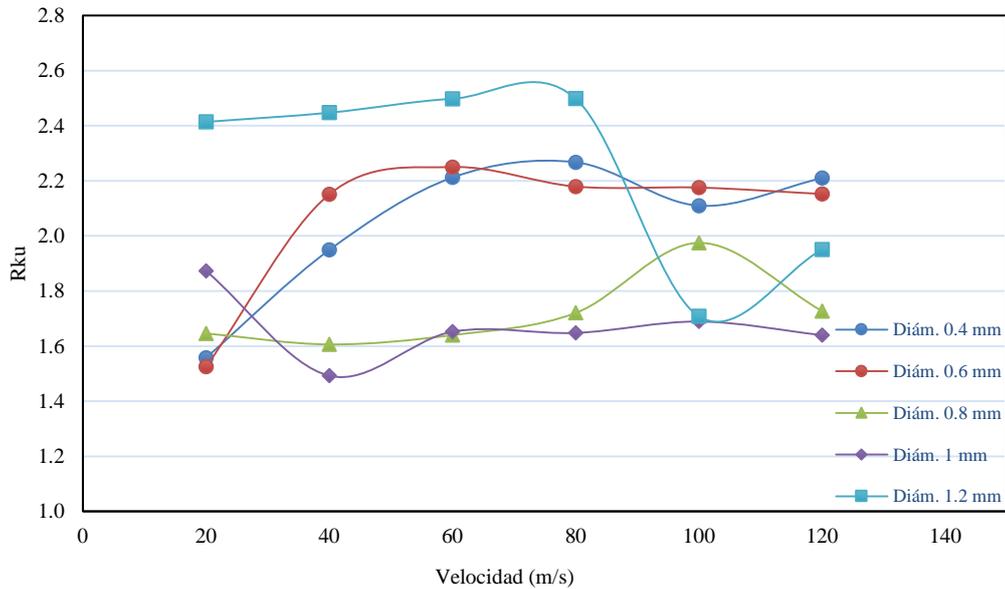


Figura 9.40.- Variación del parámetro de rugosidad R_{ku} con la velocidad de impacto para distintos diámetros de bola.

En las figuras 9.37 y 9.38, donde se representa la evolución de los parámetros R_a y R_q para cada diámetro en función de la velocidad, se observa que dichos parámetros se incrementan a medida que aumenta la velocidad. En este caso, a diferencia de los resultados de las figuras 9.33 y 9.34, los valores de los parámetros siguen creciendo, sin

apreciarse en ellos ningún rasgo de estabilización. La misma tendencia de las gráficas de las figuras 9.37 y 38 se observa en las gráficas de las figuras 9.9 y 9.10 donde se representan los parámetros de rugosidad R_a y R_q correspondientes a la huella generada por una bola al impactar sobre una superficie. Esta similitud puede ser muy interesante en trabajos futuros.

Para cada diámetro, se aprecia una tendencia de las curvas casi lineal, que se puede aproximar bien por un ajuste del tipo $y = a x + b$. En la tabla 9.5 se recopilan las ecuaciones de las rectas de ajuste, calculadas por mínimos cuadrados, que mejor aproximan la variación de los parámetros R_a y R_q con la velocidad.

Tabla 9 5.- Ecuaciones aproximadas para la determinación de los parámetros de rugosidad R_a y R_q en función de la velocidad. (v en m/s y R_a - R_q en μm).

\varnothing (mm)	R_a	R^2 (F. Correlación)	R_q	R^2 (F. Correlación)
0.4	$R_a = 0.07 \cdot V + 2.3$	0.945	$R_q = 0.01 \cdot V + 2.3$	0.961
0.6	$R_a = 0.20 \cdot V + 1.3$	0.986	$R_q = 0.25 \cdot V + 1.1$	0.990
0.8	$R_a = 0.27 \cdot V + 5.2$	0.991	$R_q = 0.32 \cdot V + 5.2$	0.993
1	$R_a = 0.36 \cdot V + 5.6$	0.989	$R_q = 0.43 \cdot V + 5.2$	0.987
1.2	$R_a = 0.34 \cdot V + 8.5$	0.989	$R_q = 0.40 \cdot V + 9.2$	0.981

Estas expresiones permiten obtener valores muy aproximados de R_a y R_q para cualquier velocidad, dentro del intervalo comprendido entre 20 y 120 m/s. Por ejemplo, para un velocidad de 50 m/s y un diámetro de bola de 0.6 mm, el valor de los parámetros sería: $R_a = 11.35 \mu\text{m}$ y de $R_q = 14.1 \mu\text{m}$.

En la figura 9.39 se observa que los valores del parámetro R_{sk} se mantienen dentro del rango comprendido entre -1.2 y -1.5, excepto para un diámetro de bola de 0.4 mm, en que se sale de este intervalo con velocidades entre 80 m/s y 120 m/s. A partir de 100 m/s, los valores de R_a son muy parecidos, independientemente del diámetro de bola considerado, si exceptuamos, claro está, el valor $D=0.4$ mm. Todos los valores de este parámetro son negativos, lo que indica que en la topografía de la superficie domina el valle amplio y profundo con los picos suaves.

El parámetro R_{ku} representado en la figura 9.40 también se mantiene en un rango comprendido entre 1.5 y 2.5 para velocidades entre 20 y 80 m/s. A partir de esta velocidad, parece que las curvas se aproximan, de forma que el rango se reduce a valores

comprendidos entre 1.75 y 2.2. Este parámetro, siempre positivo, tiene valores inferiores a 3, lo que indica que dominan valles y picos amplios. Este efecto en la topografía de la superficie es habitual después de haber sufrido un proceso de SP, como se ha venido comentando desde el principio de este capítulo.

9.5.- Superficies con rugosidad previa.

Desde que se inició el presente trabajo, surgió la cuestión de si la existencia de una rugosidad previa podría influir en las características de la superficie resultante, tanto en lo que se refiere a las tensiones residuales como a la rugosidad.

Al estudiar la literatura publicada sobre el tema, sólo se ha encontrado un trabajo en el que, de forma teórica y experimental, se tiene en cuenta la rugosidad superficial previa al proceso de SP (TARO ET AL., 2015). El proceso de SP en dicho trabajo se realiza a velocidades inferiores a 7 m/s, para diferentes grados de cobertura.

Por ello, siguiendo con el objetivo de profundizar en el acabado superficial que proporciona un proceso de SP, se planteó la posibilidad de generar modelos numéricos con diferentes grados de rugosidad inicial, y estudiar la influencia que pudiera tener en las características de la superficie resultante del proceso de SP

9.5.1.- Generación de una superficie rugosa

Todos los procesos de fabricación necesitan ser terminados con un acabado superficial concreto, establecido por una norma, por un criterio de calidad en la fabricación o por una exigencia de un cliente.

La normativa DIN 4769 establece una clasificación en niveles de rugosidad, a los cuales se le asigna un valor de R_a , como muestra la tabla 9.5.

Tabla 9 6.- Niveles de rugosidad en función de R_a , según la normativa DIN-4769

R_a (μm)	Grado de rugosidad
50	N12
25	N11
12.5	N10
6.3	N9
3.2	N8
1.6	N7
0.8	N6
0.4	N5
0.2	N4
0.1	N3

0.05	N2
0.025	N1

La normativa española UNE-EN-ISO 1302:2002 establece también unas indicaciones de la calidad superficial en función del proceso de fabricación (tabla 9.2).

Tabla 9 7.- Criterios de rugosidad en el acabado superficial. UNE-EN-ISO 1302:2002

Proceso de fabricación	Valor de Rugosidad (Ra) (µm)	Nº de calidad
Pulido.	0.025	N1
Laminado, trefilado, pulido.	0.05	N2
	0.1	N3
Laminado, trefilado.	0.2	N4
	0.4	N5
Forja, laminado, trefilado.	0.8	N6
	1.6	N7
Forja, fundición.	3.2	N8
Forja, laminado en cal.,	6.3	N9
Laminado en caliente, fundición.	12.5	N10
	25	N11
	50	N12

Para modificar la superficie inicial, con el fin de dotarla de una rugosidad previa, se ha desarrollado un pequeño programa en Matlab (MATLAB, 2010) mediante el cual se genera de forma aleatoria el valor de la coordenada Y de los nodos de la malla situados dentro de la superficie de impacto. Con esas nuevas coordenadas, se determinan los parámetros R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , de la superficie rugosa así obtenida.

Las nuevas coordenadas se incorporan a un fichero de entrada de Abaqus®, para que éste realice el análisis del proceso de SP partiendo de dicha superficie (CHEN ET AL, 2013).

Hay que indicar que esta modificación en la simulación numérica no se realiza sobre el sólido (*part*), sino sobre la malla. En la zona de impacto, la malla está formada por elementos finitos C3D8R de Abaqus®, que tienen forma cúbica con dimensiones $11.9 \times 11.9 \times 11.9 \mu\text{m}^3$. Como la máxima modificación permitida es un tercio de cualquiera de sus dimensiones (CHEN ET AL, 2013), el mayor cambio que se puede realizar en un elemento en esta malla es de $3.96 \mu\text{m}$.

Se ha generado un primera superficie rugosa mediante este procedimiento con un valor $R_a = 3.02 \mu\text{m}$. Esta superficie, según los criterios de la norma DIN 4769, corresponde con un grado de rugosidad N8, y según la norma UNE-EN-ISO 130:2002 podría corresponder

con un acabado propio de una forja o de una fundición. En la [figura 9.25](#) se puede ver la topografía de esta superficie.

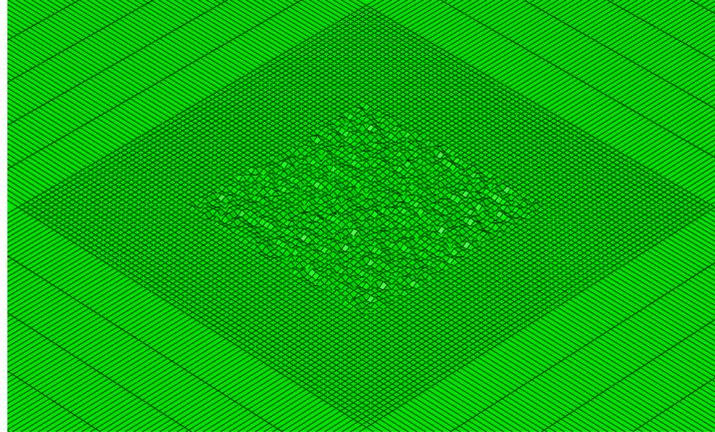


Figura 9 41.- Imagen de la superficie rugosa desarrollada para el modelo 3D sobre la malla. $R_a = 3.02\mu\text{m}$.

9.5.2.- Tensiones residuales

Se ha repetido la simulación con los valores de referencia de las variables del proceso de SP (valores VRP), pero partiendo del modelo de superficie rugosa descrito en el apartado anterior. Para calcular el valor de las tensiones residuales resultantes, se ha seguido el proceso expuesto en el apartado 8.2. El resultado se muestra en la [figura 9.38](#), en la que también se ha representado la distribución de tensiones residuales que se obtiene partiendo de una superficie lisa, con objeto de compararlas.

Se observa que las dos gráficas son muy similares, con la salvedad de que existe una diferencia de un 25.5% a 0.05 mm de profundidad, entre la superficie inicialmente rugosa y la lisa.

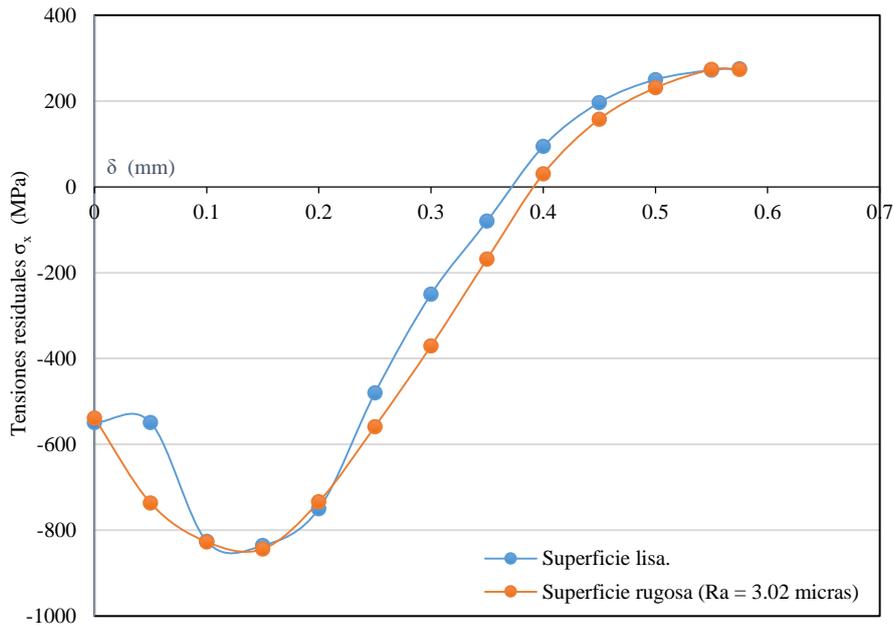


Figura 9 42.- Tensiones residuales S11 para el modelo 3D sin rugosidad y con una rugosidad $R_a = 3.02 \mu\text{m}$)

9.5.3.- Parámetros de rugosidad.

En cuanto a la influencia de la rugosidad previa en la morfología de la superficie resultante, se ha realizado un estudio ejecutando simulaciones numéricas con los valores de referencia (VRP) para distintas coberturas (50%, 98%, 150% y 200%), partiendo de la superficie rugosa descrita en el apartado 9.5.1. En las figuras 9.39 a 9.43 se muestran los parámetros de rugosidad de la superficie resultante, junto con los que se obtienen partiendo de una superficie lisa.

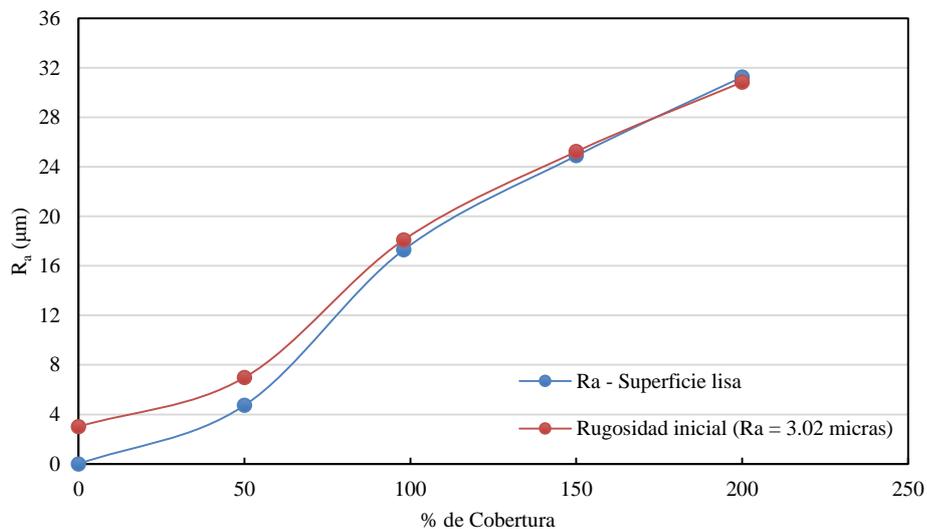


Figura 9 43.- Evolución del parámetro de rugosidad R_a en función del grado de cobertura. Comparación de resultados partiendo de superficies inicialmente lisa y rugosa ($R_a = 3.02\mu m$).

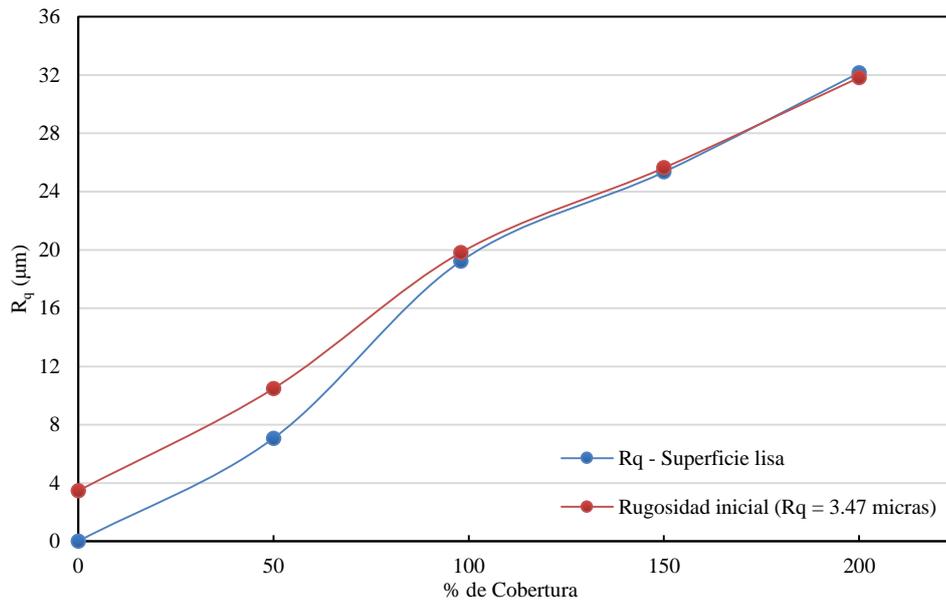
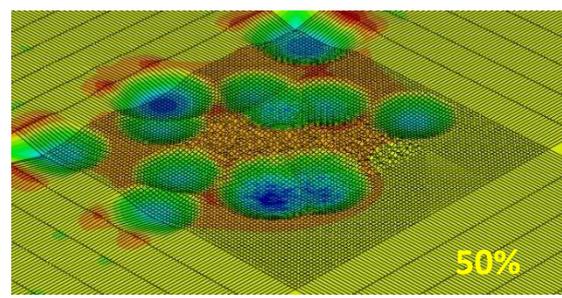
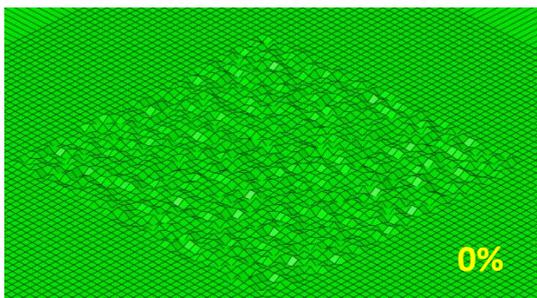


Figura 9 44.- Evolución del parámetro de rugosidad R_q en función del grado de cobertura. Comparación de resultados partiendo de superficies inicialmente lisa y rugosa ($R_a = 3.02\mu m$).

Como se puede observar en las figuras 9.39 y 9.40 los valores de los parámetros R_a y R_q presentan una evolución con la cobertura muy parecida. Con un 50% de cobertura existen diferencias entre los valores de los parámetros R_a y R_q de las superficies resultantes, según que procedan de una superficie inicialmente lisa o rugosa.

Sin embargo, a partir del 98% de cobertura, los valores de los parámetros son prácticamente idénticos para las superficies lisa y la rugosa. Este resultado indica que el impacto de las bolas sobre la superficie genera una deformación tal que elimina la rugosidad inicial, de manera que esta no influye en los parámetros de rugosidad después de haber sido tratada con el proceso de SP. En la figura 9.41 se puede ver cómo cambia la superficie inicialmente rugosa (0% de cobertura) tras el proceso de SP, para varios grados de cobertura.



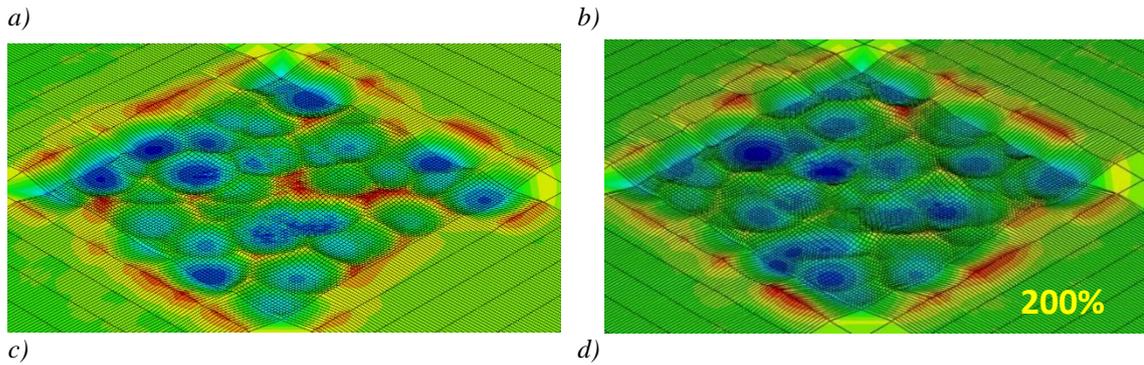


Figura 9 45.- Imágenes de la evolución de la rugosidad de la superficie, inicialmente rugosa, con diferentes grados de cobertura

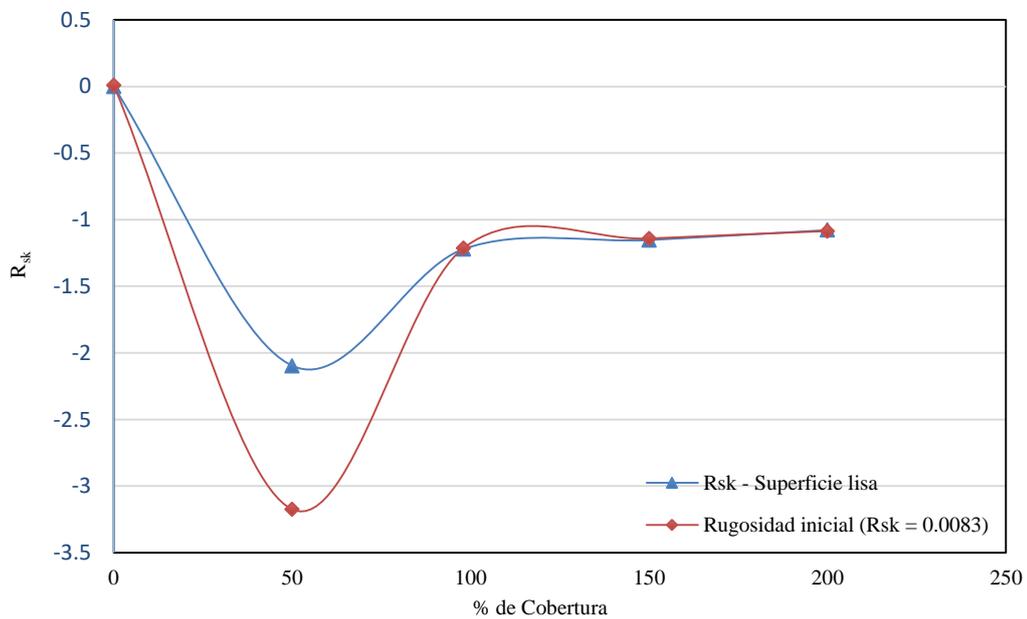


Figura 9 46.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la cobertura para superficie inicial lisa y rugosa

En cuanto al parámetro de asimetría R_{sk} , en la [figura 9.42](#) se observa que tiene aproximadamente el mismo valor, independientemente de que se parta de superficie lisa o rugosa, para todos los porcentajes de cobertura salvo cuando este, 50%, está lejos del de la cobertura total. Lo mismo sucedía con R_a y R_q . Por tanto, para coberturas iguales o superiores al 98%, el proceso de SP elimina la rugosidad inicial. O lo que es lo mismo la nueva rugosidad no se ve afectada por la inicial.

El parámetro R_{sk} tiene un valor negativo en todo el rango de la cobertura, lo que indica que después del proceso de SP hay valles profundos y picos suaves. A la vez, el valor del parámetro toma valores más pequeños (en valor absoluto) conforme crece la cobertura, lo que significa que, aunque en conjunto la profundidad de las deformaciones sea mayor,

ésta va tendiendo a ser más suave, lo que se traduce en una menor diferencia entre picos y valles.

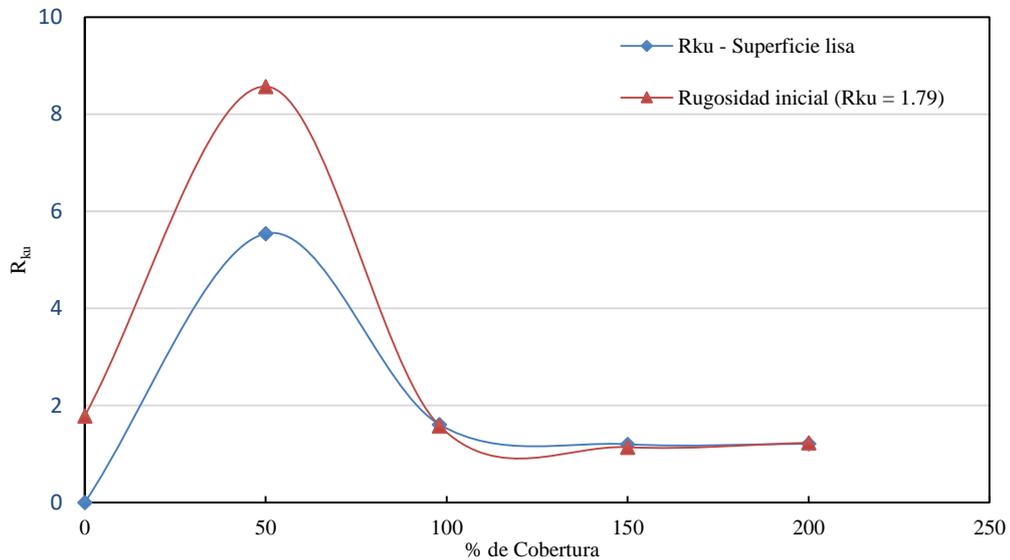


Figura 9 47.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la cobertura para superficie inicial lisa y rugosa

La superficie rugosa inicial tiene un parámetro R_{ku} de 1.79, el cual crece bruscamente hasta un valor de 9 al 50% de cobertura. El hecho de que el valor de R_{ku} sea superior a 3 para este porcentaje de cobertura indica la presencia de picos altos y cercanos entre sí. En este elevado valor de R_{ku} se encuentra una diferencia entre la superficie impactada y la no impactada inicialmente. Posteriormente, a partir del 98% de cobertura, el parámetro toma valores inferiores a tres, lo que indica que los valles y los picos son más amplios, y la superficie va haciéndose más profunda y suave.

Finalmente, la [figura 9.44](#) muestra los perfiles 2D del eje Z para distintos grados de cobertura.

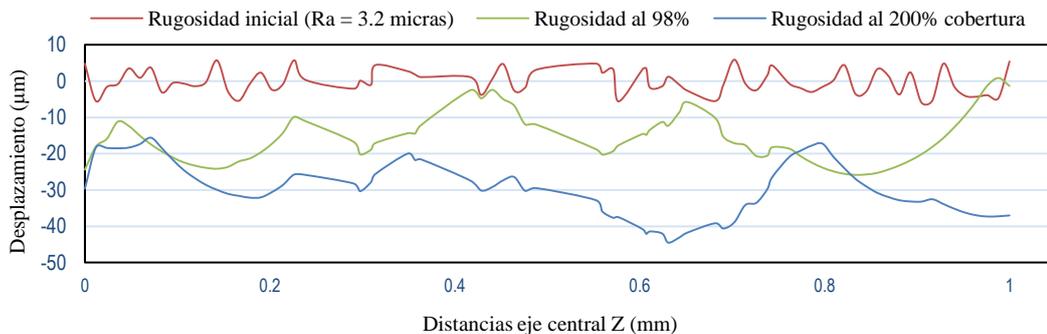


Figura 9 48.- Perfil 2D que muestra la variación de la rugosidad en función del grado de cobertura.

Se observa que el perfil de rugosidad inicial presenta picos y valles muy similares entre sí, por lo que el valor de R_{sk} es prácticamente cero y el valor de R_{ku} es un número inferior a tres, con los picos y valles muy próximos. Con el incremento de la cobertura, se suaviza el contorno de la superficie y dominan los valles frente a los picos; por eso el valor de R_{sk} se hace negativo. Por su parte, el valor de R_{ku} inicial de 1.79 se debe a que los picos y los valle están, en la superficie inicial, bastantes juntos. A medida que aumenta la cobertura, los picos y los valles se ensanchan y son más profundos, lo que se traduce en una disminución progresiva de R_{ku} .

9.5.4.- Mayores velocidades de impacto.

Una vez que se ha llegado a la conclusión de que con una velocidad de impacto de 40 m/s el resultado del proceso de SP es el mismo, independientemente de que la superficie inicial sea lisa o tenga una rugosidad de 3,2 μm , se han realizado otras simulaciones con mayores velocidades de impacto, pero partiendo de la misma superficie inicial, es decir, con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$. En la [figura 9.45](#) a [9.49](#) se muestran los resultados con una velocidad de impacto de 100 m/s.

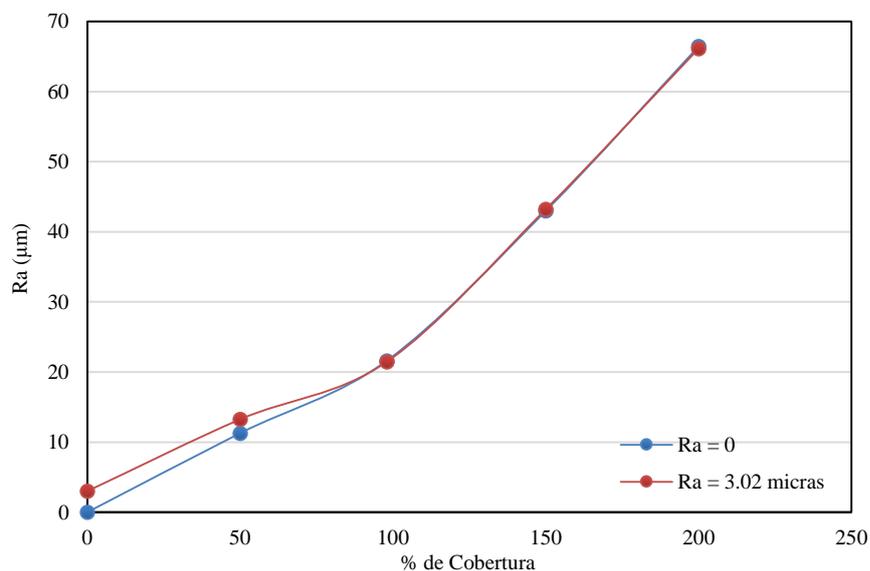


Figura 9 49.- Gráfica con la variación del parámetro R_a en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.

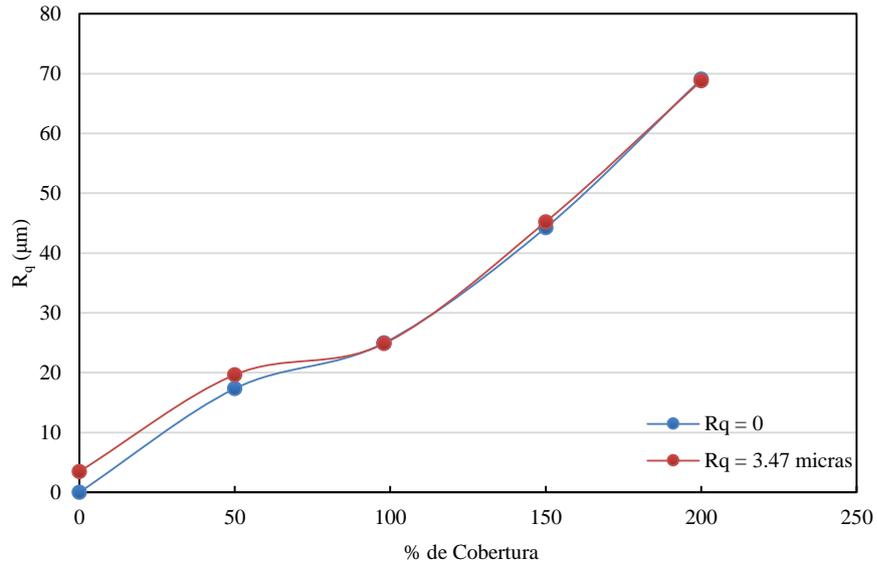


Figura 9.50.- Gráfica con la variación del parámetro R_q en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.

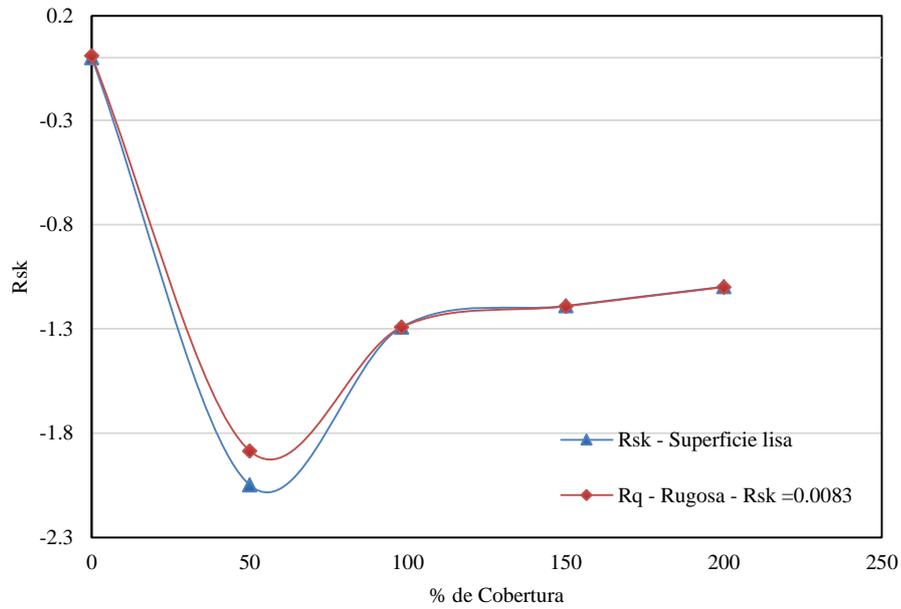


Figura 9.51.- Gráfica con la variación del parámetro R_{sk} en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.

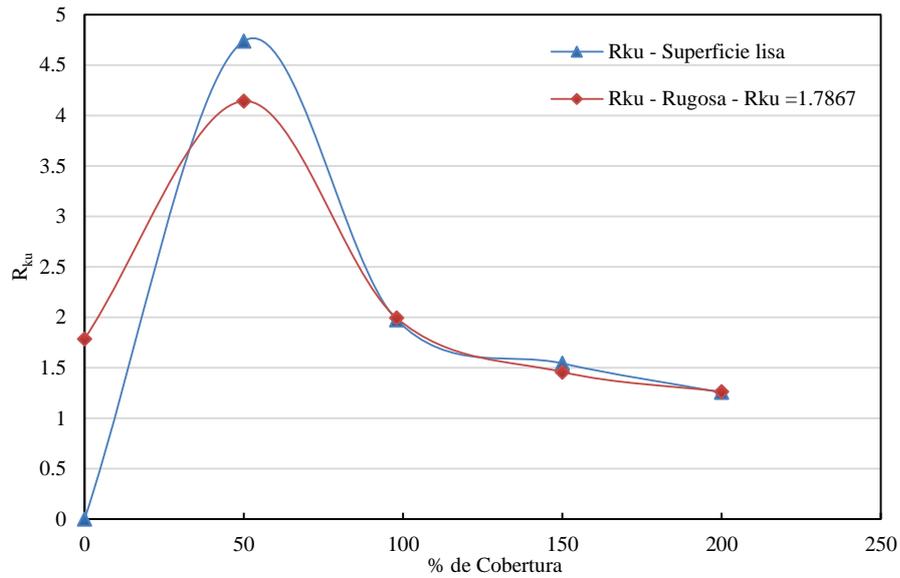


Figura 9.52.- Gráfica con la variación del parámetro R_{ku} en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.

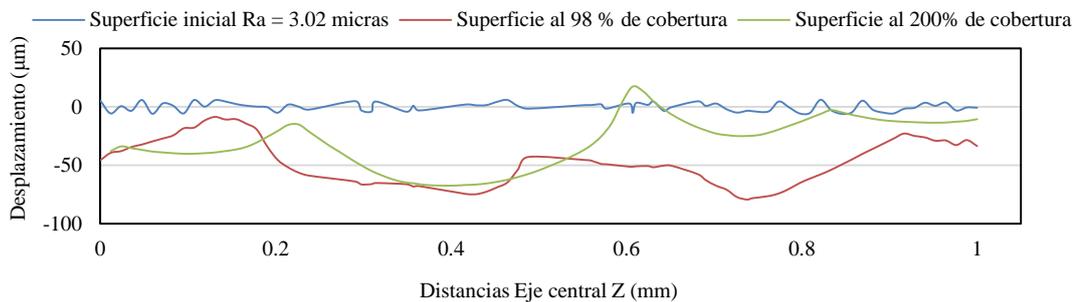


Figura 9.53.- Perfil 2D que muestra la variación de la rugosidad en función del grado de cobertura.

En las gráficas de las figuras 9.45 a 9.49 se observa que, utilizando coberturas iguales o superiores al 98%, ninguno de los cuatro parámetros de rugosidad distingue que se parta de una superficie lisa o rugosa, pues tienen un valor prácticamente idéntico en ambas situaciones. El impacto de las bolas sobre la superficie genera una deformación tal que elimina la rugosidad inicial. La pequeña separación que presentan las curvas en 50% de cobertura se debe a las diferencias en la superficie de la muestra entre las zonas impactadas y las que no. Por tanto, para esta velocidad de impacto, la situación es similar a la descrita en el apartado 9.5.3.

El parámetro de asimetría R_{sk} es negativo (también igual que en 9.5.3), sufriendo una disminución en valor absoluto a medida que se incrementa la cobertura de la superficie,

indicando el predominio de valles profundos y picos suaves. En todo el rango de cobertura, el parámetro R_{ku} es inferior a tres, sufriendo una disminución con el aumento de la cobertura. Corresponde al hecho de que los valles y los picos van siendo más amplios a medida que aumenta el número de impactos sobre la superficie.

En los perfiles 2D de la rugosidad sobre el eje Z, representados en la parte inferior de la [figura 9.49](#), se observa el crecimiento en profundidad y amplitud de los valles con la cobertura, a la vez que desaparecen en su totalidad los rasgos de la rugosidad inicial de la superficie.

9.5.5.- Superficie inicial con mayor rugosidad.

Se han repetido las simulaciones numéricas partiendo de superficies con una mayor rugosidad previa.

Para generar dichas superficies, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 9.5.1, se modifica de forma aleatoria la coordenada Y de todos los nodos de la malla de elementos finitos situados en la superficie de impacto. Como el programa Abaqus® limita tal variación a un tercio de las dimensiones de los elementos (que, de acuerdo con la descripción del modelo realizado en el apartado 6.6, se trata de paralelepípedos de $11.9 \times 11.9 \times 11.9 \mu\text{m}^3$), y ahora se pretende una variación mayor para conseguir mayor rugosidad, fue preciso modificar la malla para tener elementos finitos mayores. Concretamente, se utilizaron elementos C3D8R de $19.2 \times 19.2 \times 19.2 \mu\text{m}^3$, de manera que así, la máxima variación aleatoria de la coordenada Y que puede alcanzarse es de $6.4 \mu\text{m}$.

Con este mayor margen, se generó una nueva superficie rugosa, que está representada en la [figura 9.50](#). El cálculo de la altura media aritmética, según la ecuación (9.2), considerando todos los puntos de la superficie, lleva a un valor de $R_a = 10.02 \mu\text{m}$, más del triple que en la superficie del apartado anterior. Podría corresponder, según las tablas 9.5, con un grado de rugosidad de N10 y, según la tabla 9.6, con la rugosidad de un laminado en caliente o de una fundición. En general, son acabados bastos resultantes de procesos de fabricación sobre los que todavía no se ha realizado un mecanizado.

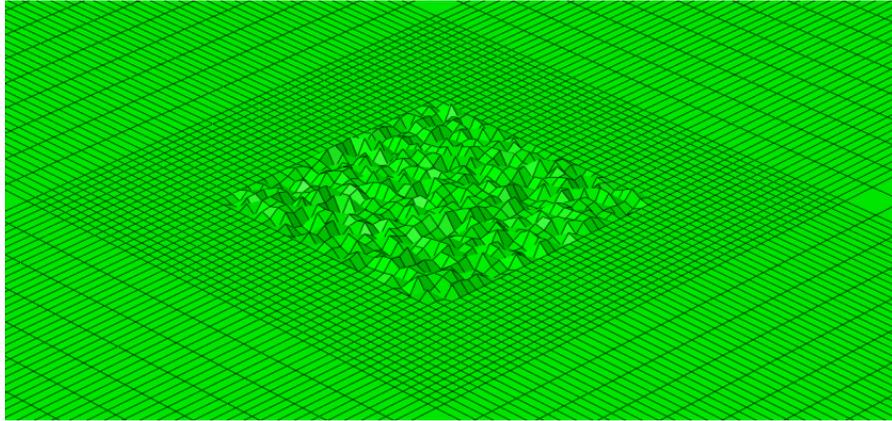


Figura 9.54.- Imagen del modelo de superficie rugosa con un $R_a = 10.02 \mu\text{m}$.

Utilizando la superficie de impacto con la nueva rugosidad, se ha ejecutado la simulación numérica, con objeto de obtener los desplazamientos de los nodos necesarios para calcular los parámetros de rugosidad de la superficie resultante. Las variables del proceso de SP han sido las de referencia (VRP) para una velocidad de impacto de 20 m/s. Se ha realizado la comparación partiendo de una superficie lisa y de una superficie rugosa para distintos grados de cobertura.

El cambio de malla puede producir modificaciones en los resultados, por lo que es necesario realizar una comprobación, para la nueva malla, del grado de convergencia de los mismos. Al realizar el estudio se aprecian cambios poco significativos tanto en los valores de la tensión residual como de los parámetros de rugosidad

En las figuras 9.52 a 9.56 se observa que los valores de todos los parámetros siguen la misma tendencia que en las gráficas que muestran las figuras 9.39 a 9.43 del apartado 9.5.3 (con velocidad de impacto de 40 m/s), y de la figura 9.45 a 9.49 (con velocidad de impacto de 100 m/s); aunque ahora la separación entre las curvas en el punto inicial del proceso (cobertura cero) es superior, debido a la mayor rugosidad previa de la superficie.

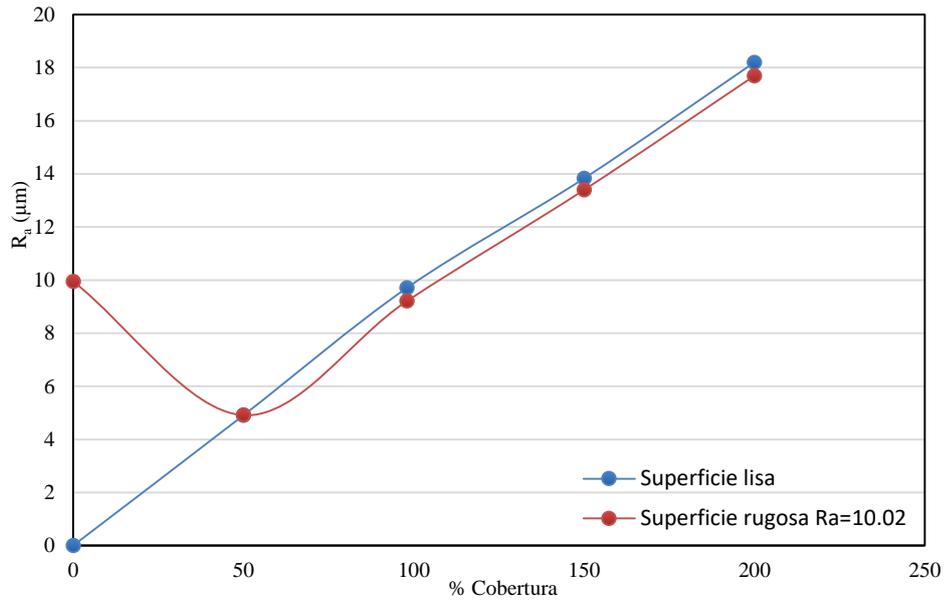


Figura 9.55.- Evolución del parámetro de rugosidad R_a en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_a = 10.02\mu\text{m}$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s

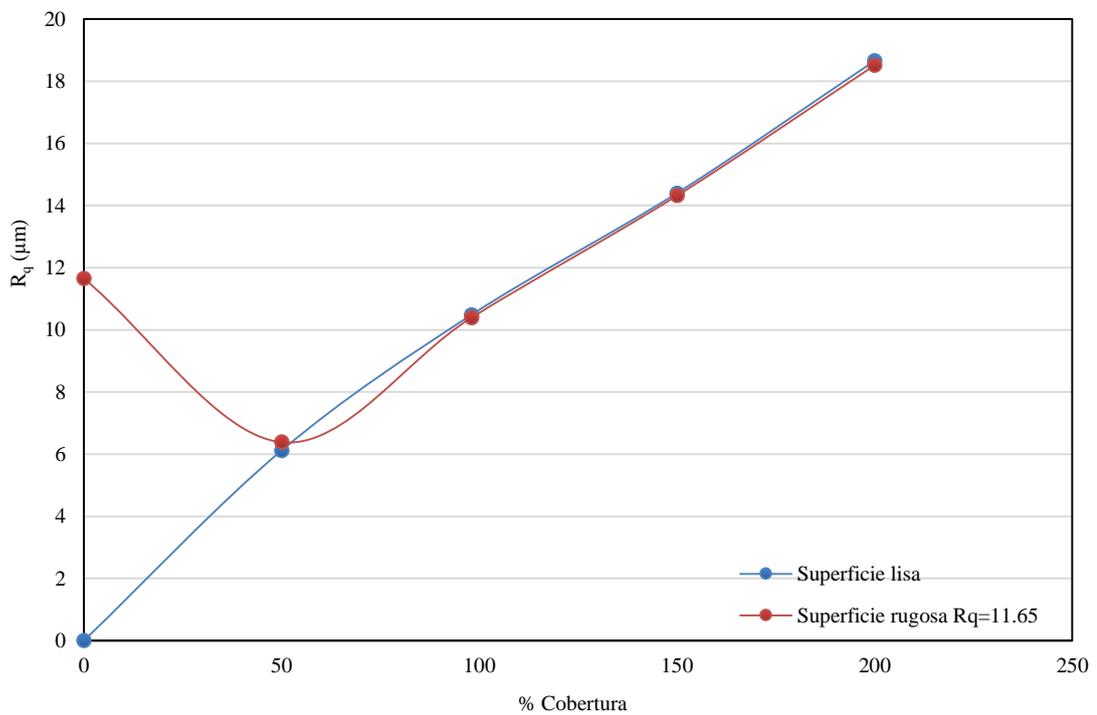


Figura 9.56.- Evolución del parámetro de rugosidad R_q en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_q = 11.65 \mu\text{m}$ tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s

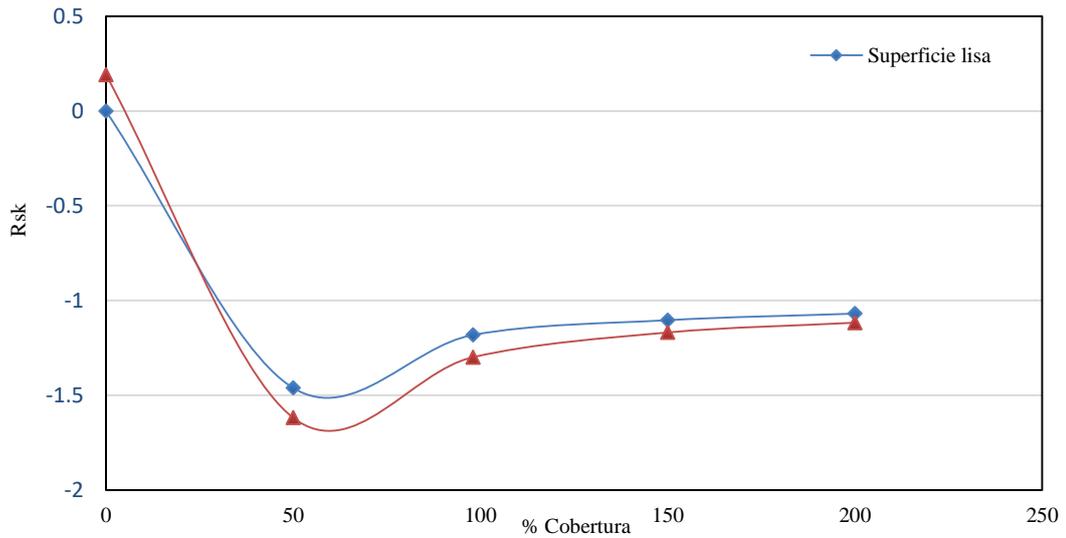


Figura 9.57.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{sk} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{sk} = 0.191$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s

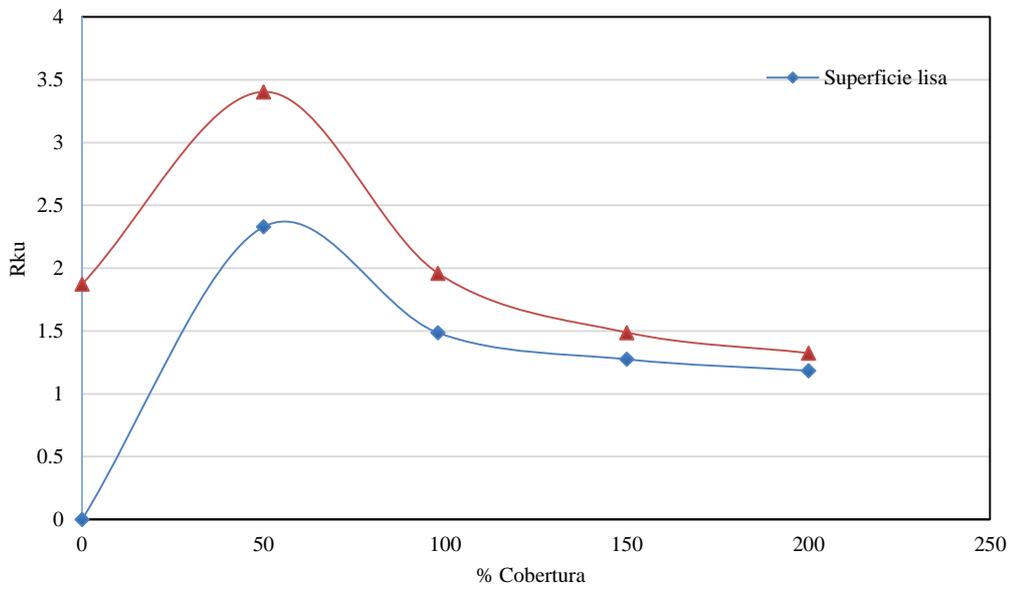


Figura 9.58.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{ku} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{ku} = 1.872$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s .

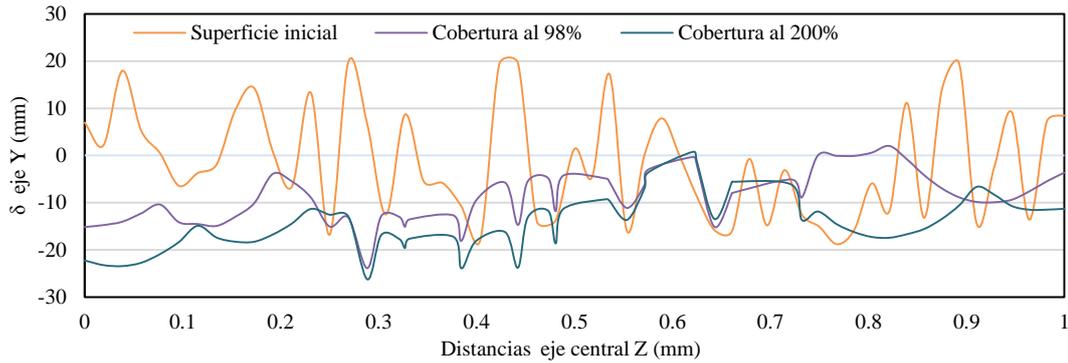


Figura 9.59.- Perfil 2D que muestra la variación de la rugosidad en función del grado de cobertura.

Los parámetros de rugosidad R_a y R_q tienen una tendencia similar. De la misma forma que en los casos anteriores, si se utilizan coberturas superiores al 50%, las curvas de variación correspondientes a las superficies iniciales lisa o rugosa prácticamente coinciden. Esto indica que, salvo para una cobertura inferior al 50%, a partir de una rugosidad inicial, con $R_a = 10.02 \mu\text{m}$, la superficie tratada acaba siendo caracterizada por un valor de R_a idéntico al que se obtiene a partir de una superficie lisa.

El parámetro R_{sk} parte de un valor prácticamente cero, lo que indica que inicialmente la superficie presenta, bajo las condiciones de rugosidad impuestas, una simetría entre picos y valles. El parámetro toma un valor negativo, al 50% de cobertura, hecho que indica, como ya hemos comentado, que se produce un incremento de los valles frente a los picos existentes. A medida que la cobertura va aumentando, la profundidad de toda la zona de impacto va creciendo, pero los valles y los picos se suavizan, originando que el valor de R_{sk} sea pequeño en valor absoluto.

El parámetro R_{ku} presenta al 50% de cobertura un valor por encima de 3, lo indica que los picos y los valles no son amplios, sino más bien estrechos. A medida que aumenta la cobertura, y se solapan los impactos en la superficie, se produce una disminución del valor de R_{ku} . En consecuencia, los valles y los picos se ensanchan (figura 9.54).

Los perfiles 2D representados en la figura 9.56 muestran la evolución de la rugosidad de la superficie, desde un 0% hasta un 200% de cobertura.

En conclusión, con una velocidad de impacto de 20 m/s, la rugosidad resultante del proceso de SP no se ve alterado por la presencia de una superficie rugosa inicial con un $R_a = 10.02 \mu\text{m}$.

Con objeto de profundizar más en el trabajo, se han realizado una serie de nuevas simulaciones considerando una superficie de impacto con mayor rugosidad. Por la razón expuesta en el caso anterior, de nuevo ha sido necesario modificar la malla en la zona de impacto, pasando de elementos finitos C3D8R de $11.9 \times 11.9 \times 11.9 \mu\text{m}^3$ a $39.4 \times 39.4 \times 39.4 \mu\text{m}^3$, para así poder variar las coordenadas de sus nodos hasta un máximo de $13.6 \mu\text{m}$ (un tercio de la dimensión del elemento). Se modificó de manera aleatoria la coordenada Y de los nodos de la superficie de impacto, resultando la superficie representada en la [figura 9.57](#).

El cálculo de la altura media aritmética, según la ecuación (9.2), considerando todos los puntos de la superficie de impacto, proporcionó un valor de $R_a = 19.94 \mu\text{m}$. Esta rugosidad media podría corresponder, según las tablas 9.5, con un grado de rugosidad de N11 y, según la tabla 9.6, con la rugosidad de un laminado en caliente o de una fundición. En general son acabados bastos resultantes de procesos de fabricación sobre los que todavía no ha intervenido ningún mecanizado.

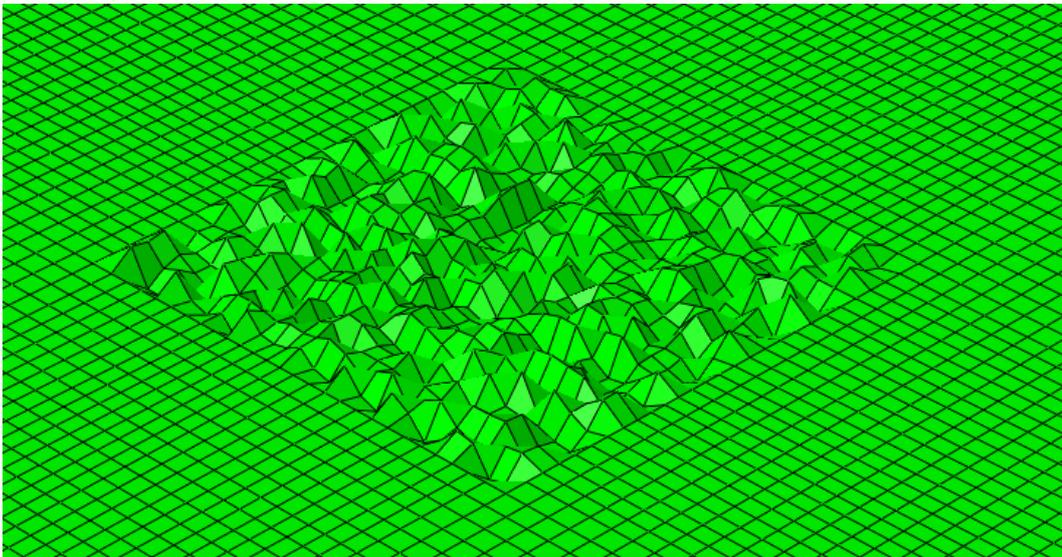


Figura 9.60.- Imagen de la rugosidad en la zona de impacto para $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, $R_q = 23.04 \mu\text{m}$, $R_{sk} = 0.075$ y $R_{ku} = 1.79$.

Se volvieron a realizar simulaciones numéricas con el modelo 3D, partiendo de la superficie con esta mayor rugosidad previa, usando los parámetros de referencia VRP, para diferentes grados de cobertura, con distintas velocidades de impacto. Se presentan

los resultados correspondientes con la velocidad de 40 m/s, los cuales se pueden ver en las figuras 9.59 y 9.63, en que se comparan con los obtenidos en cada caso aplicando el procedimiento a una superficie lisa.

Debido al cambio de malla, es necesario realizar un estudio de convergencia de los resultados. Para lo cual se ha realizado una prueba en la que se ha comprobado tanto el perfil de la tensión residual como los parámetros de rugosidad no sufran cambios al realizar esta modificación (figura 9.51 y tabla 9.8).

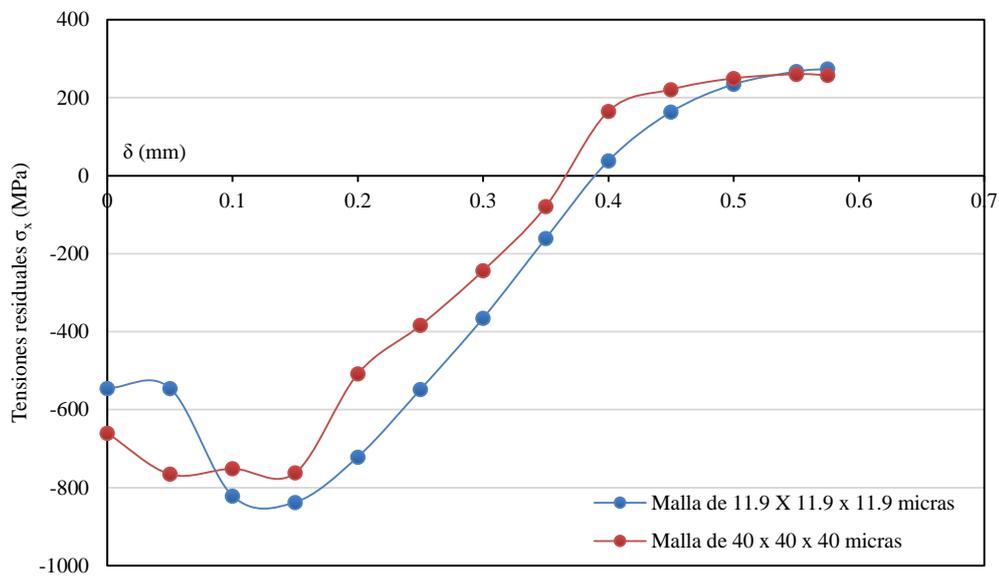


Figura 9.61.- Perfil de las tensiones residuales para los dos tipos de mallas.

Tabla 9.8.- Comparación de los valores de los parámetros de rugosidad para los dos tipos de malla.

	R _a (μm)	R _q (μm)	R _{sk}	R _{ku}
Malla 11.90 μm	0.017	0.019	-1.22	1.61
Malla 41 μm	0.015	0.0175	-1.26	1.73

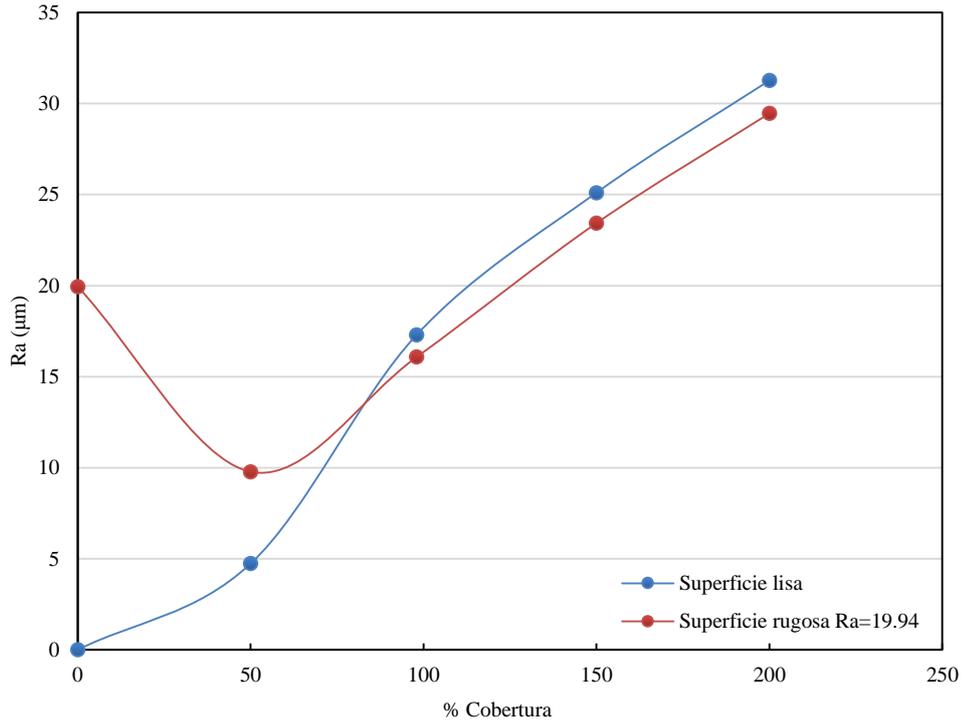


Figura 9.62.- Evolución del parámetro de rugosidad R_a en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.

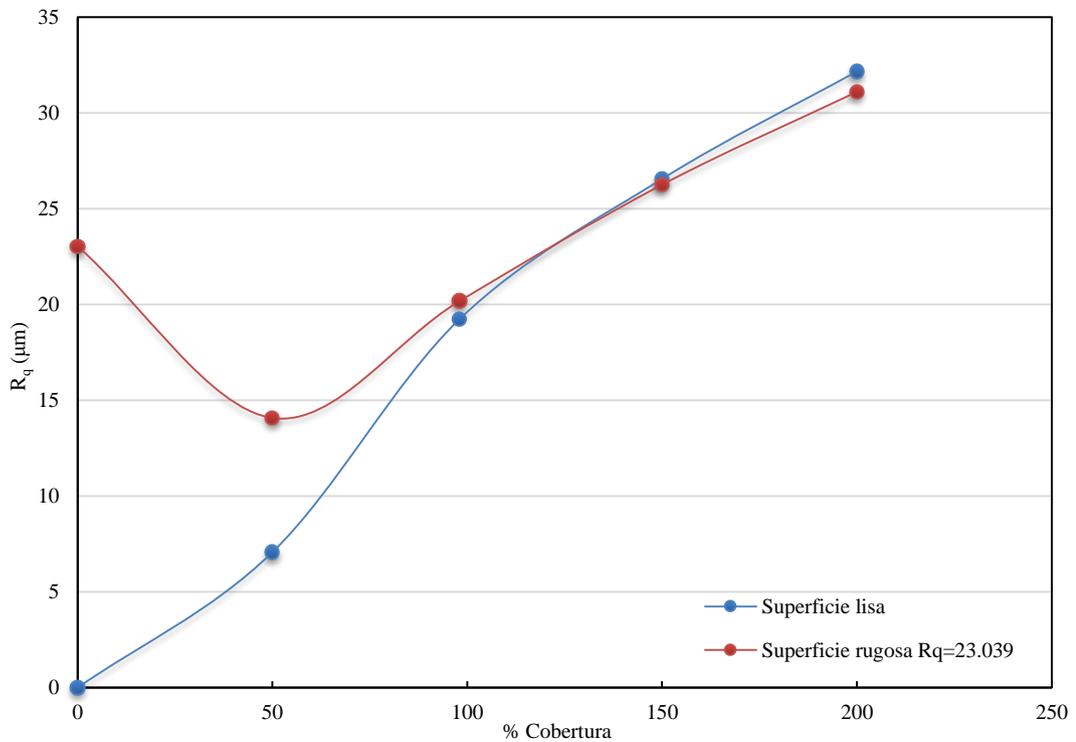


Figura 9.63.- Evolución del parámetro de rugosidad R_q en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_q = 23.04 \mu\text{m}$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.

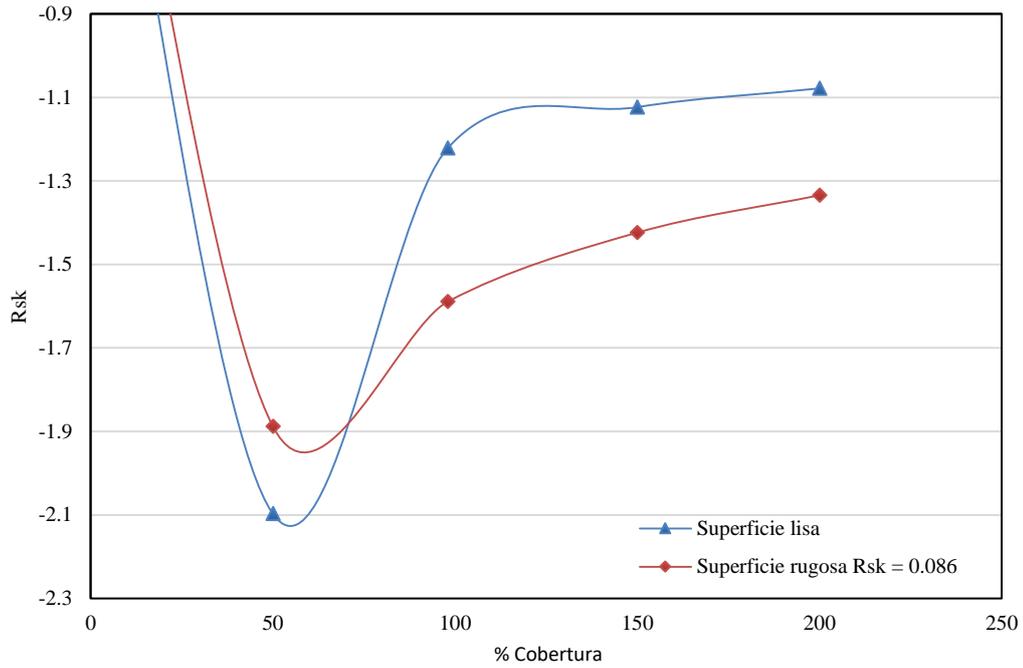


Figura 9.64.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{sk} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{sk} = 0.086$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.

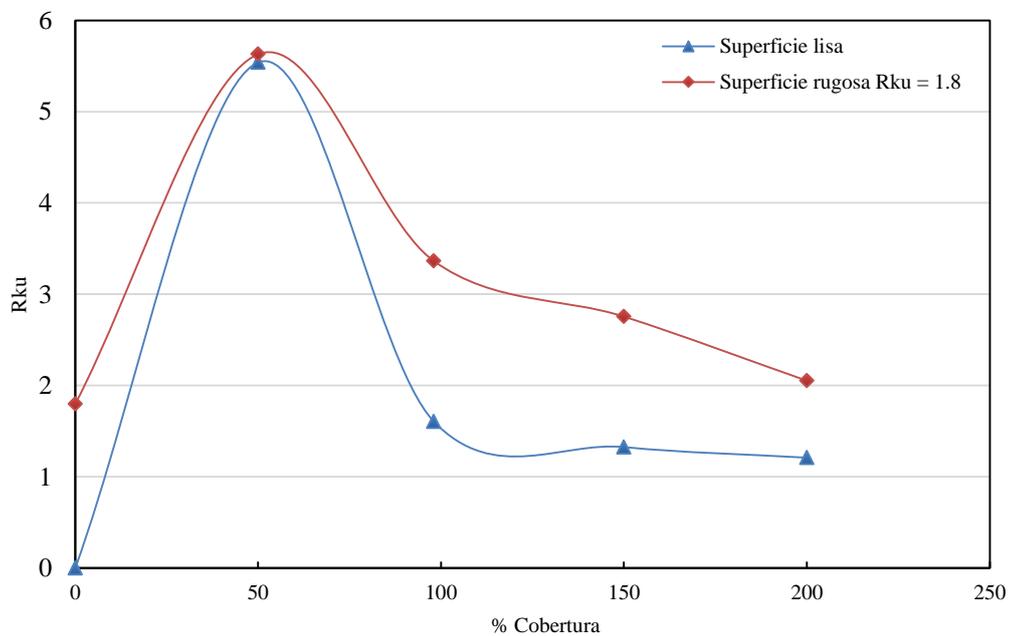


Figura 9.65.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{ku} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{ku} = 1.8$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.

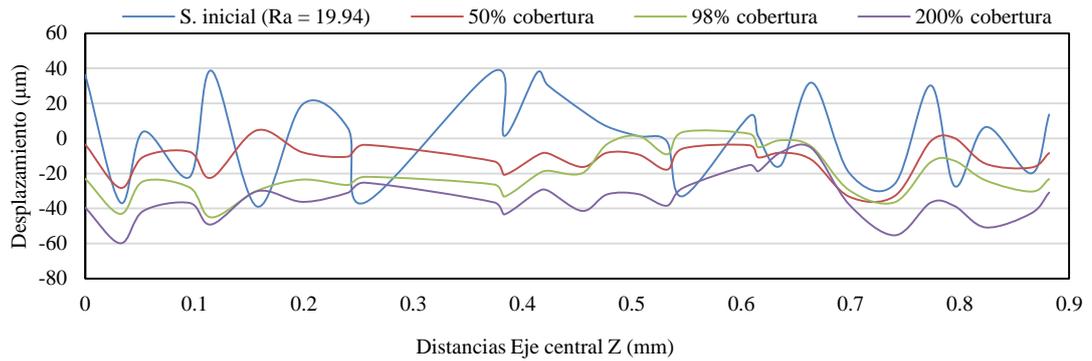


Figura 9.66.- Perfil 2D que muestra la variación de la superficie rugosa en función del grado de cobertura.

Las figuras 9.59 a 9.63 muestran los parámetros de rugosidad de la superficie resultante, cuando se utilizan bolas que impactan a 40 m/s sobre una superficie rugosa ($R_a = 19.94 \mu\text{m}$). Los valores de los parámetros R_a y R_q presentan una dependencia con la cobertura similar a la de los dos casos anteriores (superficies con rugosidad previa $R_a = 3.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 10.02 \mu\text{m}$), pero lógicamente con una mayor separación entre las curvas en el punto inicial. Al aumentar la cobertura, las curvas se van aproximando, manteniéndose próximas si la cobertura es mayor o igual al 98%. Las curvas de R_q son prácticamente coincidentes, mientras que la separación entre las curvas de R_a es del 4%.

Por su parte, el parámetro de asimetría R_{sk} muestra la misma tendencia con la cobertura en ambas curvas, aunque manteniendo entre ellas una separación del 12.4%. sin llegar a ser constante. En el parámetro de Kurtosis R_{ku} la separación entre curvas es inicialmente mayor (24.3%), aunque van acercándose a medida que la cobertura aumenta, hasta que la separación es del 15.8% para una cobertura del 200%.

Estas diferencias entre las curvas de R_q , R_{sk} y R_{ku} significa que la rugosidad previa influye en el acabado final, aunque esta influencia es muy pequeña, habría que ir a grados de cobertura mayores.

Como en los casos anteriores R_{sk} tiende a disminuir en la parte negativa. Hecho que se debe, como ya se ha indicado, a la formación de valles amplios y picos muy suaves. De la misma forma, R_{ku} también va disminuyendo con la cobertura, y se observa que su valor se va aproximando al de la superficie lisa. La disminución del parámetro ahora es menor que en los casos anteriores. Con el 98% de cobertura, se encuentra por encima de 3, lo que indica que siguen existiendo picos relativamente estrechos. Al 200% de cobertura toma un valor de 2, más alto que con rugosidad $R_a = 10.02 \mu\text{m}$. El proceso de SP sobre

esta superficie, con este alto grado de rugosidad, hace que, aunque en general los valores de los parámetros sigan la misma tendencia, las variaciones son mayores que en los casos anteriores.

Esta interpretación de la variación de los parámetros de rugosidad se deduce más claramente de la observación de los perfiles 2D obtenidos para los distintos grados de cobertura (figura 9.63). El perfil inicial cambia, suavizándose tanto los picos como los valles, pero el grado de variación de la superficie es menor, originando que los valores de los parámetros se alejen con respecto de los de la superficie lisa.

La velocidad de impacto es un parámetro importante, del que dependen tanto la distribución de las tensiones residuales de compresión como los parámetros de rugosidad finales de la superficie. Por este motivo se han vuelto a realizar las simulaciones, pero esta vez cuando las bolas impactan a una velocidad de 20 m/s.

En la figura 9.64 se puede ver cómo cambia la superficie en función de que las bolas impacten con una velocidad de 40m/s o a una velocidad de 20 m/s, sobre una superficie con rugosidad previa $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, utilizando en ambos casos un 98% de cobertura y con los valores de los parámetros VRP.

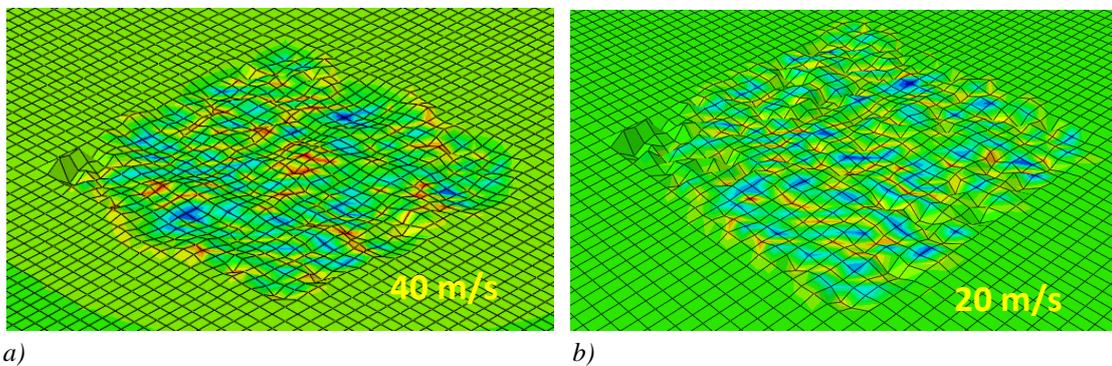


Figura 9.67.- Imagen de la superficie de impacto con rugosidad inicial de $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, cuando las bolas impactan a una velocidad de 40 m/s ó de 20 m/s.

Con las rugosidades iniciales: $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, se han realizado otras simulaciones a diferentes velocidades. Los resultados se han agrupado en las tablas 9.9 a 9.11, y se han representado en las figuras 9.65 a 68.

Tabla 9 9.- Valores de los parámetros de rugosidad partiendo de una superficie lisa y de superficies rugosas con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94. \mu\text{m}$; $V = 20 \text{ m/s}$.

V = 20 m/s - $\phi = 0.8 \text{ mm}$ - $\alpha = 90^\circ$				
Cobertura C (%)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_{ku}
0	0.000	0.000	0.000	0.000
50	4.907	6.118	-1.462	2.330
98	9.704	10.482	-1.182	1.486
150	13.826	14.399	-1.104	1.275
200	18.192	18.655	-1.069	1.184
0	3.020	3.470	0.008	1.787
50	6.983	7.940	-1.484	2.330
98	9.589	10.784	-1.182	1.468
150	13.924	14.400	-1.098	1.313
200	18.098	18.608	-1.098	1.121
0	10.025	11.580	-0.021	1.806
50	4.919	6.388	-1.618	3.404
98	9.214	10.393	-1.299	1.959
150	13.396	14.319	-1.168	1.488
200	17.689	18.514	-1.117	1.324

Tabla 9 10.- Valores de los parámetros de rugosidad partiendo de una superficie lisa y de superficies rugosas con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94. \mu\text{m}$; $V = 40 \text{ m/s}$.

V = 40 m/s - $\phi = 0.8 \text{ mm}$ - $\alpha = 90^\circ$				
Cobertura (%)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_{ku}
0	0.000	0.000	0.000	0.000
50	4.733	7.070	-2.097	5.540
98	17.295	19.229	-1.221	1.607
150	24.629	25.123	-1.190	1.512
200	31.257	32.162	-1.078	1.239
0	3.020	3.470	0.008	1.787
50	9.717	12.056	-1.452	2.369
98	16.119	18.114	-1.260	1.713
150	24.138	24.894	-1.165	1.521
200	30.153	31.455	-1.103	1.270
0	10.025	11.580	-0.021	1.806
50	3.802	6.495	-2.591	9.817
98	16.958	19.424	-1.336	2.034
150	24.986	24.966	-1.148	1.748
200	30.858	30.755	-1.169	1.473

0	19.940	23.039	0.076	1.798
50	9.777	14.075	-1.887	5.631
98	16.080	20.176	-1.589	3.365
150	23.435	26.255	-1.424	2.755
200	29.463	31.102	-1.334	2.053

Tabla 9 11.- Valores de los parámetros de rugosidad partiendo de una superficie lisa y de superficies rugosas con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94 \mu\text{m}$; $V = 100 \text{ m/s}$.

V = 100 m/s - $\phi = 0.8 \text{ mm} - 90^\circ$				
Cobertura (%)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rsk	Rku
0	0.000	0.000	0.000	0.000
50	11.274	17.337	-2.048	4.738
98	21.616	24.960	-1.292	1.975
150	42.986	44.236	-1.190	1.544
200	66.442	69.057	-1.098	1.256
0	3.020	3.470	0.008	1.787
50	13.265	19.660	-1.885	4.143
98	21.477	24.862	-1.292	1.993
150	43.236	45.232	-1.192	1.458
200	66.146	68.823	-1.100	1.262
0	10.025	11.580	-0.021	1.806
50	3.104	5.878	-2.660	8.232
98	22.095	24.946	-1.310	1.990
150	44.329	45.674	-1.209	1.439
200	66.129	68.938	-1.088	1.278
0	19.940	23.039	0.076	1.798
50	20.304	28.173	-1.813	4.282
98	27.360	33.767	-1.502	2.674
150	44.092	46.811	-1.350	2.095
200	65.844	67.696	-1.348	2.039

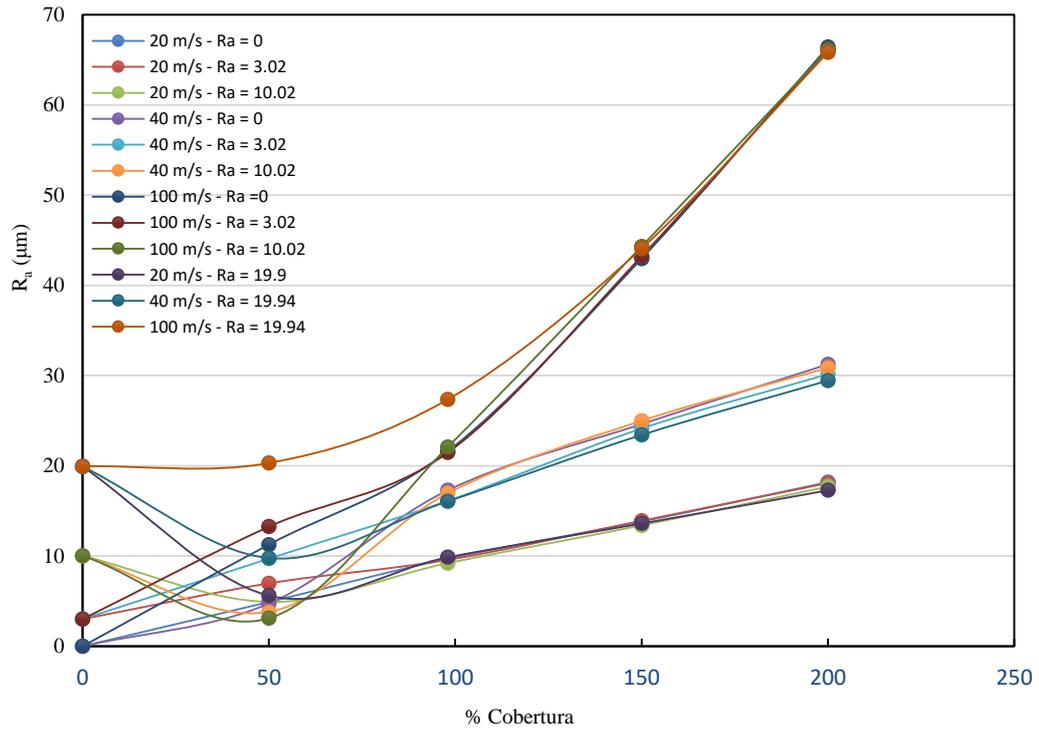


Figura 9.68.- Evolución del parámetro R_a en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_a = 0$, $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$, $R_a = 19.94 \mu\text{m}$.

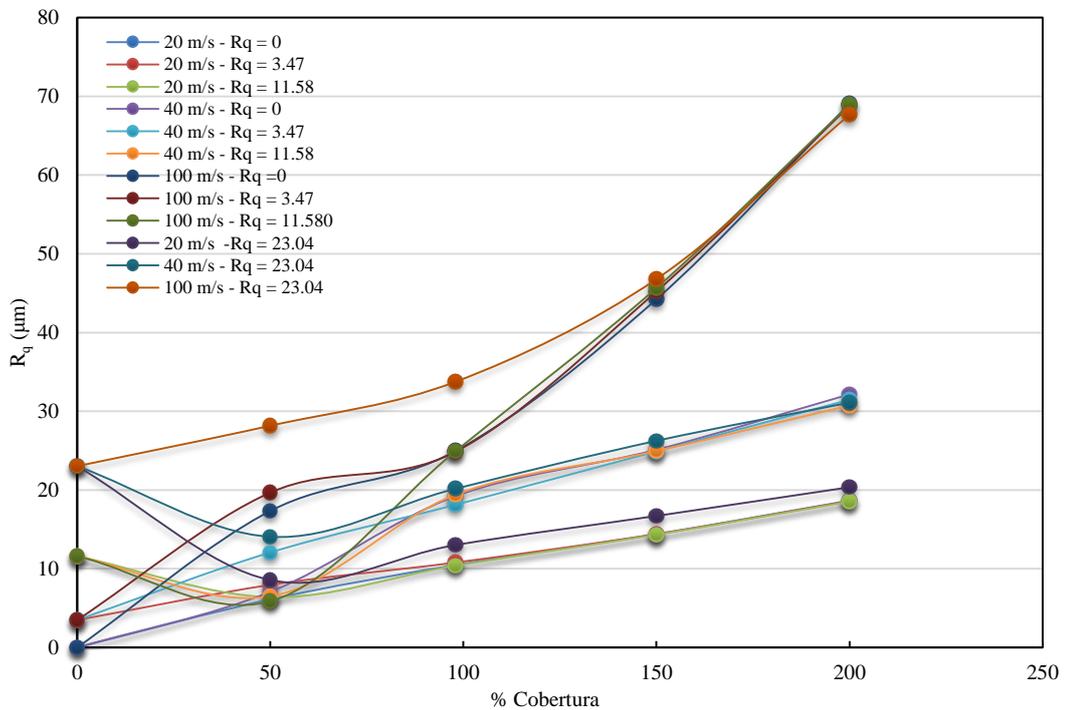


Figura 9.69.- Evolución del parámetro R_q en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_q = 0$, $R_q = 3.47 \mu\text{m}$, $R_q = 11.58 \mu\text{m}$, $R_q = 23.04 \mu\text{m}$.

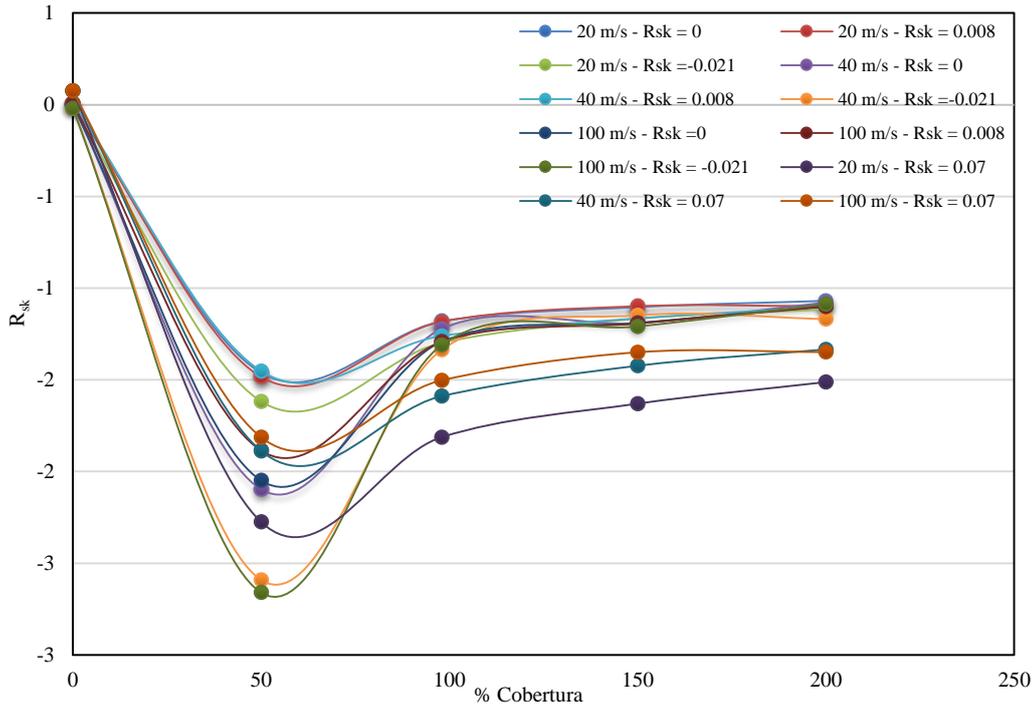


Figura 9.70.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_{sk} = 0, R_{sk} = 0.008, R_{sk} = 0.07, R_{sk} = -0.021$.

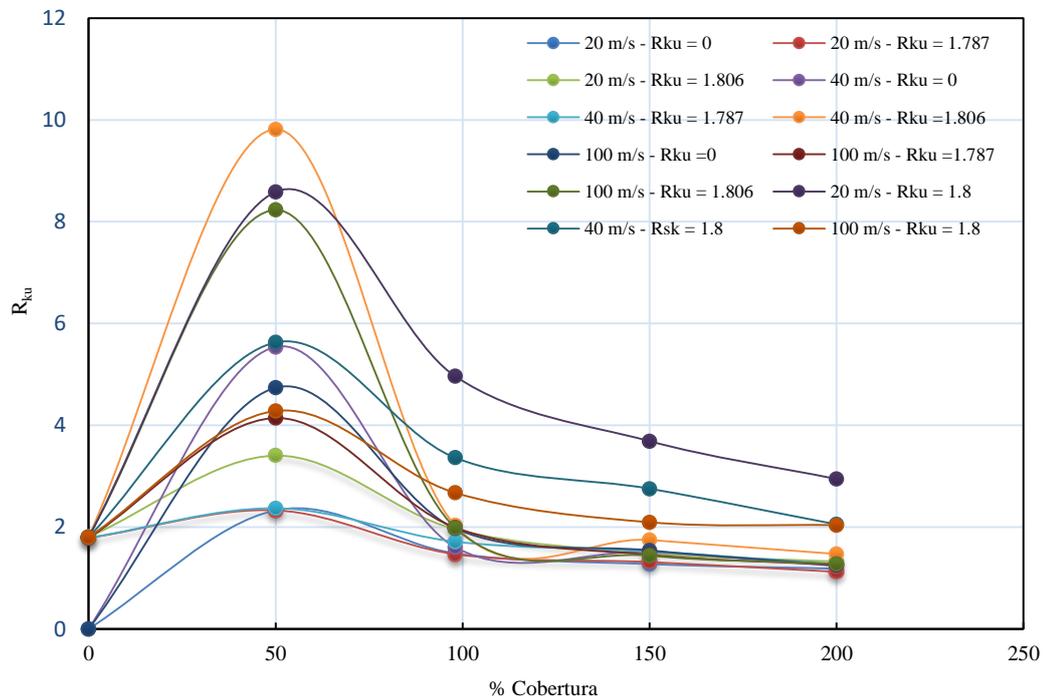


Figura 9.71.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_{ku} = 0, R_{ku} = 1.787, R_{ku} = 1.8, R_{ku} = 1.806$.

Al agrupar los valores en las tablas 9.9 a 9.11 y en las figuras 9.65a 9.68 se observa lo siguiente:

- Para los parámetros R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , las tres velocidades y los tres tipos de superficies con rugosidad inicial se observa que, hasta el 50% de cobertura, existe una dispersión de los valores. Este hecho, como se ha comentado en apartados anteriores, se debe a que con grados de cobertura bajos (< del 80%) existe mucha diferencia en la rugosidad superficial entre las zonas con impactos y sin ellos.
- La evolución de R_a y de R_q es similar en ambas gráficas, 9.65 y 9.66. Con cada velocidad se observa que a partir del 98% de cobertura los valores de ambos parámetros convergen, independientemente de que se parta de una superficie lisa o de las superficies rugosas.
- De la misma forma, los parámetros de rugosidad R_{sk} y R_{ku} a partir de una cobertura del 98% convergen. Este hecho indica que, independientemente de cual se la rugosidad inicial, la cobertura (si es igual o está por encima del 98%) o de la velocidad de impacto, los valores de R_{sk} y R_{ku} acaban siendo los mismos después de la simulación del proceso de SP. Los valores de estos parámetros indican que en la superficie tratada con SP dominan los valles profundos y amplios con picos suaves.
- Para las velocidades y rugosidades iniciales analizadas, en las simulaciones numéricas realizadas, se observa que el proceso de SP elimina la rugosidad inicial a partir de un 98% de cobertura.

PARTE IV – CONCLUSIONES

CAPÍTULO 10.- CONCLUSIONES.

10.1.- Introducción.

En este último capítulo se exponen las conclusiones de la investigación realizada, se analiza el grado de consecución de los objetivos planteados al principio de la memoria y la aportación a la mejora del conocimiento en torno al tema: Estudio de las superficies de materiales metálicos tratadas con la técnica de *shot-peening*. En primer lugar, partiendo de los objetivos propuestos en el capítulo de introducción, se valora la consecución de cada uno de ellos. Se justificarán en base al trabajo realizado, que se ha expuesto en los diferentes capítulos de esta memoria, considerando los modelos desarrollados, los resultados obtenidos y la discusión que se ha hecho de ellos.

En segundo lugar, se recopilan las conclusiones técnicas que se han alcanzado, que han sido expuestas y discutidas ampliamente en la tercera parte de esta memoria de Tesis Doctoral.

Por último, se sugieren posibles líneas de continuación de este trabajo de cara al futuro, que pueden ampliar la investigación realizada hasta la fecha.

10.2.- Consecución de objetivos.

En el apartado 1.3.2 se enunciaron los objetivos parciales que se pretendían alcanzar con la investigación. Una vez expuesto todo el trabajo realizado, se valoraran a continuación el grado de consecución que han tenido los mismos.

Objetivo 1.- Presentar y describir el proceso industrial de SP. Señalando qué variables y de qué tipo intervienen en el proceso.

En el capítulo 2 se ha expuesto el proceso de SP, partiendo de la presentación de la técnica industrial del procedimiento, para después ir describiendo todos y cada uno de los factores que forman parte del proceso: en primer lugar, las variables que caracterizan el elemento impactador, en segundo lugar, se han analizado otros parámetros que tienen que ver con el propio proceso, para terminar con las aplicaciones industriales.

Objetivo 2.- Exponer el desarrollo y el estado actual del conocimiento en lo referente al proceso de simulación del SP, destacando los modelos numéricos más recientes y complejos con los que es posible realizar cálculos tridimensionales con impactos múltiples aleatorios y aislar la influencia de cada uno de los parámetros físicos y mecánicos que determinan la naturaleza de un proceso industrial de SP.

Tras una búsqueda bibliográfica exhaustiva, en el capítulo 3 se han recogido y comentado todos los trabajos sobre simulación numérica del proceso de SP que se han encontrado, publicados por distintos grupos de investigación. Debido al gran número de publicaciones existentes, ha sido necesario realizar una clasificación en función de los modelos numéricos de simulación por elementos finitos y en función de las variables y parámetros del sistema.

Objetivo 3.- Estudiar los modelos constitutivos de materiales metálicos sometidos a cargas impulsivas repetidas. De qué forma y en qué medida los modelos que mejor describen el comportamiento de un material sometido a un proceso de SP deben tener en cuenta los efectos de la velocidad de deformación y del endurecimiento del material bajo cargas cíclicas, es todavía una cuestión abierta.

Como se ha comentado en la introducción del capítulo 1, para el estudio por simulación numérica del proceso de SP de metales, es necesario tener conocimientos del comportamiento elasto-plástico de materiales. En el capítulo 4 se ha realizado un breve resumen sobre esta materia, recordando los conceptos de fluencia, regla de flujo (o regla plástica) y los distintos tipos de endurecimiento, para terminar con una descripción de los modelos de comportamiento de materiales metálicos utilizados en las simulaciones del proceso de SP.

Objetivo 4.- Presentar los modelos utilizados para la determinación de la cobertura en la simulación numérica del SP.

Dentro de la recopilación bibliográfica realizada sobre la simulación numérica del proceso de SP, se han tratado los sistemas de cobertura habitualmente utilizados. En el presente trabajo se ha empleado el modelo denominado aleatorio, para lo que ha sido

preciso realizar: un estudio de las huellas producidas por los proyectiles, determinación del número de bolas necesarias para conseguir el grado de cobertura deseado BAGHERIFARD ET AL. (2010), precisar las coordenadas aleatorias de los puntos de impacto e incorporarlas al programa comercial de elementos finitos Abaqus®, para posicionar las bolas sobre la muestra.

Objetivo 5: Analizar, mediante modelos de elementos finitos, la influencia que sobre la morfología de la huella desarrollada en el material tras el impacto de un único proyectil tienen las distintas variables del proceso de SP.

Con este fin, se ha desarrollado un modelo de simulación numérica por elementos finitos 3D que sólo incluye una bola. A partir de este modelo, se han llevado a cabo numerosas simulaciones, determinando la huella generada para distintos valores de las variables principales del proceso.

Los resultados de todas estas simulaciones se han agrupado en tablas y gráficos, con la finalidad de que sirvieran de referencia para los estudios realizados posteriormente.

Objetivo 6.- Implementar un modelo numérico 3D multi-impacto aleatorio basado en el método de los elementos finitos que, siguiendo los trabajos desarrollados por MIAO ET AL., 2009; BAGHERIFARD ET AL., 2010; MYLONAS Y LABEAS, 2011; GAUGLIANO ET AL., 2014 y SANJURJO ET AL., 2014, sea capaz de aislar y describir la influencia que algunos parámetros característicos del procesado mediante SP tienen sobre las tensiones residuales.

En el capítulo 8 se ha descrito el modelo de simulación numérica siguiendo los trabajos desarrollados por desarrollados por *MIAO ET AL., 2009; BAGHERIFARD ET AL., 2010; MYLONAS Y LABEAS, 2011; GAUGLIANO ET AL., 2014 y SANJURJO ET AL., 2014*, detallando su geometría, el contacto entre las bolas y la muestra, las condiciones de contorno, el mallado y el modelo de bola utilizado en la simulación.

Este modelo de simulación numérica por elementos finitos, que incluye el modelo comportamiento del material propuesto por SANJURJO ET AL. (2014), se ha utilizado para estudiar la influencia de las variables del proceso de SP sobre las tensiones residuales que se generan en la muestra objetivo.

A partir de los valores numéricos obtenidos, se han dibujado una serie de gráficas para analizar de forma más intuitiva los resultados, deduciéndose una serie de conclusiones técnicas que se exponen en el siguiente apartado.

Objetivo 7: Estimar las características superficiales, en términos de los parámetros convencionales que miden la rugosidad de una superficie, a partir de cálculos basados en el modelo numérico desarrollado previamente, con el objeto de determinar qué valores de los parámetros ajustables en un proceso de SP dan lugar a un acabado superficial de calidad prefijada.

Utilizando los valores de desplazamiento de los nodos de la malla situados en la superficie de la muestra después de un proceso simulado de SP, se han calculado los parámetros que caracterizan la rugosidad de la superficie (R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku}), con los siguientes valores de los parámetros característicos del proceso:

- Velocidad de impacto 20 m/s, 40 m/s, 60 m/s, 80 m/s, 100 m/s y 120 m/s.
- Ángulo de impacto 50°, 60°, 70°, 80° y 90°.
- Diámetro de las bolas 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm y 1.2 mm.
- Grado de cobertura 50%, 98%, 200% y 400 %.

Los resultados obtenidos se han agrupado en tablas resumen, y representado gráficamente para facilitar el estudio de la influencia de las variables del proceso de SP en la rugosidad de la superficie resultante. Las conclusiones técnicas que se desprenden del estudio se exponen en el apartado 10.3.

Objetivo 8.- Aproximar, en función de las características del proyectil y del grado de cobertura, la evolución de los parámetros que miden la rugosidad, partiendo de sólidos con superficies de rugosidad inicial conocida.

El último objetivo se centra en el estudio de la posible influencia de la rugosidad previa de la superficie sobre los resultados de un proceso de SP. Para ello, el primer paso consistió en generar superficies rugosas dentro del modelo de elementos finitos. Con este fin, se realizó una modificación de la geometría de la malla mediante una variación aleatoria de las coordenadas de los nodos situados en la superficie.

Para cada superficie con una rugosidad inicial, se han realizado simulaciones con distintos valores de las variables y de los parámetros que intervienen en el proceso de SP, determinando los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} en cada caso. Los resultados obtenidos se han agrupado en tablas y representado gráficamente para facilitar su análisis, llegándose a las conclusiones técnicas que se exponen en el siguiente apartado.

10.3 Conclusiones técnicas.

Las conclusiones técnicas que se recapitulan a continuación derivan de la discusión de los resultados realizada detalladamente en la tercera parte de la memoria (capítulos 7, 8 y 9). Todas estas conclusiones son aplicables dentro de los intervalos de los valores de las variables del proceso de SP consideradas.

1.- Huella generada por el impacto de una única bola.

- El diámetro de la huella generada por la bola al impactar aumenta al incrementarse la velocidad y el diámetro de la misma. El incremento de la huella es mayor al aumentar al diámetro de la bola que al aumentar la velocidad.
- El tamaño de la huella, para un tamaño concreto de bola, no cambia sustancialmente al modificarse el ángulo de impacto.
- La profundidad de la huella crece a medida que aumentan la velocidad, el diámetro y el ángulo de impacto de la bola. El parámetro que más influye es el propio tamaño de la bola.

2.- Tensiones residuales de compresión desarrolladas en la capa superficial de la muestra.

Influencia del grado de cobertura.

- Se concluye que por encima del 98% de cobertura (que se considera una cobertura total) los perfiles de tensiones son casi idénticos.

Influencia de la velocidad de impacto de las bolas.

- En general, un incremento de la velocidad de las bolas aumenta la profundidad de las tensiones residuales de compresión. También lo hace el valor máximo de la tensión residual.

Influencia del ángulo de impacto.

- Con ángulos de impacto inferiores a 70° la tensión residual máxima de compresión se reduce de manera notable.

Influencia del diámetro de las bolas.

- Las tensiones residuales de compresión incrementan su profundidad al aumentar el diámetro de las bolas, sin que varíe prácticamente el valor de la la tensión máxima.

3.- Acabado superficial. Estudio paramétrico de la rugosidad.

Influencia de la velocidad.

- Los valores de los parámetros R_a y R_q aumentan con la velocidad de impacto, hasta que la velocidad es de 80 m/s donde empiezan a estabilizarse.
- R_{sk} tiene un valor negativo en todo el intervalo de velocidades de impacto estudiado, y crece en valor absoluto con la velocidad. El valor negativo de R_{sk} indica que en la topografía de la superficie de la muestra tratada con SP dominan los valles profundos y los picos suaves.
- R_{ku} tiene un valor comprendido entre 1.6 y 2, aumentando ligeramente con la velocidad. Su valor es inferior a 3, lo que indica que la topografía de la superficie de la muestra tratada con SP está formada por valles y picos amplios, en todo el rango de velocidades estudiado.

Influencia del ángulo de impacto

- Los valores de los parámetros R_a y R_q disminuyen al crecer el ángulo de impacto desde un ángulo de 60° . La forma en la que varían los parámetros indica que la altura de picos y valles va reduciéndose a medida que la dirección de impacto se aproxima a la vertical.

Influencia de diámetro de las bolas

- Los parámetros de rugosidad R_a y R_q aumentan de valor a medida que crece el diámetro de las bolas que impactan sobre la muestra.

- R_{sk} es negativo para todos los diámetros de bola estudiados, lo que indica que el relieve de toda la superficie tiene picos suaves y valles profundos. Esta disminución puede interpretarse como que su asimetría es menor, de modo que existe menos diferencia entre picos y valles. Cuando se llega a un valor de 1.2 mm el valor de R_{sk} crece bruscamente en valor absoluto, lo que indica que existe una mayor asimetría en el perfil rugoso, o lo que es lo mismo una mayor diferencia entre picos y valles.
- R_{ku} tiene valores inferiores a tres, lo que indica que hay dominio de valles y picos amplios en el perfil de rugosidad. El hecho de que vaya disminuyendo este valor indica, que a medida que aumenta el diámetro, los picos y los valles van siendo más amplios. Con el diámetro de 1.2 mm se produce un aumento brusco de R_{ku} indicando que en el perfil aparecen picos y valles menos amplios.

Influencia del grado de cobertura.

- Los valores de los parámetros R_a y R_q aumentan a medida que se incrementa el grado de cobertura sobre la zona de impacto. Ambos parámetros tienen una variación muy similar, de modo que prácticamente las gráficas son coincidentes. Este crecimiento indica que los valles son más profundos y/o los picos más elevados, a medida que aumenta la cobertura.
- El parámetro R_{sk} es negativo, de manera que la rugosidad presenta valles profundos y picos suaves. Al 50% de cobertura, el parámetro R_{sk} es elevado (en valor absoluto), debido a que las diferencias entre las zonas con o sin impactos dentro de la superficie de estudio. El valor disminuye ligeramente en valor absoluto a medida que aumenta la cobertura. Este hecho se debe a que los solapamientos de los impactos de las bolas sobre la superficie son mayores, ocasionando que los valles se hagan más profundos y los picos se suavicen.
- En la evolución del parámetro R_{ku} , también existe una gran diferencia entre su valor al 50% de cobertura y el resto de valores, por el mismo motivo que R_{sk} . Para coberturas superiores al 98%, se produce una disminución ligera de este parámetro, como consecuencia de los solapamientos de los impactos sobre la superficie. Su valor sigue siendo inferior a 3, y por tanto los valles y los picos son amplios. Esta amplitud es mayor a medida que aumenta el grado de cobertura.

4.- Estudio paramétrico de la rugosidad partiendo de una superficie con rugosidad

Del estudio realizado considerando tres superficies con distinta rugosidad previa, caracterizadas por los siguientes parámetros:

- Superficie inicial 1: $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_q = 3.47 \mu\text{m}$, $R_{sk} = 0.008$, $R_{ku} = 1.79$
- Superficie inicial 2: $R_a = 10.02 \mu\text{m}$, $R_q = 11.58 \mu\text{m}$, $R_{sk} = 0.020$, $R_{ku} = 1.80$
- Superficie inicial 3: $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, $R_q = 23.04 \mu\text{m}$, $R_{sk} = 0.086$, $R_{ku} = 1.80$

se han obtenido los parámetros de rugosidad de la superficie resultante del proceso de SP, para tres velocidades de las bolas (20 m/s, 40m/s y 100 m/s) y diferentes grados de cobertura (50%, 98%, 150% y 200 %). Estas tablas pueden ayudar a ingenieros a orientar sus acabados superficiales cuando existe la necesidad de aplicar al sólido un proceso de SP.

- A partir del 98% de cobertura, los valores de los parámetros de rugosidad tienen un valor prácticamente idéntico para las superficies lisa y la rugosa. Este resultado indica que el impacto de las bolas sobre la superficie genera una deformación tal que elimina la rugosidad inicial, de manera que esta no influye en las características topológicas de una superficie tratada por SP. Dominan los valles profundos y amplios y los picos suaves.

Finalmente, para analizar la posible influencia de valores altos (mayores de 3) del parámetro R_{ku} , se han estudiado otras dos superficies más, con rugosidad previa:

- Superficie inicial 4: $R_a = 6.10 \mu\text{m}$, $R_q = 10.13 \mu\text{m}$, $R_{sk} = -1.85$, $R_{ku} = 3.70$
- Superficie inicial 5: $R_a = 0.88 \mu\text{m}$, $R_q = 2.37 \mu\text{m}$, $R_{sk} = 1.43$, $R_{ku} = 10.54$

pero se ha llegado a la misma conclusión general enunciada más arriba

10.4.- Líneas de investigación futuras.

Todos los resultados obtenidos en esta tesis doctoral provienen de simulaciones numéricas por elementos finitos del proceso de SP, considerando un único material de muestra. Por tanto, las posibles líneas de investigación que se proponen para continuar este trabajo son:

- 1.- En primer lugar, realizar una campaña de ensayos experimentales considerando otros materiales metálicos, mediante la cual obtener datos empíricos que permitan una validación adicional de los resultados teóricos obtenidos en esta tesis doctoral.
- 2.- En segundo lugar, establecer algún tipo de correlación que permita estimar el acabado superficial partiendo del conocimiento de la huella de un solo proyectil.
- 3.- En tercer lugar, realizar un estudio tanto experimental como numérico de la aplicación del proceso de SP a una unión soldada entre dos metales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus CAE 2017, Bluid ID: 2016_09_27-23, 54.59, 126836, Dassault Systemes, 2016
- AIAS, (2009). El shot-peening y sus aplicaciones. Asociación de industrias del acabado superficial. Boletín informativo N° 79
- Al-Hassani, S. T. S.; Kormi, K.; Webb, D. C. (1999) Numerical simulation of multiple shot impact. Proceedings of ICSP-7, Warsaw, Poland, , p. 217-27.
- Al-Hassami, S (1981). Mechanical aspects of residual stress development in shot peening.
- Almroth, B. O. and Brogan, F. A., (1972) Bifurcation buckling as an approximation to the collapse load for general shells, AIAA J., 10, 121–140,
- AL-OBAID, Y. F (1995). Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis. Mechanics of Materials, vol. 19, no 2-3, p. 251-260.
- Armstrong Peter J; Frederick, C. O. (1966). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. Central Electricity Generating Board [and] Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department,
- Astaraee, Asghar Heydari, et al. (2017) Incorporating the principles of shot peening for a better understanding of surface mechanical attrition treatment (SMAT) by simulations and experiments. Materials & Design, vol. 116, p. 365-373.
- Bagherifard, S.; Ghelichi, R.; Guagliano, M. (2010). A numerical model of severe shot peening (SSP) to predict the generation of a nanostructured surface layer of material. Surface and Coatings Technology, vol. 204, no 24, p. 4081-4090.
- Bagherifard, Sara; Ghelichi, Ramin; Guagliano, Mario. (2012-a) Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening. Applied surface science, vol. 258, no 18, p. 6831-6840.
- Bagherifard, Sara; Ghelichi, Ramin; Guagliano, Mario. (2012-b). On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: a critical review and some original developments. Applied Surface Science, vol. 259, p. 186-194.
- Baiker, Steven (2006). Shot peening: a dynamic application and its future;[and yet... it moves. Galileo Galilei (1564-1642)]. Metal finishing news.
- Ben-Israel, Adi (1966). A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations. Journal of Mathematical analysis and applications, vol. 15, no 2, p. 243-252.

- Brodmann, R.; Thurn, G. (1986) Roughness measurement of ground, turned and shot-peened surfaces by the light scattering method. *Wear*, vol. 109, no 1-4, p. 1-13.
- Brogan, F. A. and Almroth, B. O. (1971), Practical methods for elastic collapse analysis of shell structures, *AIAA J.*, 9, 2321–2325,
- Cammett, J. (2007) Shot peening coverage—the real deal. *The shot peener*, , vol. 21, no 3, p. 8-14.
- Cao, W.; Fathallah, R.; Castex, L. (1995). Correlation of Almen arc height with residual stresses in shot peening process. *Materials science and technology*, vol. 11, no 9, p. 967-973.
- Chaboche, J.L., Dang-Van, K., Cordier, G. (1979). Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel. In: *SMIRT 5*, Berlin.
- Chaboche, J.L., Rousselier G., (1983). On the plastic and viscoplastic constitutive equations, Parts I and II *Int. J. Pressure Vessel Piping*, 105, pp. 153–158 159–164
- Chaboche, J. L. (2008) A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *International Journal of Plasticity*, , vol. 24, no 10, p. 1642-1693.
- Chen Ling, et al. (2013) Modeling effect of surface roughness on nanoindentation tests. *Procedia CIRP*, vol. 8, p. 334-339.
- Clough R.W. (1960). The finite elements in plane stress analysis”, *Proc, 2nd. A.S.C.E. , Conf. on Electronic Computation*, Pittsburg, Pa. Sept.
- Cowper G.R., Symonds P.S, (1957). Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams. Division of applied mathematics erown university Providence, r, i. September. Office of Naval research contract ncmr 562(10) nr-064-406.
- Crisfield, M.A. (1981). A fast incremental/iterative solution procedure that handles “snap-through”. *Computers & Structures*, vol. 13, no 1-3, p. 55-62.
- Dai, K., et al (2004). Finite element modeling of the Surface roughness of 5052 Al alloy subjected to a Surface severe plastic deformation process. *Acta Materialia*, vol. 52, no 20, p. 5771-5782.
- DIN 4769-1 (1975) Roughness Comparison Specimens; Technical Conditions of Delivery, Application.. Germany.
- Fathallah, R.; Inglebert, G.; Castex, L. (1996). Modelling of shot peening residual stresses and plastic deformation induced in metallic parts. En *Proceedings of the Sixth International Conference on Shot Peening, ICSP6*, San Francisco, CA. p. 464-473.

- Flavenot, J.k., Youcef. (1997) Évaluation des contraintes résiduelles dans les assemblages soudés par méthode ultrasonore: prise en compte de la microstructure. Tesis doctoral. University of Montpellier.
- Frija, M., et al. (2006) Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 426, no 1, p. 173-180.
- Gadelmawla, E. S., et al. (2002) Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, no 1, p. 133-145
- Guagliano, M. (2001) Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no 3, p. 277-286.
- Guechichi, H. ,Castex, L., (2006). Frelat,J. et al. An approach to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses, in A. Nakonieczny, ed., *Proc. Of the 7th. Conf. On shot peening*, pp.274-282.
- Hammersley, Graham; Hackel, Lloyd A.; Harris, Fritz. (2000). Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 34, no 4, p. 327-337.
- Han, K., et al. (2000). A combined finite/discrete element simulation of shot peening processes– Part I: studies on 2D interaction laws. *Engineering Computations*, vol. 17, no 5, p. 593-620.
- Han, K., et al. (2000). A combined finite/discrete element simulation of shot peening processes– Part II: 3D interaction laws. *Engineering Computations*, vol. 17, no 6, p. 680-702
- Hertz, Heinrich. (1881) On the contact of elastic solids. *J. Reine Angew Math.*, , vol. 92, p. 156-171.
- Hong, T.; Ooi, J. Y.; Shaw, B. (2008). A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, no 8, p. 1097-1110.
- Huo, Lixing; Wang, Dongpo; Zhang, Yufeng. (2005). Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load. *International journal of Fatigue* vol. 27, no 1, p. 95-101.
- Jebahi, Mohamed, et al. (2016) Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 107, p. 21-33.

- Jiang, X. P., et al. (2007). Effects of shot-peening and re-shot-peening on four-point bend fatigue behavior of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 468, p. 137-143.
- Johnson, Gordon R.; Cook, William H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. En *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. p. 541-547.
- Kang, W. J., et al. (1999). Modified Johnson-Cook model for vehicle body crash worthiness simulation. *International journal of vehicle design*, vol. 21, no 4-5, p. 424-435.
- Kang, X.; Wang, T.; Platts, J. (2010). Multiple impact modelling for shot peening and peen forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, vol. 224, no 5, p. 689-697.
- Karuppanan, S., Romero, J.S., De los Rios, E.R., Rodopoulos, C., Levers, A., (2002). A theoretical and experimental investigation into the development of coverage in shot peening, in: *ICSP8, Munich, Germany*, pp. 101-107.
- Kenneth James (1993). *Shot peening: techniques and applications*. Engineering Materials Advisory Service Ltd. (United Kingdom), p. 320.
- Kim N. (2015), *Introduction to nonlinear finite element analysis*, Springer, New-York.
- Kim, Taehyung, et al. (2013) Effects of Rayleigh damping, friction and rate-dependency on 3D residual stress simulation of angled shot peening. *Materials & Design*, vol. 46, p. 26-37
- Kirk, D.; Abyaneh, M. Y. (1995). Theoretical basis of shot peening coverage control. *Shot Peener(USA)*, vol. 9, no 2, p. 28-30.
- Kirk, David (2002). *Development, Measurement, Control and Significance*. Shot Peener(USA), vol. 16, no 3, p. 33-36.
- Kirk, David. (2005) Theoretical principles of shot peening coverage. *Shot Peener*, vol. 19, no 2, p. 24.
- Klemenz, M., et al. (2009) Application of the FEM for the prediction of the surface layer characteristics after shot peening. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no 8, p. 4093-4102.
- Kobayashi, M.; Matsui, T.; Murakami, Y. (1998). Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening. *International Journal of Fatigue*, vol. 20, no 5, p. 351-357.
- Kumar H., Singh S. and Kumar P., (2013) Modified shot peening processes - A review, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, Vol. 5, Issue 1 pp, 12-19.

- Lemaitre J.; Chaboche, J. L. (1990). Mechanics of solid materials. UK: Cambridge University Press Cross. Ref. Google Scholar.
- Levers, Andrew; Prior, Alan. (1998). Finite element analysis of shot peening. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80, p. 304-308.
- Li, J. K., et al. (1991) Mechanical approach to the residual stress field induced by shot peening. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 147, no 2, p. 167-173.
- Liew, K. M.; Ong, L. S. (2005). Relaxation of peening residual stresses due to cyclic thermo-mechanical overload. *Transactions of the ASME: Journal of engineering materials and technology*, vol. 127, no 2, p. 170-178.
- Llaneza, V.; Belzunce, F. J. (2015). Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening. *Applied Surface Science*, vol. 356, p. 475-485.
- Lombardo, D., Bailey, P., (1996). The reality of shot peen coverage, in: ICSP6, San Francisco, CA, USA, pp. 493–504.
- Lombardo, D.; Bailey, P. (1999). The reality of shot peen coverage. *The Shot Peener*, vol. 13, no 4, p. 34-37.
- Majzoobi, G. H.; Azizi, R.; Nia, A. Alavi. (2005). A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164, p. 1226-1234.
- Majzoobi, G. H.; Azadikhah, K.; Nemati, J. (2009). The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 516, no 1, p. 235-247.
- Martin, H. C. (1966), On the derivation of stiffness matrices for the analysis of large deflection and stability problems, in: R. Bader et. al. (eds.), Proc. 1st Conf. on Matrix Methods in Structural Mechanics, AFFDL-TR-66-80, Air Force Institute of Technology, 697–716.
- Matlab (2010), the lenguaje of technical computing, Version 7.100.499 (R2010a) 64-bit (win64), February 5, License Number 161051, Mathworks.
- Marsh, Kenneth James. (1993) Shot peening: techniques and applications. *Engineering Materials Advisory Service Ltd.(United Kingdom)*, p. 32
- Meguid, S. A.; Shagal, G.; Stranart, J. C. (1999). Finite element modelling of shot-peening residual stresses. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 92, p. 401-404.

Referencias bibliográficas

- Meguid, S. A.; Shagal, G.; Stranart, J. C. 3D (2002). FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, no 2, p. 119-134.
- Miao, H. Y. et al., (2009) On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, vol. 40, no 10, p. 1023-1038.
- Mylonas, G. I.; Labeas, G. (2011). Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: residual stress, surface roughness and cold work prediction. *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no 19, p. 4480-4494.
- Nicholas Michael David (1994). Peen mechanics in the shot peening process. Tesis Doctoral. University of Cambridge.
- Peñuelas, I., et al. (2014) Numerical simulation of shot peening process: influence of the constitutive of the target material, *Applied and Theoretical Mechanics*, vol.10, p. 194-203.
- Pham, Trung Quang; Khun, Nay Win; Butler, David Lee. (2017). New approach to estimate coverage parameter in 3D FEM shot peening simulation. *Surface Engineering*, p. 1-9.
- Porro González, Juan Antonio (2010). Optimización de campos de tensiones residuales en procesos de tratamiento superficial de materiales metálicos mediante ondas de choque generadas por láser. Tesis Doctoral. ETSII DE Madrid. UPM.
- Rouhaud, Emmanuelle, et al. (2005). Finite elements model of shot peening, effects of constitutive laws of the material. *Proceedings ICSP-9, Paris, France*.
- SAE J2277 Shot Peening Coverage, Developed by Surface Enhancement Committee, Publication Date: Jan 1, 2003.
- SAE J2441 (2000) "Shot peening" Society of automotive Engineers, August.
- SAE J441, "Cut Wire Shot", SAE International. Última revisión en Octubre de 2013.
- SAE J442, "Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening". SAE International. Revisada en febrero de 2013.
- SAE J443, Procedures for Using Standard Shot Peening Almen Strip. SAE International. Última revisión en Junio de 2010.
- SAE J444, "Cast Shot and Grit Size Specifications for Peening and Cleaning". SAE International. Última revisión en septiembre de 2013.
- SAE J445, Metallic Shot and Grit Mechanical Testing, SAE International. Última revisión en Agosto de 2013.

- SAE J827, High-Carbon Cast-Steel Shot, SAE International. Última revisión en Octubre de 2013.
- Sanjurjo, P. (2012). Influencia del proceso de Shot peening en el comportamiento a fatiga de un acero inoxidable dúplex. Tesis. Universidad de Oviedo.
- Sanjurjo, P., et al. (2014) Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process. *Surface and Coatings Technology*, vol. 258, p. 822-831.
- Schiffner, K., et al. (1999). Simulation of residual stresses by shot peening. *Computers & structures*, vol. 72, no 1, p. 329-340.
- Schwarzer, Jochen; Schulze, Volker; Vohringer, Otmar. (2002). Finite element simulation of shot peening-a method to evaluate the influence of peening parameters on Surface characteristics. En *Proceedings from International Conference of shotpeening*.
- Shigley, J. (2004); Mischke, C.H. *Diseño en Ingeniería mecánica*, 7ª edición (5ª edición en español, Edit Mc. Graw- Hill).
- Soady K. A., et al. (2013) Evaluating surface deformation and near surface strain hardening resulting from shot peening a tempered martensitic steel and application to low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, vol. 54, p. 106-117.
- Tabor, David. (1948) A simple theory of static and dynamic hardness. En *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, p. 247-274.
- Taro, Mandikizinoyou; Chaise, Thibaut; Nélias, Daniel. (2015). A methodology to predict the roughness of shot peened surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 217, p. 65-76.
- Teleki, S. (2002) Enhancement of fatigue strength of SAE 9245 steel by shot peening. *Materials letters*, vol. 57, no 3, p. 604-608.
- Torres, M. A. S.; Voorwald, H. J. C. (2002). Anevaluation of shotpeening, residual stress and stress relaxationon the fatigue life of AISI 4340 steel. *International Journal of Fatigue*, vol. 24, no 8, p. 877-886.
- Turner, M. J., Dill, E. H., Martin, H. C., and Melosh, R.J., (1960). Large deflection analysis of complex structures subjected to heating and external loads, *J. Aero. Sci.*, 27, 97-107
- Turner, M. J., Martin, H. C., and Weikel, B. C. (1964). Further developments and applications of the stiffness method, in: B. M. Fraeijs de Veubeke (ed.) *Matrix Methods of Structural Analysis*, AGARDograph 72, Pergamon Press, Oxford, 203–266,

Referencias bibliográficas

UNE-EN-ISO 130:2002 Especificación geométrica de productos. Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos. 2002.

Usui E., Shirakshi, T., and Obikawa T. (1977). Simulation analysis of cutting fluid action. J. Japan Soc. Prec. Eng. 43 (9), 1063-1068.

Wagner, L. (1999) Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. Materials Science and Engineering: A, , vol. 263, no 2, p. 210-216.

Yang, Fan; CHEN, Zhuo; MEGUID, S. A. Effect of initial surface finish on effectiveness of shot peening treatment using enhanced periodic cell model. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2015, vol. 11, no 4, p. 463-478.

Yim, D. Y.; Kim, S. W. (1990) Optical roughness measurement of ground surfaces by light scattering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, , vol. 30, no 2, p. 283-289.

Zhang, Xiao-Hua; LIU, Dao-Xin. (2009). Effect of TiN/Ti multilayer on fretting fatigue resistance of Ti-811 alloy at elevated temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, no 3, p. 557-562.

Zienkiewicz, O. C; Taylor, R. L. (1994). El método de los elementos finitos. Volumen 1: Formulación básica y problemas lineales.

INDICE DE TABLAS

Tabla 2 1.-Tabla de clasificación de las placas Almen (SAE-J442).....	15
Tabla 2 2.- Criterios de aceptación de las partículas abrasivas según norma Standard SAE J444.	18
Tabla 4 1.- Propiedades estáticas (SANJURJO ET AL., 2014.).....	59
Tabla 4 2.- Propiedades a diferentes velocidades de deformación. (SANJURJO ET AL., 2014.)	59
Tabla 4 3.- Propiedades para el Modelo Johnson-Cook (SANJURJO ET AL., 2014.).....	60
Tabla 4 4.- Diferentes incrementos de deformación del ensayo cíclico. (PÉREZ ET AL., 2014.).....	60
Tabla 4 5.- Parámetros isotrópicos del modelo isotrópico-cinemático (Modelo Chaboche). (SANJURJO ET AL., 2014.).....	60
Tabla 4 6.- Parámetros cinemáticos del modelo isotrópico-cinemático (Modelo Chaboche) (SANJURJO ET AL., 2014.).....	60
Tabla 4 7.- Propiedades estáticas del material. (BAGHERIFARD ET AL., 2010).....	60
Tabla 4 8.- Parámetros cinemáticos del modelo isotrópico-cinemático (Modelo Chaboche) (BAGHERIFARD ET AL., 2010).....	60
Tabla 4 9.- Diferentes incrementos de deformación del ensayo cíclico(BAGHERIFARD ET AL., 2010).....	60
Tabla 6 1.- Tabla de los resultados del estudio de convergencia de malla en la zona de impacto.	81
Tabla 6 2.- Tiempos computaciones, para modelo de elementos finitos tipo, en función del número de bolas.	81
Tabla 7.1.- Valores de los parámetros obtenidos de las huellas generadas por la una bola impactando a distintas velocidades.	91
Tabla 7.2.- Semiejes (e_x y e_z de la elipse), profundidad de la huella y superficie de la elipse. Modelo MUB para los VRP.	95
Tabla 7.3.- Valores de los parámetros obtenidos de las huellas generadas por bolas de distintos diámetros.	96
Tabla 7.4.- Ecuaciones aproximadas para la determinación de la profundidad en función de la velocidad de la bola para distintos diámetros. (v en m/s y $\delta_{m\acute{a}x}$ en mm)	99
Tabla 8 1.- Valores experimentales de las tensiones residuales (SANJURJO ET AL., 2014).....	104
Tabla 8 2.- Número de bolas necesarias en función del grado de cobertura, del diámetro y de la velocidad.	106
Tabla 8 3.- Número de bolas necesarias en función del grado de cobertura, del diámetro y del ángulo de impacto.	106
Tabla 8 4.- Valores más relevantes de las tensiones residuales en función de la velocidad de las bolas.	113
Tabla 8 5.- Áreas generadas por los perfiles de compresión para cada ángulo de impacto Variación entre un ángulo de impacto y otro.	116
Tabla 8 6.- Áreas generadas por los perfiles de compresión para cada diámetro de bola. Variación entre un diámetro y otro.	118
Tabla 8 7.- Valores de las tensiones residuales de compresión máximas y profundidad a la que tienen lugar. % de variación de unos perfiles a otros.	118

Tabla 9 1.- “Parámetros de rugosidad” R_a y R_q de la huella generada por una bola de distintos diámetros al impactar sobre una muestra a diferentes velocidades de impacto.133

Tabla 9 2.- Parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , $\sigma_{máx}$ y $\delta_{\sigma_{máx}}$ en función de la velocidad de impacto, para cada diámetro de bola. (el resto de parámetros corresponden a los VRP)152

Tabla 9 3.- Parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_{sk} y R_{ku} , $\sigma_{máx}$ y $\delta_{\sigma_{máx}}$ en función del diámetro de bola, para cada velocidad de impacto. (98% de cobertura, 90° de ángulo de impacto)153

Tabla 9 4.- Valores de R_{sk} y R_{ku} para diámetros de bola de 0.4 mm y de 0.8 mm, con velocidades de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 m/s.....157

Tabla 9 5.- Ecuaciones aproximadas para la determinación de los parámetros de rugosidad R_a y R_q en función de la velocidad. (v en m/s y $R_a - R_q$ en μm).160

Tabla 9 6.- Niveles de rugosidad en función de R_a , según la normativa DIN-4769.....161

Tabla 9 7.- Criterios de rugosidad en el acabado superficial. UNE-EN-ISO 1302:2002162

Tabla 9 8.- Comparación de los valores de los parámetros de rugosidad para los dos tipos de malla...177

Tabla 9 9.- Valores de los parámetros de rugosidad partiendo de una superficie lisa y de superficies rugosas con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94. \mu\text{m}$; $V = 20 \text{ m/s}$182

Tabla 9 10.- Valores de los parámetros de rugosidad partiendo de una superficie lisa y de superficies rugosas con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94. \mu\text{m}$; $V = 40 \text{ m/s}$182

Tabla 9 11.- Valores de los parámetros de rugosidad partiendo de una superficie lisa y de superficies rugosas con $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$ y $R_a = 19.94. \mu\text{m}$; $V = 100 \text{ m/s}$183

INDICE DE FIGURAS

Figura 2 1.- Elementos del ensayo Almen. (SAE J442).....	15
Figura 2 2.- Curva de saturación en la medida de la intensidad Almen.....	16
Figura 3 1.- Imagen del primer modelo de simulación numérica en 3D. a) modelo de una bola; b) y c) modelo para varias bolas impactando sucesivamente sobre el mismo sitio (AL-HASSANI ET AL., 1999).....	27
Figura 3 2.- Modelo axil-simétrico en el que se muestra el refinamiento de la malla y del contacto bola-muestra (SCHIFFNER ET AL., 1999).	28
Figura 3 3.- Modelo 3D de impacto en esquina para un modelo cúbico de muestra y para una bola simulada como sólido rígido (MEGUID ET AL, 1999).....	28
Figura 3 4.- Modelos 2D y 3D desarrollados por HAN ET AL. (2000) en los que comparan el tratamiento de la bola como sólido elástico y como sólido discreto.	29
Figura 3 5.- Modelo 3D desarrollado por GAUGLIANO (2001).....	29
Figura 3 6.- Simulación realizada por MEGUID ET AL. (2001): a) Modelo de cobertura; b) Modelo de impacto de las bolas sobre la superficie del material.	30
Figura 3 7.- a) Modelo de simulación y b) sistema de cobertura propuesto por SCHWARZER ET AL. (2002)	31
Figura 3 8.- Modelo de simulación y de cobertura propuesto por LIEW Y ONG (2005).....	32
Figura 3 9.- Modelo de simulación y de cobertura secuencial empleado por MAJZOABI ET AL. (2005)	32
Figura 3 10.- Modelo 3D de Hong et al. e imagen de los proyectiles simulados por elementos discretos. (HONG ET AL., 2007).....	33
Figura 3 11.- Simulación numérica y gráfica del parámetro PV en función del número de impactos presentada por MAJZOABI ET AL. (2009)	34
Figura 3 12.- Modelo 3D en el que se observa el procedimiento aleatorio para la generación de los impactos. (MIAO ET AL., 2009).....	34
Figura 3 13.- Sistema de cobertura planteado por KANG ET AL. (2010).	35
Figura 3 14.- Modelo de simulación por elementos finitos y modelo de cobertura propuestos por BAGHERIFARD ET AL. (2010).	35
Figura 3 15.- Modelo elementos finitos utilizado por MYLONAS Y LABEAS (2011).en el que incorpora un sistema de cobertura aleatorio	36
Figura 3 16.- Modelo de elementos finitos y elementos discretos extraído del trabajo de JEBABI ET AL. (2016). Ángulo de impacto a) 90° y b) 45° grados.	39
Figura 3 17.- Imagen del sistema de cobertura propuesto por PHAM ET AL. (2017).	40
Figura 4 1.- Comparación criterio de Tresca y de Von Mises.(USUI ET AL. 1977).....	47
Figura 4 2.- Modelos de endurecimiento en dos dimensiones. Siendo σ_{iy} y σ_{fy} las tensiones de fluencia inicial y final. (USUI ET AL. 1977).	48
Figura 4 3.- Modelo de endurecimiento elasto-plástico. (KIM, 2015).....	52
Figura 4 4.- Esquema de endurecimiento isotrópico (LEMAITRE ET CHABOCHE, 1990).....	57
Figura 4 5.- Esquema de la variación de la tensión de fluencia para cada ciclo de carga.	57
Figura 4 6.- Esquema correspondiente al endurecimiento cinemático (LEMAITRE ET CHABOCHE, 1990) ..	58
Figura 7. 1.- Modelo 3D con una sola bola.	88
Figura 7.2.- Esquema de una huella con la orientación de los ejes, diámetro, semiejes y sentido de la deformación.....	89

<i>Figura 7.3.- Imagen del resultado de la simulación del modelo (MUB). Sección AB transversal sobre el plano YZ.</i>	89
<i>Figura 7.4.- Representación de las huellas para los modelos MJC y MCV. U2 es el desplazamiento de los nodos de la malla superficial en dirección 2 (esta dirección según la nomenclatura de Abaqus® corresponde con el eje Y).</i>	90
<i>Figura 7.5.- Huella producida por una bola impactando sobre la muestra a distintas velocidades para los VRP.</i>	91
<i>Figura 7.6.- Desplazamiento U2 – dirección Y. Simulación del modelo MUB para los VRP, con un ángulo de impacto de 60° respecto del eje Z.</i>	92
<i>Figura 7.7.- Secciones XY e YZ de la huella provocada para los VRP con 40° de ángulo de impacto.</i>	93
<i>Figura 7.8.- Secciones XY e YZ de la huella provocada para los VRP con 50° de ángulo de impacto.</i>	93
<i>Figura 7.9.- Secciones XY e YZ de la huella provocada con los VRP con 60° de ángulo de impacto.</i>	94
<i>Figura 7.10.- Secciones XY e YZ de la huella provocada con los VRP con 70° de ángulo de impacto.</i>	94
<i>Figura 7.11.- Secciones XY e YZ de la huella provocada para los VRP con 80° de ángulo de impacto.</i>	95
<i>Figura 7.12.- Secciones YZ de la huella producida por una bola para los VRP, y con diámetros de 0.4 mm, 0.8 mm y 1 mm de diámetro.</i>	96
<i>Figura 7.13.- Variación del diámetro de la huella generada por una bola en función de la velocidad para distintos diámetros de bola.</i>	97
<i>Figura 7.14.- Variación de la profundidad de la huella generada por una bola en función de la velocidad para distintos diámetros.</i>	98
<i>Figura 7.15.- Variación de la profundidad de la huella generada por una bola en función del ángulo de impacto para distintos diámetros.</i>	98
<i>Figura 8.1.- Modelo de simulación multi-impacto.</i>	104
<i>Figura 8.2.- Gráfica del número de bolas en función de la velocidad de impacto y del diámetro de la bola.</i>	107
<i>Figura 8.3.- Imagen de las capas de elementos finitos a 0.15 mm y 0.50 mm de profundidad en la zona de estudio del impacto.</i>	108
<i>Figura 8.4.- Perfiles numéricos y experimentales de las tensiones residuales (SANJURJO ET AL., 2014).</i>	109
<i>Figura 8.5.- Esquema con la nomenclatura de tensiones residuales y profundidad.</i>	109
<i>Figura 8.6.- Imágenes de dos simulaciones al 50% de cobertura. En ellas se aprecia el sistema estocástico.</i>	111
<i>Figura 8.7.- Imagen de simulación de SP para diferentes grados de cobertura. a) 50%; b) 70%; c) 85%; d) 98%.</i>	111
<i>Figura 8.8.- Variación de las tensiones residuales en función del grado de cobertura.</i>	112
<i>Figura 8.9.- Perfiles de las tensiones residuales para diferentes velocidades de impacto.</i>	113
<i>Figura 8.10.- Simulación de la tensión residual para diferentes velocidades. Sección sobre el plano central YZ. El resto de parámetros según los VRP.</i>	114
<i>Figura 8.11.- Tensiones residuales para los VRP, para diferentes ángulos de impacto.</i>	116
<i>Figura 8.12.- Perfil de las tensiones residuales para diámetros de 0.6, 0.8 y 1 mm, con un 98% de cobertura, una velocidad de 40 m/s, y con 90° de ángulo de impacto.</i>	118
<i>Figura 9.1.- Esquema para obtener el parámetro de rugosidad Ra. (GADELMAWLA ET AL. 2002).</i>	125
<i>Figura 9.2.- Esquema para obtener el parámetro de rugosidad Rz (GADELMAWLA ET AL. 2002).</i>	126
<i>Figura 9.3.- Representación del parámetro de rugosidad Rsk para dos superficies distintas, pero con el mismo Ra (GADELMAWLA ET AL. 2002).</i>	127
<i>Figura 9.4.- Representación del parámetro de rugosidad Rku (kurtosis) para dos superficies distintas. (GADELMAWLA ET AL. 2002).</i>	128

Figura 9 5.-Esquema para la obtención de otros parámetros de rugosidad. (GADELMAWLA ET AL. 2002).	130
Figura 9 6.-Representación del parámetro de rugosidad S_m . (GADELMAWLA ET AL. 2002).	130
Figura 9 7.- Perfil de rugosidad de las líneas de la superficie indicadas en la imagen inferior, tras ser sometida a un proceso de SP tomando los VRP.	132
Figura 9 8.- Simulación numérica de la rugosidad superficial correspondiente a la muestra después de un proceso de SP (tomando en la simulación los VRP para una velocidad impacto de 20 m/s).	132
Figura 9.9.- Graficas de las evolución del parámetros R_a en función de la velocidad de impacto, correspondiente a la huella generada por una sola bola de distintos diámetros (%C = 98).	134
Figura 9.10.- Graficas de las evolución del parámetros R_q en función de la velocidad de impacto, correspondiente a la huella generada por una sola bola de distintos diámetros (%C = 98).	134
Figura 9.11.- Graficas de las evolución del parámetros R_a en función del diámetro de las bolas, correspondiente a la huella generada por una sola bola impactando a distintas velocidades (%C = 98).	135
Figura 9.12.- Graficas de las evolución del parámetros R_q en función del diámetro de las bolas, correspondiente a la huella generada por una sola bola impactando a distintas velocidades (%C = 98).	135
Figura 9.13.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP a velocidades de 20, 60 y 100 m/s.	137
Figura 9.14.- Variación de los parámetros de rugosidad R_a y R_q con la velocidad de impacto.	137
Figura 9.15.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la velocidad de las bolas.	138
Figura 9.16.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la velocidad de las bolas.	139
Figura 9 17.- Perfiles de rugosidad 2D en el eje central Z de la superficie de impacto, obtenidos para varias velocidades de impacto (valores de referencia VRP).	140
Figura 9.18.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP, para ángulos de impacto de 50°, 60° y 80°.	141
Figura 9.19.- Evolución de los parámetros de rugosidad R_a y R_q para ángulos de impacto de 50°, 60°, 70°, 80° y 90° (parámetros VRP).	141
Figura 9 20.- Evolución del parámetro R_{sk} en función del ángulo de impacto.	142
Figura 9.21.- Evolución del parámetro R_{ku} en función del ángulo de impacto.	143
Figura 9 22.- Perfiles de rugosidad 2D, para varios ángulos de impacto, en el eje Z de la superficie. ..	143
Figura 9.23.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP para diámetros de bola de 0.6, 0.8 y 1.0 mm.	145
Figura 9.24.- Evolución de los parámetros de rugosidad R_a y R_q para diámetros de bola de 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 1.2 mm.	145
Figura 9.25.- Evolución del parámetro R_{sk} en función del diámetro de las bolas.	146
Figura 9 26.- Evolución del parámetro R_{ku} en función del diámetro de las bolas	147
Figura 9 .27.- Perfiles de rugosidad 2D, para diferentes diámetros de bolas, en el eje central Z de la superficie	147
Figura 9.28.- Imágenes de la simulación numérica de la rugosidad de la superficie de la muestra después del proceso de SP para diferentes grados de cobertura.	148
Figura 9.29.- Graficas de la evolución de los parámetros de rugosidad R_a y R_q para 50, 98, 200, 250,300 y 400 % de cobertura.	149
Figura 9 30.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la cobertura.	150
Figura 9.31.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la cobertura.	151
Figura 9 32.- Perfiles de rugosidad 2D, con distintos grados de cobertura, en el eje central Z de la superficie.	152
Figura 9.33.- Variación del parámetro de rugosidad R_a con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.	155
Figura 9 34.- Variación del parámetro de rugosidad R_q con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.	155

<i>Figura 9.35.- Variación del parámetro de rugosidad R_{sk} con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 9.36.- Variación del parámetro de rugosidad R_{ku} con el diámetro de las bolas para distintas velocidades de impacto.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 9.37.- Variación del parámetro de rugosidad R_a con la velocidad de impacto para distintos diámetros de bola.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 9.38.- Variación del parámetro de rugosidad R_q para con la velocidad de impacto para distintos diámetros de bola.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 9.39.- Variación del parámetro de rugosidad R_{sk} con la velocidad de impacto de las bolas para distintos diámetros de bola.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 9.40.- Variación del parámetro de rugosidad R_{ku} con la velocidad de impacto para distintos diámetros de bola.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 9 41.- Imagen de la superficie rugosa desarrollada para el modelo 3D sobre la malla. $R_a = 3.02\mu m$.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 9 42.- Tensiones residuales S_{11} para el modelo 3D sin rugosidad y con una rugosidad $R_a = 3.02\mu m$).....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 9 43 .- Evolución del parámetro de rugosidad R_a en función del grado de cobertura. Comparación de resultados partiendo de superficies inicialmente lisa y rugosa ($R_a = 3.02\mu m$).</i>	<i>165</i>
<i>Figura 9 44.- Evolución del parámetro de rugosidad R_q en función del grado de cobertura. Comparación de resultados partiendo de superficies inicialmente lisa y rugosa ($R_a = 3.02\mu m$).</i>	<i>165</i>
<i>Figura 9 45.- Imágenes de la evolución de la rugosidad de la superficie, inicialmente rugosa, con diferentes grados de cobertura.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 9 46.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la cobertura para superficie inicial lisa y rugosa</i>	<i>166</i>
<i>Figura 9 47.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la cobertura para superficie inicial lisa y rugosa</i>	<i>167</i>
<i>Figura 9 48.- Perfil 2D que muestra la variación de la rugosidad en función del grado de cobertura... 167</i>	<i>167</i>
<i>Figura 9 49.- Gráfica con la variación del parámetro R_a en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.</i>	<i>168</i>
<i>Figura 9 50.- Gráfica con la variación del parámetro R_q en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.</i>	<i>169</i>
<i>Figura 9.51.- Gráfica con la variación del parámetro R_{sk} en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.</i>	<i>169</i>
<i>Figura 9.52.- Gráfica con la variación del parámetro R_{ku} en función de la cobertura para una velocidad de impacto de 100m/s.</i>	<i>170</i>
<i>Figura 9 .53.- Perfil 2D que muestra la variación de la rugosidad en función del grado de cobertura. 170</i>	<i>170</i>
<i>Figura 9.54.- Imagen del modelo de superficie rugosa con un $R_a = 10.02\mu m$.....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 9.55.- Evolución del parámetro de rugosidad R_a en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_a = 10.02\mu m$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 9.56.- Evolución del parámetro de rugosidad R_q en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_q = 11.65\mu m$ tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 9.57.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{sk} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{sk} = 0.191$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s.....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 9.58.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{ku} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{ku} = 1.872$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 20 m/s</i>	<i>174</i>
<i>Figura 9.59.- Perfil 2D que muestra la variación de la rugosidad en función del grado de cobertura... 175</i>	<i>175</i>

Indice de figuras

Figura 9.60.- Imagen de la rugosidad en la zona de impacto para $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, $R_q = 23.04 \mu\text{m}$ $R_{sk} = 0.075$ y $R_{ku} = 1.79$	176
Figura 9.61.- Perfil de las tensiones residuales para los dos tipos de mallas.	177
Figura 9.62.- Evolución del parámetro de rugosidad R_a en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.....	178
Figura 9.63.- Evolución del parámetro de rugosidad R_q en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_q = 23.04 \mu\text{m}$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.....	178
Figura 9.64.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{sk} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{sk} = 0.086$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.....	179
Figura 9.65.- Evolución del parámetro de rugosidad R_{ku} en función de la cobertura, para una superficie lisa y una rugosa con un $R_{ku} = 1.8$, tomando como parámetros de referencia los VRP, con una velocidad de impacto de 40 m/s.	179
Figura 9.66.- Perfil 2D que muestra la variación de la superficie rugosa en función del grado de cobertura.	180
Figura 9.67.- Imagen de la superficie de impacto con rugosidad inicial de $R_a = 19.94 \mu\text{m}$, cuando las bolas impactan a una velocidad de 40 m/s ó de 20 m/s.....	181
Figura 9.68.- Evolución del parámetro R_a en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_a = 0$, $R_a = 3.02 \mu\text{m}$, $R_a = 10.02 \mu\text{m}$, $R_a = 19.94 \mu\text{m}$	184
Figura 9.69.- Evolución del parámetro R_q en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_q = 0$, $R_q = 3.47 \mu\text{m}$, $R_q = 11.58 \mu\text{m}$, $R_q = 23.04 \mu\text{m}$	184
Figura 9.70.- Evolución del parámetro R_{sk} en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_{sk} = 0$, $R_{sk} = 0.008$, $R_{sk} = 0.07$, $R_{sk} = -0.021$	185
Figura 9.71.- Evolución del parámetro R_{ku} en función de la velocidad (20, 40, 100 m/s) partiendo de rugosidades iniciales de: $R_{ku} = 0$, $R_{ku} = 1.787$, $R_{ku} = 1.8$, $R_{ku} = 1.806$	185

SIMBOLOS LATINOS

AISI	American Institute of Iron and Steel.
Ar	Número de impactos/superficie de la zona de impacto.
b	Velocidad de cambio de la superficie de fluencia. (Modelo de comportamiento del material de Chaboche)
C	Cobertura
C3D8R	Nomenclatura de elemento finito de 3 dimensiones formado por 8 nodos unidos linealmente con reducción de integración (Abaqus, 2017)
CAE	Computer Aided Engineering
CBT	Corrosión bajo tensión
CIN3D8	Nomenclatura de elemento infinito de 3 dimensiones formado por 8 nodos unidos linealmente. (Abaqus, 2017)
DDRS	Dynamic Data Rate Selection
E	Módulo de Young
EN	Normas europeas
f_u	Tensión última
f_y	Tensión de fluencia
H	Módulo de plasticidad.
ISO	International Organization for Standardization
Q_∞	Máximo valor de la superficie de fluencia. (Modelo de comportamiento del material de Chaboche)
K	Matriz de rigidez
Kt	Factor de concentración geométrica de tensiones.
LSP	Láser shot peening
M	Matriz de masa.
MC	Modelo de comportamiento del material combinado.
MC	Modelo de comportamiento del material combinado.
MCV	Modelo de comportamiento del material combinado con velocidad de deformación
MCV	Modelo de comportamiento del material combinado con velocidad de deformación.
MJC	Modelo de comportamiento del material de Johnson-Cook
MJC	Modelo de comportamiento del material de Johnson-Cook.
MUB	Modelo de simulación numérica 3D en el que sólo impacta una bola sobre la muestra.
N	Número de bolas.
R^2	Factor de coorelación.
R_a	Parámetro de rugosidad. Desviación absoluta media de las irregularidades respecto de la línea media
RAM	Random Access Memory
R_{ku}	Parámetro de rugosidad. Describe la nitidez de la densidad de probabilidad del perfil.
$R_{m\acute{a}x}$	Parámetro de rugosidad. Distancia vertical entre el pico más alto y el valle más bajo.
R_p	Parámetro de rugosidad. Altura máxima del perfil por encima de la línea media
R_{pm}	Parámetro de rugosidad. Altura media máxima de los picos
R_q	Parámetro de rugosidad. Promedio cuadrático de las irregularidades respecto de la línea media
R_{sk}	Parámetro de rugosidad. Simetría del perfil respecto la línea media
RSP	Re-shot peening
R_{tm}	Parámetro de rugosidad. Valor medio de picos en una zona de medida de un perfil rugoso de la superficie de un material.
R_{tm}	Parámetro de rugosidad. Valor medio de un pico (o valle) en una zona concreta de medida
R_v	Parámetro de rugosidad. Profundidad máxima del perfil por debajo de la línea media
R_{vm}	Parámetro de rugosidad. Profundidad media máxima de valles
R_z	Parámetro de rugosidad. Diferencia de altura entre el promedio de los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos
SAE	Society of automotive engineers
S_m	Parámetro de rugosidad. Distancia media entre picos en una zona de medida de un perfil rugoso de la superficie de un material.
S_m	Parámetro de rugosidad. Separación media entre picos consecutivos

Símbolos latinos

SP	Shot peening
SPH	Smoothed particle hydrodynamics
SPH	Smoothed particle Hydrodynamics.
S_t	Parámetro de rugosidad. Factor de escalonamiento. Relación entre la altura media aritmética (R_a) y la separación media del perfil.
UNE	Una norma española
USP	Ultrasonic shot peening
V	Velocidad
VRP	Valores de referencia de los parámetros del SP (40 m/s de velocidad de impacto, 0.8 mm de diámetro; 90° de ángulo de impacto, 98% de cobertura).
W_t	Parámetro de rugosidad. Factor de ondulación. Relación entre el rango total de todo el perfil y la altura media aritmética (R_a):
X	Tensión de retorno (Modelo de comportamiento del material de Chaboche)

SIMBOLOS GRIEGOS

α	Tensión de retorno
β	Coefficiente de endurecimiento.
δ_0	Profundidad cero
$\delta_{m\acute{a}x}$	Profundidad máxima.
$\dot{\epsilon}^p$	Velocidad de deformación plástica equivalente.
$\bar{\epsilon}_p$	Deformación plástica equivalente.
ϵ_{ln}^{pl}	Deformación plástica logarítmica
e_p	Deformación plástica.
η	Tensión desviadora
μ	Coefficiente de Poisson
$\sigma _0$	Tensión en el límite de fluencia cuando la tensión plástica es nula.
σ_0	Tensión residual en la superficie.
$\bar{\sigma}$	Tensión equivalente
σ_1	Tensión en dirección del eje x.
σ_2	Tensión en dirección del eje y.
σ_{fy}	Tensión de fluencia final.
σ_{iy}	Tensión de fluencia inicial.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensión residual máxima.
σ_{nom}	Tensión nominal
σ_{true}	Tensión de Cauchy.
σ_y^0	Tensión de fluencia en el estado inicial.
σ_y	Tensión de fluencia
τ	Tensión cortante.
ϕ	Diámetro.
$\Delta\epsilon$	Incremento de la deformación unitaria.