

Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo: Fabricación aditiva mediante sinterizado láser de polvos de acero inoxidable martensítico AISI 420.

Entidad colaboradora: Fundación Prodintec.

Tutor industrial o externo: D. Manuel Antonio García García.

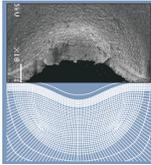
Departamento: Tecnologías de fabricación.

Tutor académico: D. Francisco Javier Belzunce Varela.

Departamento: Ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica.

Universidad de Oviedo

Julio de 2014



***Máster interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras***

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo: Fabricación aditiva mediante sinterizado láser de polvos de acero inoxidable martensítico AISI 420.

Firma

*D. Manuel Antonio García
García*

Firma

*D. Francisco Javier Belzunce
Varela*

Firma

*D. Sergio Vega
Nava*

Universidad de Oviedo

Julio de 2014

Índice.

CAPÍTULO 1: Introducción	4
CAPÍTULO 2: Fabricación aditiva mediante fusión con láser	6
2.1- Fusión selectiva mediante láser	7
2.2- Parámetros de la fabricación mediante SLM	11
CAPÍTULO 3: Procedimiento experimental	18
3.1- Probetas y proceso de fabricación	19
3.2- Técnicas de ensayo	25
• 3.2.1- Rugosidad.	25
• 3.2.2- Tensiones residuales.....	26
• 3.2.3- Porosidad.....	26
• 3.2.4- Dureza.....	28
• 3.2.5- Microestructura	29
• 3.2.6- Propiedades mecánicas	29
CAPÍTULO 4: Resultados.....	30
4.1- Probetas en estado bruto de fabricación.....	31
• 4.1.1- Rugosidades	31
• 4.1.2- Tensiones residuales.....	32
• 4.1.3- Porosidad.....	33
• 4.1.4- Dureza Vickers	35
• 4.1.5- Microestructura	38
• 4.1.6- Propiedades mecánicas a tracción.....	41
4.2- Probetas tras temple y revenido a 300°C.....	42
• 4.2.1- Rugosidad	42
• 4.2.2- Tensiones residuales.....	43
• 4.2.3- Porosidad.....	44
• 4.2.4- Dureza Vickers	45
• 4.2.5- Microestructura	46

• 4.2.6- Propiedades mecánicas a tracción.....	47
4.3- Probetas tras temple y revenido a 450°C.....	48
• 4.3.1- Rugosidad	48
• 4.3.2- Tensiones residuales.....	49
• 4.3.3- Porosidad.....	49
• 4.3.4- Dureza Vickers	51
• 4.3.5- Microestructura	52
• 4.3.6- Propiedades mecánicas a tracción.....	53
4.4- Probeta 3	54
• 4.4.1- Rugosidad	54
• 4.4.2- Porosidad.....	55
• 4.4.3- Microestructura.....	56
4.5- Probeta 4	57
• 4.5.1- Rugosidad	57
• 4.5.2- Porosidad.....	58
• 4.5.3- Microestructura	60
4.6- Probeta 5	61
• 4.6.1- Rugosidad.	61
• 4.6.2- Porosidad.....	61
• 4.6.3- Microestructura.....	63
4.7- Probeta 6	64
• 4.7.1- Rugosidad	64
• 4.7.2- Porosidad.....	64
• 4.7.3- Microestructura.....	66
CAPÍTULO 5: Discusión de los resultados	68
CAPÍTULO 6: Conclusiones	77
CAPÍTULO 7: Presupuesto	79
CAPÍTULO 8: Bibliografía	81

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

En este Trabajo Fin de Máster se llevó a cabo la caracterización del acero inoxidable martensítico AISI 420, obtenido a través de fabricación aditiva mediante fusión con láser.

La técnica de fabricación utilizada fue la fusión selectiva láser (SLM, Selective Laser Melting). Esta es una tecnología de fabricación de piezas metálicas a partir de polvo metálico, que ha experimentado una gran expansión a nivel industrial en los últimos años, debido a su facilidad para fabricar piezas con geometría compleja.

El acero AISI 420 se utilizará en la fabricación de moldes para inyección de plásticos, necesitándose para esta aplicación una dureza de al menos 50 HRC, a la temperatura de trabajo, siendo esta del orden de unos 250°C.

Para conseguir las características deseadas, se han fabricado diferentes probetas, utilizando diferentes parámetros de fabricación, sobre las que también se realizaron diferentes tratamientos térmicos. Las probetas obtenidas, probetas cúbicas y probetas de tracción, se utilizaron para la caracterización mecánica y microestructural del material.

En el capítulo 2 de esta memoria se ha realizado en primer lugar una breve introducción de los procesos de fabricación SLM, donde también se indican los parámetros de fabricación que influyen en la calidad de las piezas construidas mediante esta tecnología. Posteriormente, en el capítulo 3, se describen los parámetros utilizados para la fabricación de las distintas probetas, así como la forma en que se llevaron a cabo los diferentes ensayos utilizados para caracterizar el material. Seguidamente, en el capítulo 4 se presentan todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados, en el capítulo 5 se procede a realizar una discusión de los resultados obtenidos y en el capítulo 6 se resumen las conclusiones del trabajo.

Finalmente, esta memoria se terminará con la relación de las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo de todo el trabajo y con un breve presupuesto del mismo.

CAPÍTULO 2: FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE FUSIÓN CON LÁSER.

2.1- Fusión selectiva mediante láser.

En 1987 Carl Deckard, profesor de la Universidad de Texas (Austin, EE.UU.), desarrolló la sinterización selectiva láser (SLS, Selective Laser Sintering), para la fabricación de prototipos de plástico.

Posteriormente, en 1992, la DTM Corporation (Texas, EE.UU.) comercializó la primera máquina de SLS. A partir de aquí, la SLS se convirtió en una tecnología común para la producción no solo de prototipos, sino también para la fabricación de productos para uso final. Más recientemente, el interés se ha focalizado en la fabricación, mediante este tipo de tecnología, de piezas metálicas, debido a la capacidad de producir geometrías complejas.

La fusión selectiva láser (SLM, Selective Laser Melting) es una tecnología de fabricación aditiva, capaz de producir piezas tridimensionales de formas complejas, a partir de polvo metálico, utilizando energía láser.

Para la fabricación de las piezas, se ha de realizar previamente un modelo CAD de dichas piezas, que se debe trocear matemáticamente en finas capas, representando cada una de esas capas una sección transversal de la pieza.

Durante la fabricación de las piezas, se cubre la zona de fabricación con una fina capa de polvo y el rayo láser escanea la superficie de la misma en función del modelo CAD de las piezas. La interacción del rayo láser con la capa de polvo hace que se alcance el punto de fusión, provocando la fusión selectiva y posterior consolidación del polvo metálico, produciéndose de esta manera la unión entre las partículas de polvo y la unión de la capa que está siendo escaneada, con la capa inmediatamente inferior, que lo ha sido previamente.

En la Figura 1 se representa de manera esquemática lo indicado anteriormente, mostrándose como se parte de un modelo CAD, el cual se trocea en capas y como las capas se superponen durante la fabricación, para formar finalmente la pieza deseada. También se muestra un esquema de la máquina de SLM, con los componentes principales de la misma.

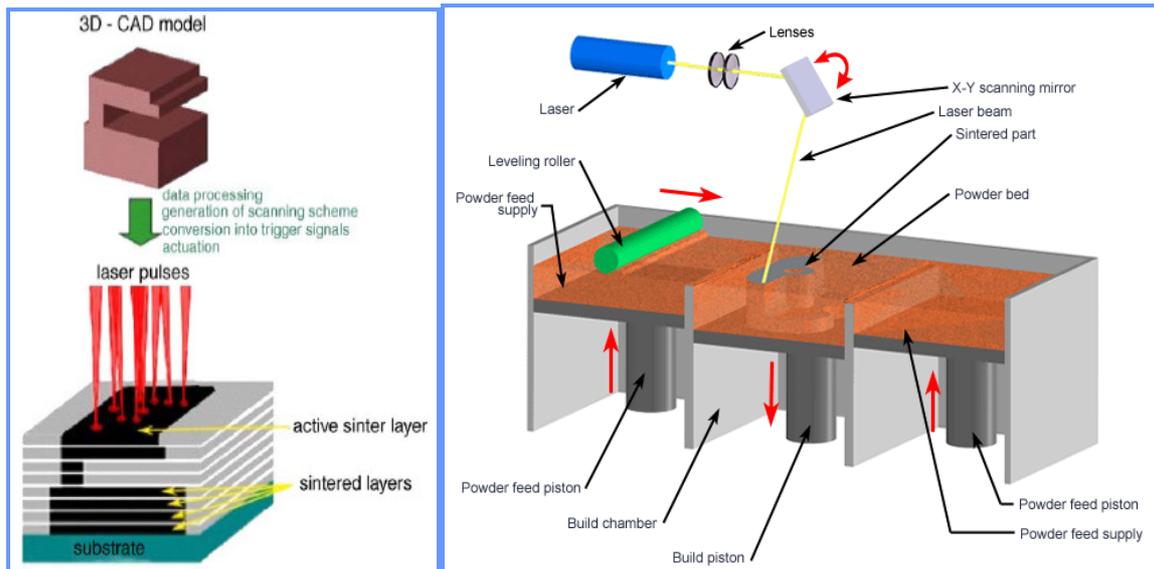


Figura 1: Esquema del método SLM.

Una vez que una capa ha sido escaneada y se ha consolidado, la plataforma de construcción desciende una distancia igual al espesor de capa que se ha elegido para el troceado del modelo CAD. A continuación se deposita una nueva capa de polvo, tras lo cual el rayo láser escanea la superficie de la nueva capa, en función de la geometría que en el modelo CAD tiene esa capa. Después de esto, se deposita una nueva capa de polvo y el proceso se repite hasta que la pieza es completada (Figura 2).

Esta construcción de las piezas capa a capa hace posible la fabricación de piezas de geometría compleja, directamente a partir del modelo CAD, sin necesidad de un mecanizado posterior.

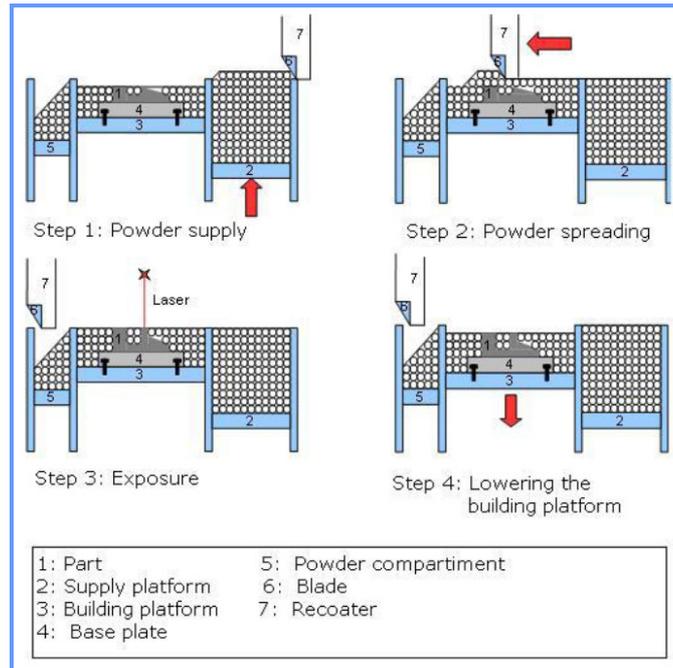


Figura 2: Esquema del proceso de fabricación mediante SLM.

Para la fabricación de las piezas mediante SLM, en cada una de las capas, se realiza en primer lugar la consolidación por láser del contorno de su sección. Esta primera exposición consiste en una única pasada del rayo láser, de manera que se define el contorno de la pieza en esa sección concreta y se evitan así las posibles distorsiones que se podrían generar durante la exposición del núcleo de esa sección.

Una vez realizada la exposición del contorno, se procede a realizar la exposición del núcleo de la sección correspondiente a la capa que está siendo escaneada. En este caso, el núcleo se expone siguiendo una determinada estrategia de escaneo, que se ha de definir previamente.

Por último, tras la exposición del núcleo y con el fin de conseguir una mejor definición de la geometría de la pieza, se realiza una nueva exposición del contorno (post-contorno), que al igual que la exposición previa consiste en una única pasada.

Para conseguir una buena precisión dimensional, tanto en las exposiciones del contorno, como en las del núcleo, el rayo láser debe situarse a una determinada distancia respecto al contorno nominal, denominada “beam offset”, con el fin de compensar el diámetro efectivo del láser. En la Figura 3 se

muestra gráficamente el beam offset, así como otros parámetros como el espaciado entre pasadas o “hatching distance” y el solape (“overlap”).

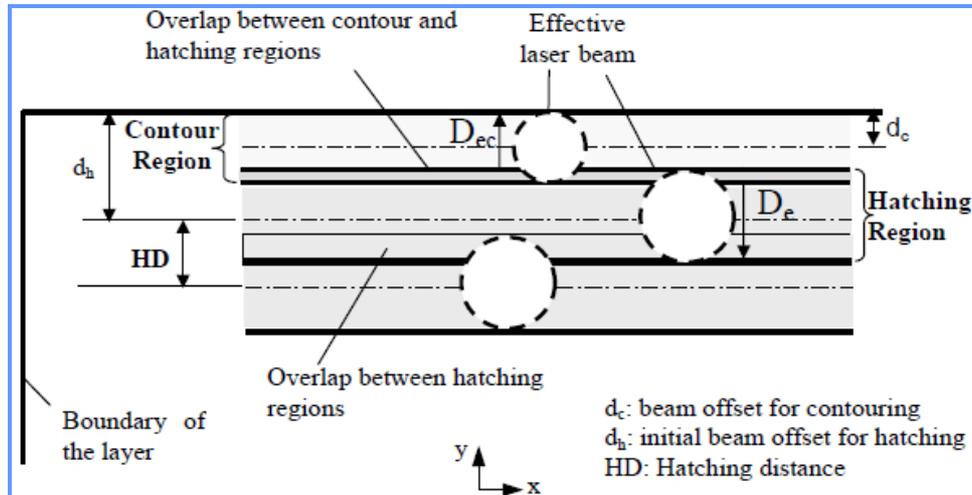


Figura 3: Vista esquemática de parámetros de exposición.

De manera general, las exposiciones del contorno y del núcleo suelen realizarse utilizando diferentes parámetros de exposición (velocidad, potencia, beam offset, solape), pudiendo a su vez diferir los parámetros de exposición de las dos exposiciones del contorno (inicial y final). A su vez, las capas o parte de estas, que en la pieza correspondan a zonas superficiales de la pieza final, bien inferiores o superiores, podrán ser expuestas utilizando igualmente parámetros diferentes, con el fin de lograr una mejor calidad superficial.

En vista de todo lo anterior, la fabricación de piezas mediante SLM es una alternativa interesante a los procesos convencionales, ya que permite la fabricación de piezas con geometría compleja y propiedades comparables a las de los materiales fabricados de manera convencional (productos moldeados). Además, una de sus principales ventajas es la minimización de las pérdidas de material, debido a que no es necesario aplicar ningún mecanizado posterior y además, el polvo sobrante (no consolidado por el láser) se recicla y reutiliza, lo que supone un ahorro en materias primas significativo.

Por otro lado, al igual que cualquier tecnología, la SLM tiene una serie de inconvenientes. Los principales inconvenientes son la presencia de una cierta porosidad, la baja calidad superficial y la presencia de tensiones residuales que pueden ser importantes, en virtud de los grandes gradientes térmicos que se

generan, lo cual puede desembocar en distorsiones, roturas o deslaminaciones en las piezas.

Por último, señalar que debido a la fabricación de las piezas capa a capa, el comportamiento de las piezas es anisótropo, obteniéndose normalmente los peores valores de resistencia y elongación en la dirección de construcción. Por otro lado, en direcciones perpendiculares a la de construcción, debido al pequeño tamaño de grano característico de estos procesos SLM, se obtienen valores de límite elástico y de la resistencia a la tracción similares o incluso ligeramente superiores, a los obtenidos mediante otros medios de fabricación convencionales.

En lo que respecta a la tenacidad, debido a la presencia de poros en las piezas fabricadas utilizando la tecnología aquí indicada, esta suele ser inferior a la de las piezas fabricadas mediante tecnologías convencionales, no siendo en este caso muy influyente la dirección de construcción, siempre que haya un buen solape entre las capas.

Debe indicarse también, que conforme se disminuye el espesor de la capa, debido al mayor solape entre ellas, se atenúa el comportamiento anisotrópico del material.

2.2- Parámetros de la fabricación mediante SLM.

El proceso de fabricación por SLM se basa en intensos calentamientos locales, transferencias de masa, reacciones químicas, enfriamientos igualmente intensos, transformaciones de fase, etc., lo que hace que sea un proceso muy complejo. Esto hace que la calidad de las piezas fabricadas dependa mucho del conocimiento empírico previo adquirido por el operador.

Además de lo anterior, el proceso está definido por una gran cantidad de parámetros (Figura 4), cuya interacción no siempre está clara. Los parámetros que más influyen en la calidad de las piezas fabricadas mediante SLM son:

- Diámetro del láser (D).
- Potencia del láser (P).
- Velocidad de escaneo (v).

- Espaciado entre las pasadas o “hatching distance” (d).
- Espesor de las capas (h).
- Estrategia de exposición.
- Características de los polvos.
- Temperatura inicial en la cámara de fabricación.
- Atmósfera de la cámara de fabricación.
- Material constitutivo del sustrato sobre el que se realiza la construcción.

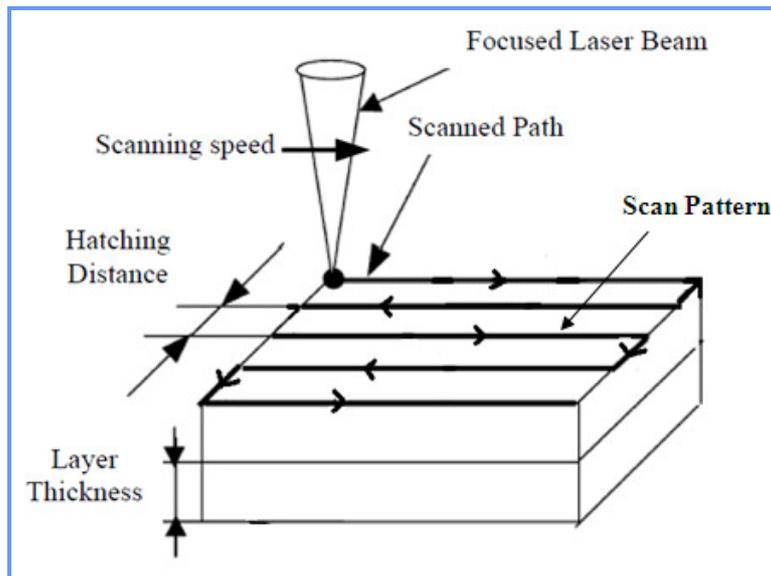


Figura 4: Parámetros de exposición.

A continuación se intentará resumir, recogiendo sucintamente lo publicado por distintos autores, como influyen los distintos parámetros en la calidad de las piezas (densidad, rugosidad, tensiones residuales, propiedades mecánicas, etc.).

El objetivo de la SLM es obtener piezas metálicas compactas a partir de polvos, con densidades relativas de prácticamente el 100%. La densidad final de la pieza será función de la energía suministrada por unidad de volumen a la capa de polvo, que se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$E = \frac{P}{v \cdot d \cdot h} \quad (1)$$

- P: potencia.
- v: velocidad de escaneo.

- d: espaciado entre pasadas.
- h: espesor de las capas.

La densidad de la pieza aumenta normalmente al aumentar la energía puesta en juego, por lo que la densidad aumentará al aumentar la potencia y/o al disminuir la velocidad de exposición, el espesor de capa y el espaciado entre pasadas.

Este aumento de densidad debido al aumento de la energía suministrada se justifica en virtud de la mayor temperatura local desarrollada, que a su vez se traduce en la disminución de la viscosidad del baño fundido, lo que mejora la mojabilidad, permitiendo esto una mejor unión entre los distintos caminos de fusión.

De cualquier manera, se ha de tener en cuenta que cada material tiene un valor de energía límite, por encima del cual se produce una disminución de la densidad final de la pieza, ya que el exceso de temperatura causa la inestabilidad del baño fundido, aumentando significativamente la rugosidad de las capas, dificultando así la deposición de una capa uniforme posterior. Por otro lado, cuando se utilizan muy bajas energías o altas velocidades de escaneo, la temperatura máxima obtenida es insuficiente, la viscosidad del baño fundido es demasiado baja y se generan caminos de fusión formados por esferas sin suficiente conexión entre ellas (efecto "balling").

En la densidad, además de la energía suministrada, también influye la estrategia de escaneo, mejorándose la densidad del producto si las capas sucesivas se exponen alternativamente en direcciones perpendiculares, tal y como se indica en la Figura 5, ya que esto evitará la alineación de los inevitables poros. Para una determinada estrategia de escaneo, la densidad del producto será tanto mayor cuanto menores sean las longitudes de los caminos de escaneo, ya que cuanto mayores son las longitudes citadas, los caminos escaneados previamente sufren un mayor enfriamiento, lo que empeora la mojabilidad y por lo tanto la conexión entre ellos.

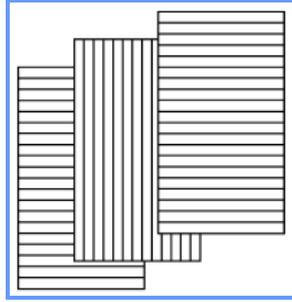


Figura 5: Exposición alternativa de capas en direcciones perpendiculares.

Por último, en lo que atañe a la densidad, también son importantes las características del polvo metálico utilizado, consiguiéndose mejores densidades cuanto más uniforme es la distribución granulométrica, necesitándose a su vez una granulometría lo más fina posible, ya que cuanto menor es el tamaño de la partícula mayor es la superficie específica para absorber la energía del láser. Por otro lado, la forma de las partículas también influye aunque ya mas ligeramente en la densidad obtenida, siendo mejor la utilización de partículas lo más esféricas posibles, que se obtienen mediante procesos de atomización con gas.

En lo que respecta a la calidad superficial, ésta mejora cuando se disminuye la velocidad y el espaciado entre pasadas, por lo que para evitar fenómenos de balling y elevados gradientes térmicos que generen grandes distorsiones, se ha de disminuir también la potencia del láser.

La estrategia de escaneo también influye en la calidad superficial, mejorándose ésta cuando se utilizan estrategias de escaneo en forma de tablero de ajedrez, ya que se genera una mejor distribución térmica, además de conseguir una rugosidad más uniforme, mientras que con la estrategia de exposición estándar las diferencias en la rugosidad obtenida en el lado de inicio de exposición, frente al lado de final de la misma son mayores.

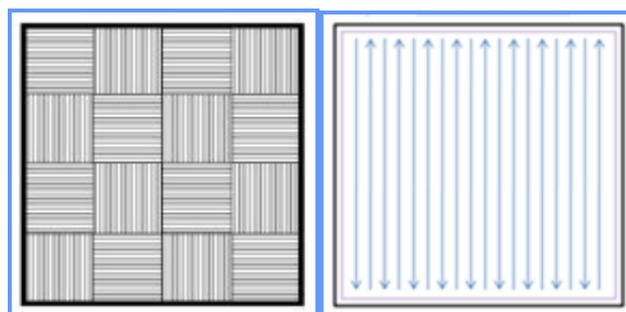


Figura 6: Estrategia de escaneo en tablero de ajedrez (izq.) y estándar (dcha.).

Las tensiones residuales es otro de los principales problemas de la SLM. Estas tensiones son debidas a los grandes gradientes térmicos que se generan, pudiendo dar lugar a distorsiones, deslaminaciones, agrietamientos y a una indeseable disminución de la resistencia mecánica del material.

Las tensiones residuales dependen principalmente de la estrategia de escaneo, consiguiéndose menores tensiones con una estrategia de escaneo de tablero de ajedrez, en la que los cuadros adyacentes son escaneados de manera alternativa en las direcciones X e Y (véase la Figura 7 izq.). Dentro de la estrategia de escaneo en tablero de ajedrez, es mejor que los cuadros se escaneen de manera consecutiva, que siguiendo un patrón LHI (least heat influence) (Figura 7 dcha.).

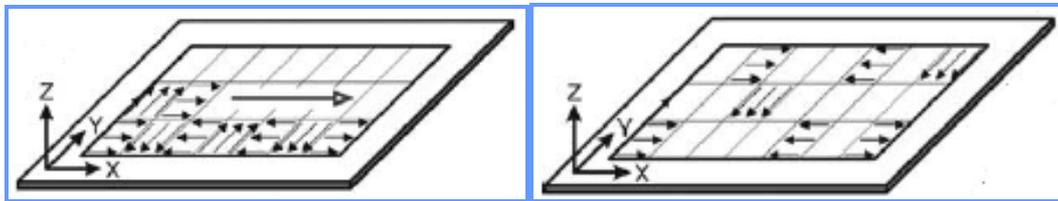


Figura 7: Estrategias de escaneo, tablero de ajedrez consecutivo (izq.) y patrón LHI (dcha.).

La longitud de los caminos de escaneo, así como la orientación de las sucesivas capas también influyen en las tensiones residuales. En lo que respecta al camino de escaneo, se obtienen menores tensiones cuanto menor es la longitud del camino de escaneo, produciéndose una gran disminución cuando la longitud del camino de escaneo es inferior a 10 mm. En cuanto a la orientación, la mayor disminución de las tensiones residuales cuando se emplea una estrategia de escaneo en tablero de ajedrez, se produce cuando se aplica un giro de 45° entre las sucesivas capas.

En la Figura 8 se indica el giro en la dirección de escaneo de las distintas capas (β), así como una comparación entre el uso de grandes longitudes de camino de escaneo y pequeñas longitudes, indicándose que cuando se utilizan longitudes menores, la temperatura es mayor, produciéndose menores gradientes de temperatura entre los diferentes caminos de escaneo.

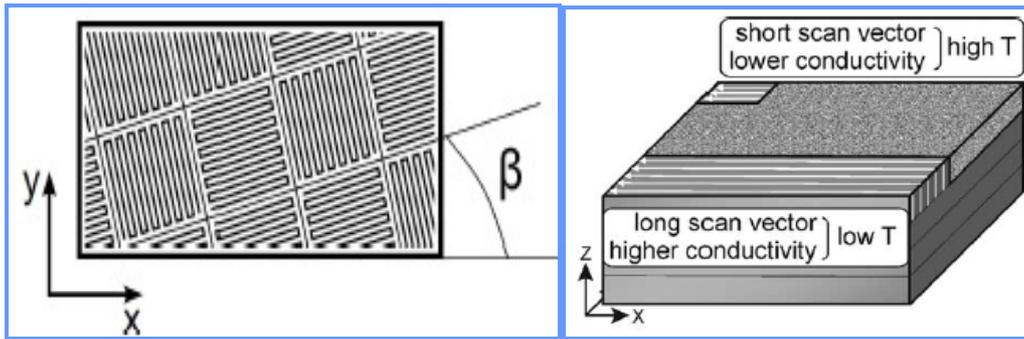


Figura 8: Esquema de rotación de capas con patrón ajedrezado (izq.) y diferentes longitudes de escaneo (dcha.).

La disposición de la pieza a fabricar también influye en las tensiones residuales que aparecen en ella, apareciendo mayores tensiones residuales cuando la pieza, en el caso de ser rectangular, se construye sobre la superficie de menor área, ya que serán necesarias más capas para su construcción, lo que aumentará los gradientes térmicos.

Por último, las tensiones residuales dependen de la temperatura inicial y del material que constituye el sustrato, obteniéndose menores tensiones residuales, cuanto menor es la conducción térmica del material sustrato y cuanto mayor es la temperatura inicial, ya que ambos parámetros disminuyen los gradientes térmicos que se producirán.

La microestructura y por tanto las propiedades finales del producto, también dependen de los parámetros de fabricación. La estrategia de escaneo controla la orientación de los granos, ya que estos crecen perpendicularmente a las isothermas, por lo que con la estrategia de escaneo se puede, en teoría, controlar la textura microestructural. Además de lo anterior, la elección de una estrategia de escaneo adecuada, evita la interconexión entre los poros generados en las diferentes pasadas.

La separación entre pasadas, además de controlar en cierta medida la porosidad, debido a su contribución a la energía suministrada, influye también en el tamaño y forma de los poros, siendo el tamaño mayor y la forma más regular, conforme aumenta la separación, ya que así disminuye el solape entre los caminos de fusión adyacentes. Para un espaciado dado, al disminuir la potencia o aumentar la velocidad de escaneo, se produce una mayor conexión entre los poros, estos se vuelven más alargados y se orientan perpendiculares

a los caminos de escaneo, debido a la disminución de la energía puesta en juego.

Además de lo anterior, el espaciado entre pasadas también controla la alineación de los poros, de manera que conforme se aumenta la separación entre pasadas, se produce un mayor alineamiento de los poros en la dirección de construcción.

La velocidad de escaneo también influye en la microestructura, de manera que el uso de elevadas velocidades de escaneo da lugar a menores tamaños de grano, en virtud de las mayores velocidades de enfriamiento puestas en juego. Por otro lado, para una potencia y espaciado entre pasadas dados, si se disminuye la velocidad de escaneo se produce un aumento del aporte térmico, por lo que el material permanece durante más tiempo a elevadas temperaturas y disminuye la velocidad de enfriamiento.

Se ha de señalar además, que debido a las elevadas velocidades de enfriamiento y calentamiento que tienen lugar en la fabricación por SLM, el tamaño de grano obtenido en las piezas fabricadas mediante esta tecnología suele ser menor, que el que se obtiene mediante fabricación convencional.

La densidad, el acabado superficial y las tensiones residuales podrían mejorarse, si fuera posible realizar una refusión. Esta técnica consiste en exponer una misma capa al rayo láser al menor dos veces, realizándose las refusiones con diferentes parámetros a los utilizados en la primera de las exposiciones. De cualquier manera, la principal ventaja de utilizar la refusión es la considerable mejora de la calidad superficial, realizándose en este caso, la refusión únicamente en las capas superficiales. Además de lo anterior, con la refusión de todas las capas, se consigue afinar el tamaño de grano, siendo este a su vez más equiáxico.

Sin embargo, si bien la refusión permite mejorar ciertas características, se ha de tener en cuenta, que esta mejora se produce a costa de aumentar el tiempo empleado en la construcción de la pieza.

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.1- Probetas y proceso de fabricación.

Con el fin de determinar aquellas condiciones de fabricación, que permitieran alcanzar las mejores características del material, se realizaron una serie de probetas utilizando distintos parámetros de fabricación. De este modo, también se pretendía determinar la influencia de los mismos.

En primer lugar se realizaron probetas, modificando únicamente la velocidad de escaneo, para comprobar el efecto de esta, manteniendo fijos el resto de parámetros de fabricación. En estas primeras probetas, los parámetros de exposición de la última capa fueron idénticos a los del resto de la probeta. Se fabricaron de este modo probetas cúbicas de 10x10x10 mm.

Todas las probetas fueron fabricadas en la máquina EOS M270 en una atmósfera inerte de Nitrógeno. La máquina fue alimentada con polvo metálico de acero inoxidable AISI 420 atomizado con gas, que tenía una densidad aparente de 3,94 g/cm³. En la Figura 9 se presenta la distribución granulométrica del polvo utilizado, indicándose el d₅₀ y el d₉₀ (el 50% y 90% de la masa de polvo tiene un diámetro inferior a estos).

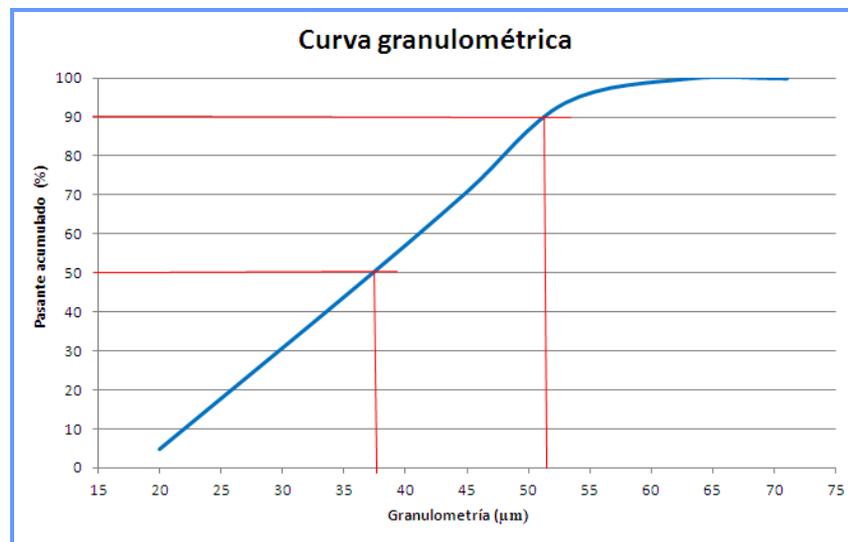


Figura 9: Curva granulométrica del polvo de acero utilizado.

En las Tablas 1 y 2 se indican la composición química y el análisis granulométrico tanto de los polvos de acero utilizado, así como lo indicado en las especificaciones.

	Composición química (%)			
	C	Mn	Cr	Si
Especificaciones	0,2-0,25	1-1,4	12-13,5	0,4-0,6
Material utilizado	0,25	1,1	12,6	0,4

Tabla 1: Composición química del polvo metálico.

	Análisis granulométrico (% peso)						
	71 μm	63 μm	53 μm	45 μm	36 μm	20 μm	<20 μm
Especificaciones	0	<1	-	-	-	30-60	<8
Material utilizado	0	0,05	6,14	22,86	24,38	41,75	4,82

Tabla 2: Análisis granulométrico del polvo metálico.

Se fabricaron seis probetas cúbicas de 10x10x10 mm utilizando dos velocidades diferentes (850 mm/s y 750 mm/s), es decir, tres probetas a cada velocidad. El resto de parámetros de fabricación se mantuvieron constantes, siendo el valor de dichos parámetros, los que se indican a continuación:

- Potencia, P: 195 W.
- Espesor de capa, h: 40 μm .
- Temperatura inicial: 40°C.
- Diámetro del spot del láser, D: 70 μm .
- Material constitutivo del sustrato: acero al carbono.
- Espaciado entre pasadas o hatching distance, d: 100 μm .
- Estrategia de escaneo (Figura 10): stripes (bandas).
 - Ancho de las bandas: 5 mm.
 - Ancho del solape entre las bandas: 50 μm .
- Beam offset núcleo: 25 μm .
- Exposición del contorno y post-contorno a 400 mm/s y 120 W.
- Beam offset del contorno y post-contorno: 0 mm.
- Exposición de los vértices: 700 mm/s, 100 W, factor de borde 2 y factor de radio 0.

Como se puede ver en la Figura 10, la exposición tipo stripes o bandas divide la sección a escanear en cuadrículas de un tamaño determinado, denominado ancho de banda y cada una de esas cuadrículas es escaneada por el haz láser tanto en la dirección X como Y. A su vez, las cuadrículas se

solapan unas con otras según un valor indicado, denominado ancho de solape entre bandas.

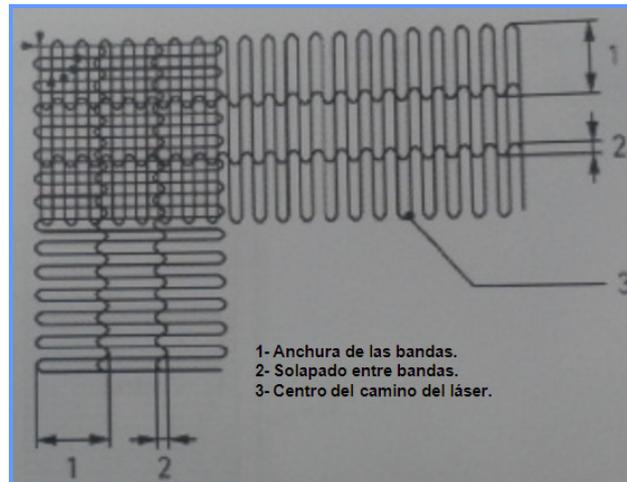


Figura 10: Estrategia de escaneo tipo stripes.

El factor de radio y el factor de borde son dos parámetros que definen el nivel de exposición al que son sometidos los vértices (Figura 11), con la finalidad de lograr que la pieza fabricada se ajuste a la geometría deseada. El factor de radio define por sí solo el nivel de exposición, tal y como se muestra en la Figura 11: a modo de ejemplo, cuando se utiliza un factor de radio 1 el láser se pararía al llegar a la posición indicada en la Figura 11, mientras que si el factor de radio fuera igual a 0, llegaría hasta el mismo vértice. Por otro lado, para definir el nivel de exposición a partir del factor de borde, se ha de multiplicar dicho factor por el beam offset utilizado en la exposición del contorno.

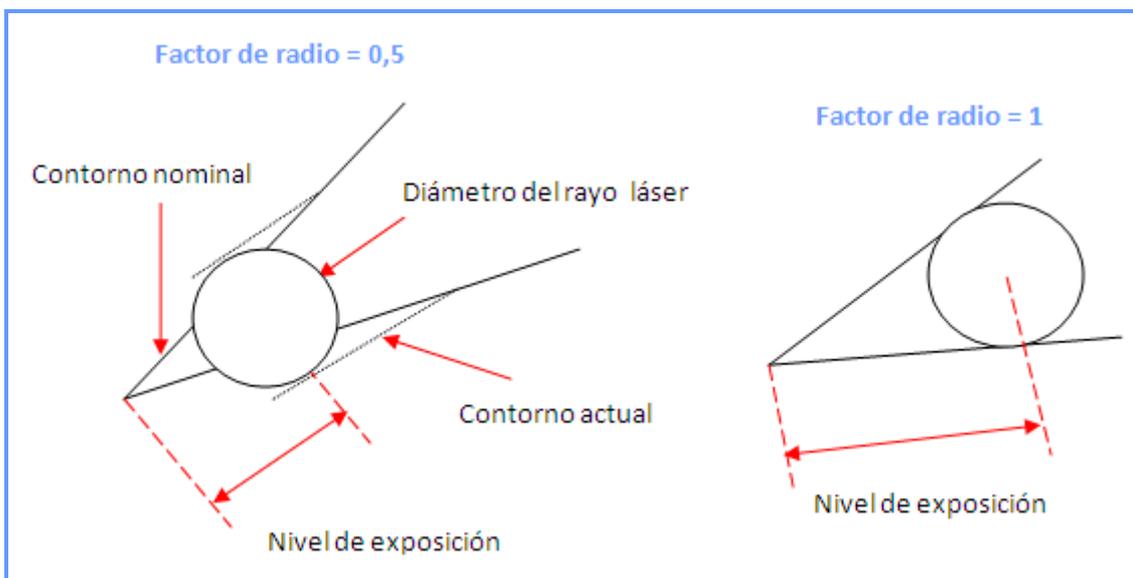


Figura 11: Esquema del nivel de exposición a partir del factor de radio.

Para la diferenciación de las pruebas, se denominaron Probetas 1 a las realizadas a 750 mm/s y Probetas 2 a las realizadas a 850 mm/s. La diferencia entre ambas es la energía puesta en juego, tal y como se recoge en la Tabla 3, en la que se han calculado el aporte térmico y las energías por unidad de superficie y de volumen aplicadas en ambos procesos de fabricación.

	Aporte térmico, P/v (J/mm)	Energía por unidad de superficie, P/v·d (J/mm²)	Energía por unidad de volumen P/v·d·h (J/mm³)
Probeta 1 (750mm/s)	0,26	2,6	65
Probeta 2 (850mm/s)	0,23	2,3	57

Tabla 3: Energía suministrada en la fabricación de las probetas.

Nótese que los tiempos de exposición del polvo de acero al haz láser se obtiene dividiendo el diámetro del láser por la velocidad de escaneo ($t=D/v$), obteniéndose de este modo valores pequeñísimos, de $8,2 \cdot 10^{-5}$ y $9,3 \cdot 10^{-5}$ s respectivamente para las velocidades de 850 y 750 mm/s. Por otro lado los tiempos de enfriamiento hasta que llega la siguiente pasada adyacente, se obtiene dividiendo la longitud escaneada entre la velocidad de escaneo. Debido al tipo de exposición utilizado, este tiempo no es constante para todos los puntos, por lo que los tiempos de enfriamiento se sitúan aproximadamente entre $0,013$ y $2,66 \cdot 10^{-4}$ s para la velocidad de 750 mm/s y entre $0,012$ y $2,35 \cdot 10^{-4}$ s para la velocidad de 850 mm/s. Por su parte el tiempo que tarda en formarse la capa horizontal completa de 1 cm^2 es aproximadamente de $3,33$ s para la velocidad de 750 mm/s y de $2,94$ s para la velocidad de 850 mm/s

Una de las probetas de cada serie fue analizada en estado bruto de fabricación. El resto de las probetas, fueron sometidas a un tratamiento de temple, que consistió en una austenización a 1010°C mantenida durante 30 minutos, seguida posteriormente de un enfriamiento al aire. Tras el temple, dos de las probetas (un cubo Probeta 1 y otro de la Probeta 2) fueron sometidas a un revenido a 300°C durante 2 horas, mientras que las otras dos probetas restantes (un cubo Probeta 1 y otro de la Probeta 2) fueron sometidas a un revenido a 450°C durante dos horas. El revenido a 300°C se realizó para conseguir la mejor combinación entre propiedades mecánicas y tenacidad,

mientras que el revenido a 450°C se realizó para conseguir la máxima dureza (aunque cabe prever una fragilidad excesiva en este último caso).

Sobre las probetas cúbicas se llevó a cabo la caracterización del material, mediante la realización de medidas de rugosidad, tensiones residuales en superficie, porosidad, microestructura y dureza.

Por otro lado, también se realizó la caracterización mecánica del material, para lo cual se fabricaron probetas de tracción. Las probetas de tracción utilizadas fueron probetas cilíndricas, siendo las dimensiones elegidas para estas probetas, las que se indican en la Figura 12.

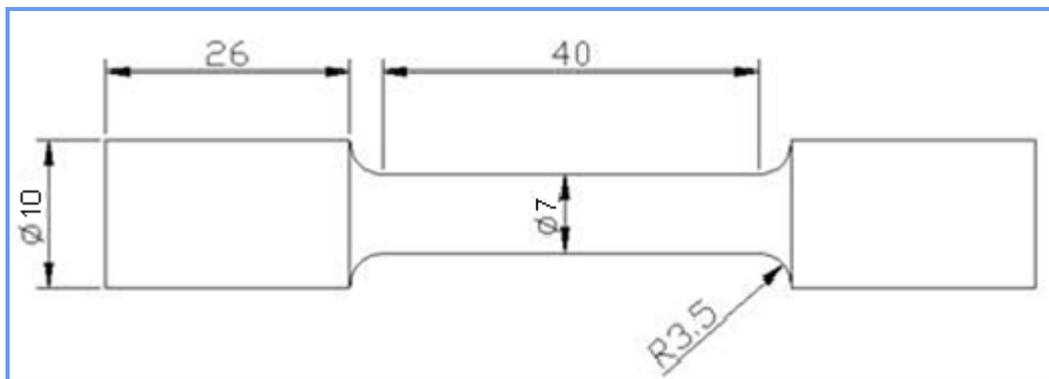


Figura 12: Geometría y dimensiones de las probetas de tracción.

Al igual que los cubos, las probetas de tracción fueron fabricadas utilizando las mismas velocidades (tres probetas a 750 mm/s y tres a 850 mm/s) y también fueron sometidas a los mismos tratamientos térmicos que los cubos, por lo que ha sido posible comparar el comportamiento mecánico del material fabricado a cada velocidad, en los estados de bruto de fabricación, temple y revenido a 300°C y temple y revenido a 450°C.

En vista de los resultados obtenidos, que se mostrarán en el capítulo siguiente, se procedió a realizar cuatro probetas cúbicas más, modificando algunos parámetros de fabricación, con el fin de mejorar la calidad superficial y la porosidad en la zona del contorno. En este caso, las probetas se denominaron Probeta 3, Probeta 4, Probeta 5 y Probeta 6.

Todas las probetas fueron fabricadas utilizando un contorno y un post-contorno adicionales, que fueron realizados con idénticos parámetros a los del contorno y post-contorno previos, diferenciándose únicamente en el beam offset, que en este caso fue de 100 μm para el contorno y post-contorno adicionales (en vez

de 0). Esta modificación se realizó para intentar eliminar o disminuir en lo posible la porosidad que se había obtenido en las probetas previas en la zona de unión del núcleo con el contorno. A excepción de los parámetros de la capa superficial y en algunos casos el espaciado entre pasadas, el resto de los parámetros de fabricación fueron los mismos que los utilizados para las Probetas 1.

Para la Probeta 3, la exposición del núcleo se realizó a 195 W, 750 mm/s y con un espaciado de 100 μm . Por su parte, los parámetros utilizados en la exposición de la capa superior fueron 90 W, 500 mm/s y 50 μm de espaciado.

El núcleo de la Probeta 4 se obtuvo bajo los mismos parámetros que los de la Probeta 3, mientras que en la capa superior se utilizaron en este caso 90 W, 500 mm/s y 60 μm de espaciado.

En el núcleo de la Probeta 5 se utilizaron 195 W, 750 mm/s y 90 μm de espaciado entre pasadas, mientras que en la capa superior, los parámetros de exposición utilizados fueron 90 W, 450 mm/s y un espaciado de 60 μm .

Finalmente, en el núcleo la Probeta 6 se utilizaron los mismos parámetros de exposición que en la Probeta 5, mientras que para la capa superior, los parámetros de exposición utilizados en este caso fueron 90 W, 400 mm/s y 60 μm de espaciado.

Las Tablas 4 y 5 muestran los parámetros térmicos de fabricación tanto del núcleo como de la capa superior, de estas probetas.

	Aporte térmico, P/v (J/mm)	Energía por unidad de superficie, P/v-d (J/mm²)
Probeta 3	0,26	2,6
Probeta 4	0,26	2,6
Probeta 5	0,26	2,9
Probeta 6	0,26	2,9

Tabla 4: Energía suministrada en la fabricación del núcleo de las probetas.

	Aporte térmico, P/v (J/mm)	Energía por unidad de superficie, P/v·d (J/mm ²)
Probeta 3	0,18	3,6
Probeta 4	0,18	3
Probeta 5	0,2	3,33
Probeta 6	0,225	3,75

Tabla 5: Energía suministrada en la fabricación de la capa superior de las probetas.

Con estas cuatro nuevas probetas, únicamente se llevaron a cabo medidas de porosidad, de rugosidad superficial y observación microestructural, ya que cabe esperar que las durezas y tensiones superficiales serán similares a las medidas en las Probetas 1 y 2.

3.2- Técnicas de ensayo.

- **3.2.1- Rugosidad.**

La rugosidad de las probetas fue medida con un rugosímetro, obteniéndose únicamente la rugosidad media, ya que es el valor de rugosidad más representativo que se menciona en las publicaciones consultadas.

Como ya se ha indicado, las medidas de rugosidad se realizaron sobre las probetas cúbicas, realizándose en cada una de ellas tanto medidas en la cara superior (cara final de la fabricación), como en las caras laterales.

La medida de las caras laterales se realizó siguiendo la dirección de construcción, llevándose a cabo las mediciones en una única cara lateral, ya que las distintas caras laterales no se diferencian entre sí. Por su parte, en la cara superior de las probetas las medidas se realizaron en dos direcciones perpendiculares entre sí.

Para la realización de las medidas, dadas las pequeñas dimensiones de las probetas y la rugosidad de las mismas, se tomaron segmentos de 7,5 mm de longitud, divididos en tres tramos de 2,5 mm, de los cuales, para la obtención de la rugosidad únicamente se tuvo en cuenta el segmento central.

Inicialmente se realizaron cuatro medidas de rugosidad en una cara lateral y en la cara superior (por lo tanto en este último caso dos medidas en cada

dirección), sobre cada una de las probetas. Posteriormente, tras la realización de los tratamientos térmicos, se repitieron las medidas en las caras laterales y superiores.

Se ha de indicar, que antes de efectuar la medida de la rugosidad de aquellas probetas que sufrieron tratamientos térmicos, se realizó un decapado ácido de las mismas, para eliminar los óxidos formados durante el tratamiento térmico. El decapado se realizó utilizando un equipo de ultrasonidos, siendo el tiempo de decapado de 15 minutos y la composición de la solución utilizada fue: 500 ml de HCl, 500 ml de H₂O y 3,5 g de hexametilentetramina [(CH₂)₆N₄].

- **3.2.2- Tensiones residuales.**

Para la medida de las tensiones residuales se utilizó un difractómetro de rayos X, utilizándose como referencia la constante elástica del acero AISI 410 del plano de difracción utilizado en la medida $\left(\frac{E}{1+\mu} = 176,5 \pm 0,7\text{GPa}\right)$, que no es muy diferente al acero objeto de examen.

Las medidas de las tensiones residuales se realizaron en la cara superior y en dos de las caras laterales, perpendiculares entre sí. A su vez, las medidas sobre cada una de las superficies se realizaron en tres direcciones diferentes (-45°, 0° y +45°), para tener en cuenta la posible anisotropía del material. En las caras laterales, las medidas se realizaron de manera que la dirección de fabricación fuese coincidente con la dirección de medida correspondiente a 0°.

Para la realización de las medidas se utilizó el colimador de 2 mm de diámetro, utilizándose como método de medida la técnica $\text{sen}^2 \Psi$, siendo a su vez el modo de medida el denominado χ modificado. Las medidas se realizaron sobre los planos cristalográficos de la ferrita/martensita (211), siendo el ángulo de medida (2θ) de 155,1°. Como fuente de radiación se utilizó un tubo de cromo, siendo la longitud de onda de la radiación (K_α) 0,2291 nm. Para la obtención final de los valores de las tensiones residuales, se utilizaron los ajustes de los picos parabólico y pseudo-Voigt.

- **3.2.3- Porosidad.**

La medida de las porosidades se realizó en una sección horizontal y en otra vertical para cada una de las probetas, por lo que previamente se hubo de realizar el corte de las mismas, como se indica en la Figura 13.

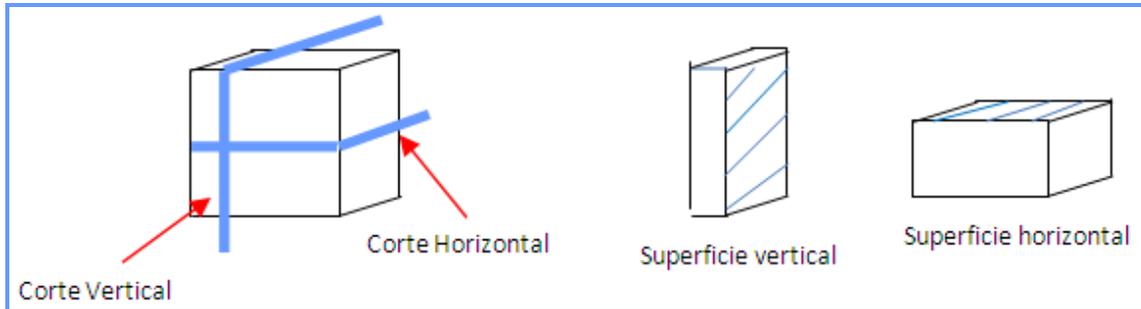


Figura 13. Cortes a realizar para determinar porosidad, dureza y microestructura.

Tras el corte de las probetas, estas fueron embutidas en resina, desbastadas utilizando papeles abrasivos de diferente grano y finalmente fueron pulidas con paños apropiados y pasta de diamante. Una vez preparadas las superficies, éstas se observaron en un microscopio óptico bajo diferentes aumentos. La medida de la porosidad se llevó a cabo a través de una subrutina creada en el microscopio, que calcula la porosidad como la fracción de área ocupada por los poros. La Figura 14 muestra a la izquierda una de esas imágenes y a la derecha la diferenciación que lleva a cabo el software de análisis, que colorea en rojo todas las regiones oscuras (poros).

Para la obtención de la porosidad se utilizaron 50 aumentos, por lo que las superficies fueron divididas en cuadrículas de $0,06267 \text{ cm}^2$ ($6266736,86 \mu\text{m}^2$), sobre las que se obtuvo la porosidad, expresándose la porosidad de las superficies como media de las porosidades de las cuadrículas en las que se dividieron las distintas superficies. A su vez, la porosidad global de las probetas se obtuvo como media de las porosidades de las superficies horizontal y vertical. Además, en el curso del análisis de la porosidad, se obtuvieron imágenes de los mayores defectos que se encontraron en estos análisis.

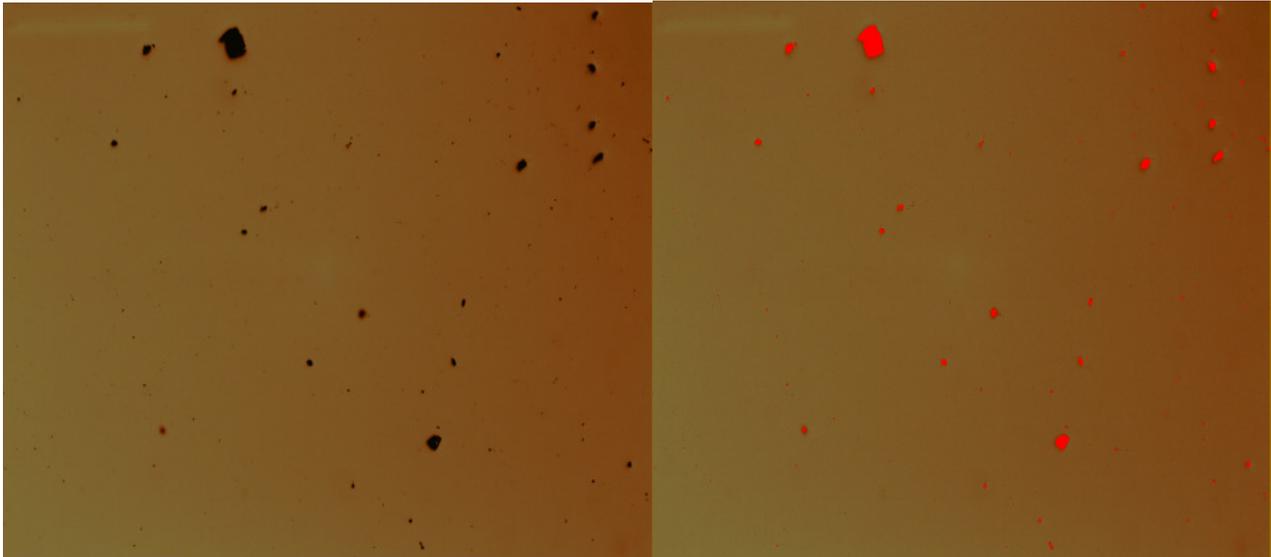


Figura 14: Ejemplo de determinación de la porosidad con el software de análisis.

- **3.2.4- Dureza.**

La dureza de los productos fue medida utilizando un microdurómetro Vickers aplicando tanto cargas de 1 kg como de 200 g.

Las medidas de dureza con carga de 1 kg se realizaron para la obtención de la dureza global del acero, sobre las probetas previamente embutidas en resina. Se realizaron medidas de dureza en las secciones horizontal y vertical de cada probeta en la zona central de las mismas.

Sobre las probetas que no sufrieron tratamiento térmico se realizaron tres medidas en cada sección, mientras que en las que sufrieron un tratamiento térmico, se realizaron cinco medidas en cada sección.

Por otro lado, se utilizó la carga de 200 g para obtener perfiles de microdureza, en las probetas en estado bruto de fabricación, con el fin de determinar cómo variaba la dureza dentro de las secciones tanto horizontales como verticales.

El perfil de microdureza se realizó en la sección vertical, mientras que en la horizontal se realizaron medidas de durezas, diferenciando entre las zonas más revenidas y las menos revenidas, con el fin de determinar el efecto de revenido que cada pasada induce en las pasadas anteriores (las probetas se habían atacado previamente con el reactivo Vilella). A su vez, en la sección vertical se realizaron medidas adicionales en la capa superior, que no había sufrido ningún revenido, ya que no se depositó ninguna capa encima de ella.

- **3.2.5- Microestructura.**

La microestructura de todas las probetas fue observada al microscopio óptico, utilizando diferentes aumentos (50 a 1000x), tras el ataque de las probetas con el reactivo Vilella.

El objetivo de este análisis, además de determinar la microestructura del acero, fue determinar la localización de los defectos presentes, fundamentalmente en las probetas que no sufrieron tratamiento térmico, con objeto de identificar los parámetros de fabricación a modificar, con el fin de disminuir la cantidad y magnitud de los defectos citados.

- **3.2.6- Propiedades mecánicas.**

Para la determinación de las propiedades mecánicas se llevaron a cabo ensayos de tracción uniaxial. Estos ensayos se realizaron sobre las probetas cilíndricas, cuyas medidas se indicaron anteriormente. Se ha de indicar que las probetas se fabricaron de manera que el eje longitudinal de las mismas se encontraba en posición horizontal, de manera que las propiedades mecánicas obtenidas corresponden a una dirección perpendicular a la de fabricación.

Los ensayos se llevaron a cabo con control de desplazamiento, siendo el valor utilizado 1 mm/min. Para la medida del alargamiento de la probeta, conforme avanzaba el ensayo, se utilizó un extensómetro, el cual tenía una longitud de base de medida L_0 de 20 mm. Por otro lado, según indica la norma UNE y dadas las dimensiones de las probetas, se realizaron en la sección de rotura unas marcas distantes entre sí 31 mm, con el fin de determinar el alargamiento final entre ellas.

Con los datos obtenidos de los ensayos, se obtuvieron los valores del módulo de Young (E), límite elástico (σ_y), resistencia a tracción (σ_R), así como las constantes características de la curva tensión-deformación verdadera, ley de Hollomon (K y n , $\sigma = K \cdot \epsilon^n$). Además de esto, mediante la medida de la sección de la probeta antes y después del ensayo, se determinó la estricción, que junto con el alargamiento a rotura nos da una idea de la ductilidad del material.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS.

En primer lugar se expondrán los resultados obtenidos sobre las probetas 1 y 2 en estado bruto de fabricación, para a continuación pasar a valorar el efecto del tratamiento térmico, temple y revenido a 300°C y temple y revenido a 450°C. Para finalizar con la exposición de resultados, se mostrarán los resultados obtenidos con las probetas 3, 4, 5 y 6.

4.1- Probetas en estado bruto de fabricación.

- **4.1.1- Rugosidades.**

La Tabla 6 muestra las medidas individuales de la rugosidad media (Ra) obtenidas sobre las probetas 1 y 2 en estado bruto de fabricación, mientras que la Tabla 7 muestra los resultados medios y desviación típica de dichas medidas. Nótese, que la velocidad de fabricación influye poco en la rugosidad del producto, aunque se ha obtenido una menor rugosidad en la cara superior al utilizar una mayor velocidad.

Rugosidades, Ra (μm)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
11,3	12,4	10,5	11,8
9,9	11,9	8,6	8,7
9,8	8,7	10,8	10,8
11,1	12,3	7,7	9,8
10,7	11,9	10,2	9,3
10,9	13,8	12,2	6,6
8	10,1	8,4	12
7,6	8,3	11,5	9,5
11,3	11,3	10,7	7,7
11,0	10,9	10,9	7,0
11,6	9,5	10,7	8,8
10,1	13,4	11,4	11,7

Tabla 6: Resultados individuales de rugosidad (estado bruto de fabricación).

	Rugosidades, Ra (μm)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	10,3	11,2	10,3	9,5
Desviación típica	1,3	1,7	1,4	1,8

Tabla 7: Valores medios y desviación típica de la rugosidad (estado bruto de fabricación).

- **4.1.2- Tensiones residuales.**

Las tensiones residuales medidas, para las caras laterales y superiores de las probetas se recogen en las Tablas 8, 9, 10 y 11.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 1.1		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	- 497	- 492	- 433
Cara lateral 1	432	274	502
Cara lateral 2	491	267	499

Tabla 8: Tensiones residuales (MPa) Probeta 1.1 (750mm/s). Estado bruto de fabricación.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 1.2		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	- 465	- 437	- 380
Cara lateral 1	459	285	532
Cara lateral 2	476	296	549

Tabla 9: Tensiones residuales (MPa) Probeta 1.2 (750 mm/s). Estado bruto de fabricación.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 2.1		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	- 497	- 494	- 431
Cara lateral 1	438	255	459
Cara lateral 2	530	287	553

Tabla 10: Tensiones residuales (MPa) Probeta 2.1 (850 mm/s). Estado bruto de fabricación.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 2.2		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	- 526	- 488	- 411
Cara lateral 1	380	206	361
Cara lateral 2	492	279	549

Tabla 11: Tensiones residuales (MPa) Probeta 2.2 (850 mm/s). Estado bruto de fabricación.

Dado que los valores obtenidos para cuatro de las probetas, fueron bastante repetitivos, no se realizaron las medidas de tensiones residuales en las otras dos probetas restantes.

A continuación, en la Tabla 12 se indican las tensiones medias obtenidas en las Probetas 1 y 2, teniendo en cuenta los tres ángulos de medida, tanto en la cara superior como en la cara lateral. Se destaca la existencia de tensiones residuales importantes, de signo negativo en la cara superior y positivo en las caras laterales. Por otro lado, la velocidad de fabricación apenas influye en el nivel de las tensiones encontradas.

	Tensiones residuales (MPa)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
Tensión media	422	- 451	399	- 474
Desviación típica	124	39	124	47

Tabla 12: Tensión residual media y desviación típica (estado bruto de fabricación).

• 4.1.3- Porosidad

En la Tabla 13 se indican los valores individuales de porosidad medidos en las diferentes probetas y secciones. Se hace notar que las medidas en la sección vertical y horizontal de la Probeta 1 se efectuaron sobre áreas respectivas de 0,8147 y 0,752 cm², mientras que las medidas en las secciones vertical y horizontal de la Probeta 2 se llevaron a cabo sobre áreas respectivas de 1,0653 y 0,6267 cm².

Porosidad (%)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
0,57	0,59	0,49	0,56
0,82	0,41	0,57	0,89
0,86	0,6	0,37	0,66
0,64	0,19	0,41	0,77
0,81	0,39	0,66	0,37
0,76	0,29	0,64	0,69
0,44	0,12	0,8	0,5
0,6	0,21	0,52	0,66
0,5	0,19	0,57	0,45
0,32	0,4	0,49	0,44
0,62	0,32	0,52	---
0,46	0,24	0,54	---
0,54	---	0,44	---
---	---	0,75	---
---	---	0,38	---
---	---	0,4	---
---	---	0,41	---

Tabla 13: Valores individuales de la porosidad (estado bruto de fabricación).

La Tabla 14 da cuenta de los valores medios y desviaciones típicas de las medidas anteriores. Se puede finalmente indicar que mientras los resultados de porosidad medidos en la cara vertical no reflejan una influencia clara de la velocidad de proceso (la diferencia entre ambas probetas es inferior a la variabilidad de las medidas), en el caso de la sección horizontal, el uso de una velocidad inferior ha permitido reducir significativamente la porosidad del producto.

	Porosidad (%)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,61	0,33	0,53	0,6
Desviación típica	0,16	0,15	0,13	0,16
Valor medio global				
	0,47		0,56	

Tabla 14: Valores medios y desviación típica de la porosidad (estado bruto de fabricación).

En lo que respecta al tamaño de los poros, el poro de mayor tamaño se encontró en la Probeta 2, siendo la dimensión de su lado mayor de 202 μm , mientras que en la Probeta 1 el mayor poro tenía 183 μm en su dimensión principal, localizándose ambos poros en la sección vertical de las probetas.

- **4.1.4- Dureza Vickers.**

Los valores de dureza obtenidos, mediante la aplicación de la carga de 1 kg, son los que se indican en la Tabla 15. En la Tabla 16, se adjuntan los valores medios y desviaciones típicas.

Dureza Vickers (1kg)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
507	479	524	533
551	531	507	498
512	475	495	498

Tabla 15: Medidas individuales de dureza Vickers (estado bruto de fabricación).

	Dureza (1kg)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio (HV)	523	495	508	509
Desviación típica	24	31	15	20
Valor medio global (HV)				
	509		509	
Valor medio global (HRC)				
	48,7		48,7	

Tabla 16: Valores medios y desviación típica de dureza (estado bruto de fabricación).

A continuación, en las Figuras 15 y 16, se indican los perfiles de dureza medidos desde la capa superior, aplicando una carga de 200 g. Se ha partido del valor de la dureza media medida en la capa superficial ($625 \text{ HV} \pm 24$ en la Probeta 1 y $612 \text{ HV} \pm 16$ en la Probeta 2, que se corresponden respectivamente con 55 y 54 HRC y se trata de acero templado sin revenir) y a continuación, se han ido representando los valores máximos y mínimos que se han medido en el interior de las probetas, que corresponden a regiones más o menor revenidas por efectos de las sucesivas pasadas.

En la Probeta 1 los valores de dureza mayores, correspondientes a las regiones menos revenidas, se sitúan entre 500 y 550 HV, mientras que los valores menores (regiones más revenidas) se sitúan entre 425 y 450 HV. Por su parte, en la Probeta 2 esas mismas regiones alcanzan valores similares a los anteriores.

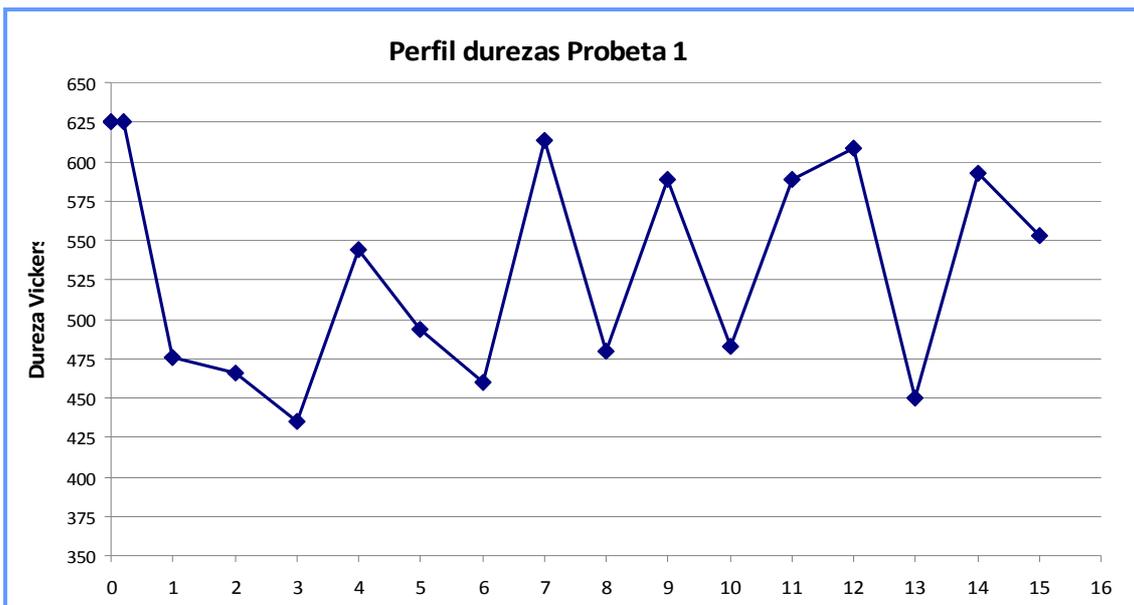


Figura 15: Perfil de microdureza medido con 200 g de carga desde la cara superior en una sección vertical de la Probeta 1 (750 mm/s) en estado bruto de fabricación.

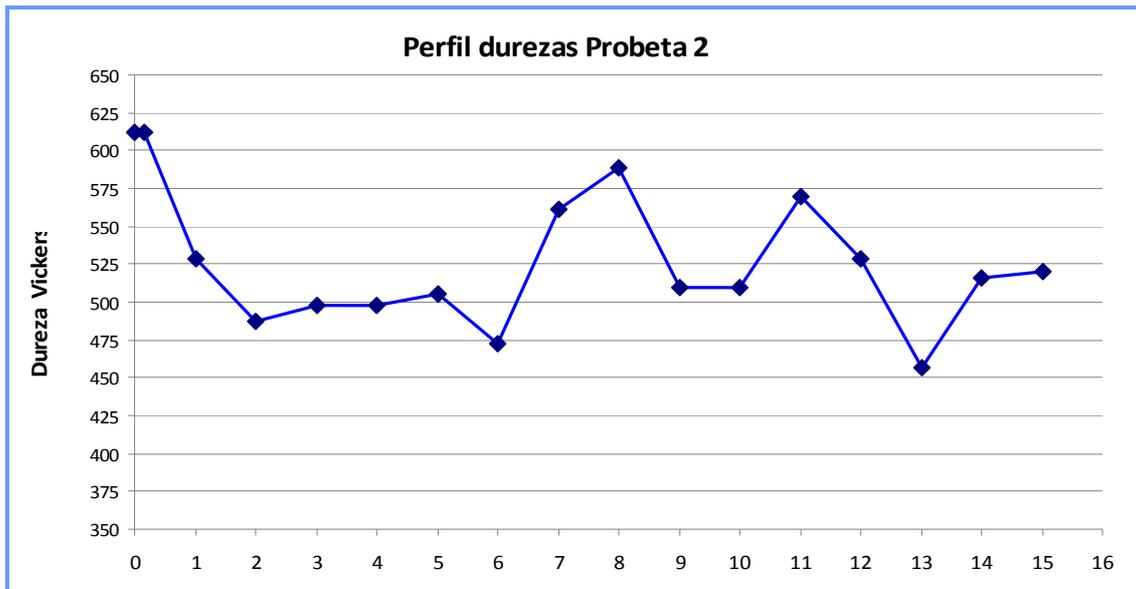


Figura 16: Perfil de microdureza medido con 200 g de carga desde la cara superior en una sección vertical de la Probeta 2 (850 mm/s) en estado bruto de fabricación.

A continuación, en la Tabla 17 se indican los valores de durezas obtenidos en las secciones horizontales (igualmente bajo carga de 200 g), con objeto de diferenciar las regiones menos revenidas de las más revenidas.

Dureza Vickers sección horizontal (200g)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Zona más revenida	Zona menos revenida	Zona más revenida	Zona menos revenida
432	623	483	649
520	575	453	608
487	623	450	644
432	532	423	509
453	628	470	613

Tabla 17: Microdureza Vickers medida en la sección horizontal (estado bruto de fabricación).

En la Tabla 18 se indican los valores medios y desviaciones típicas, de los valores medidos indicados en la tabla anterior.

	Dureza sección horizontal (200g)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Zona más revenida	Zona menos revenida	Zona más revenida	Zona menos revenida
Valor medio (HV)	465	596	456	605
Desviación típica	38	42	23	56
Valor medio (HRC)	45,6	53,9	45	54

Tabla 18: Valores medios y desviación típica de dureza en la sección horizontal (estado bruto de fabricación).

Debe destacarse, que no se han obtenido diferencias de durezas significativas al variar la velocidad de fabricación.

- **4.1.5- Microestructura.**

La estructura de las probetas en estado bruto de fabricación es completamente martensítica, observándose un buen solape entre las diferentes capas. También se puede observar, como los bordes de los caminos de fusión son mucho más oscuros que el centro, en virtud del mayor efecto de revenido de los bordes, producido por el calentamiento inducido por el cordón fundido inmediatamente superior, que da lugar a la precipitación de carburos (ablandamiento).

Tal y como se pone de manifiesto en la Figura 17, el límite de cada pasada corresponderá al conjunto de puntos en los que se ha alcanzado al menos la temperatura de austenización del acero (sobre los 1000°C) y que, como consecuencia de la rápida velocidad de enfriamiento, se habrá obtenido una microestructura completamente martensítica. Justo a continuación, aparece una pequeña región oscurecida debido al revenido producido en la pasada inmediatamente inferior (región que se habrá calentado muy brevemente entre 600 y 1000°C, donde habrán precipitado carburos).

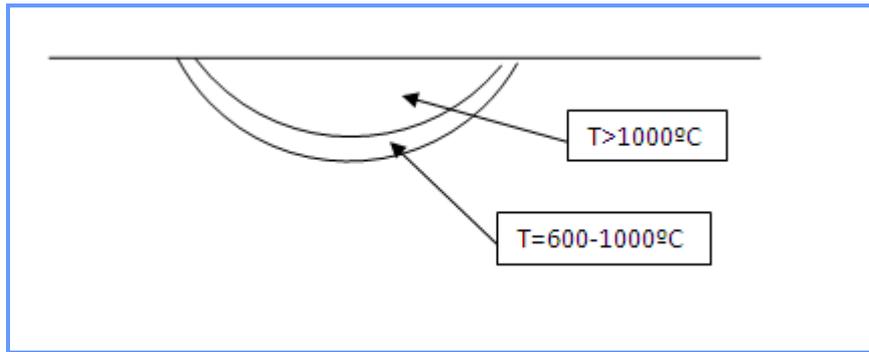


Figura 17: Esquema de una pasada cortada transversalmente.

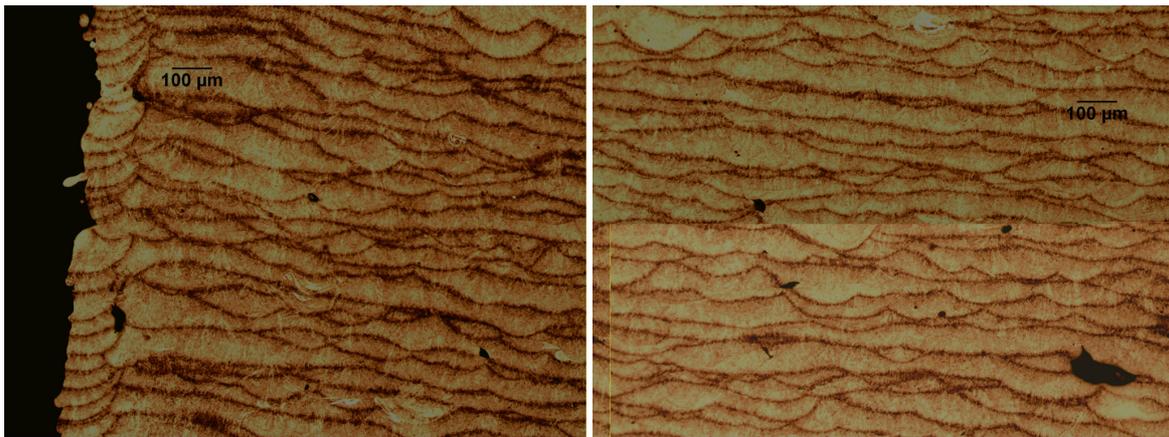


Figura 18: Microestructura de la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de la sección vertical de la Probeta 1 (750 mm/s). Estado bruto de fabricación.

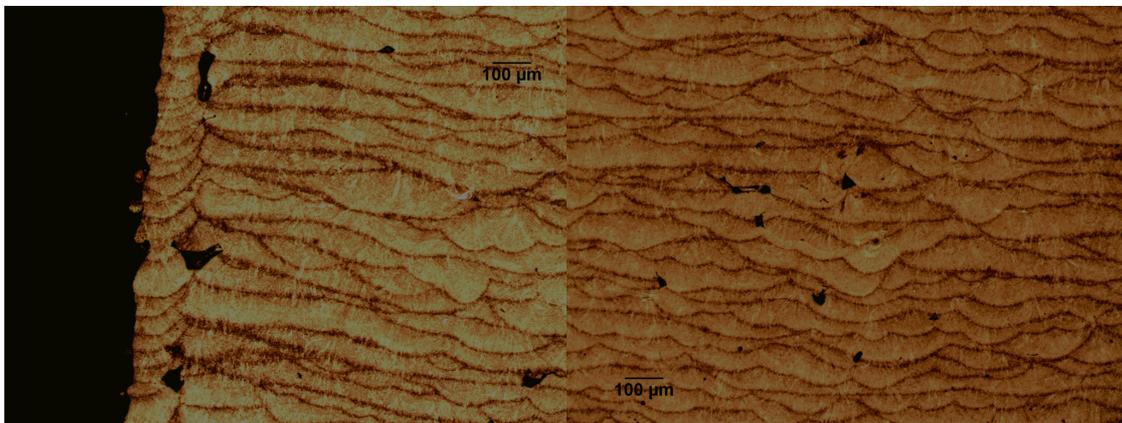


Figura 19: Microestructura de la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de la sección vertical de la Probeta 2 (850 mm/s). Estado bruto de fabricación.

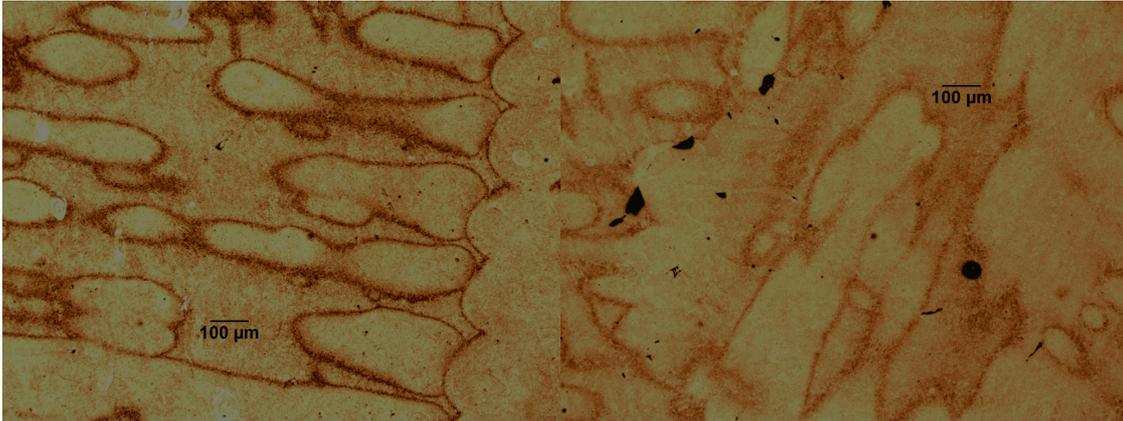


Figura 20: Microestructura de la sección horizontal Probeta 1 (izq.) y Probeta 2 (dcha.). Estado bruto de fabricación.

Al comparar las Figuras 18 y 19 con la Figura 20, se pone de manifiesto que aunque este parámetro es difícil de cuantificar con exactitud, el ancho de la región fundida en cada pasada se sitúa sobre unos 150 μm .

Por otro lado, pese al buen solape de las capas solidificadas, la mayoría de los defectos se encuentran en las zonas de unión entre las diferentes capas. También se ha observado la formación de una gran cantidad de defectos y en ocasiones de gran tamaño, en las zonas de unión de la región del contorno con el núcleo de la probeta.

La observación microscópica de las probetas atacadas con el reactivo Vilella también ha permitido poner de manifiesto la presencia de una capa en la superficie superior (última capa fundida y solidificada), que tiene una coloración mucho más blanca, debido a que al ser la última capa en depositarse, no ha sufrido ningún revenido posterior. Esta capa corresponde entonces a la región tanto fundida como austenizada en la última pasada, siendo la región en la que se había medido la mayor dureza (véanse Figuras 15 y 16). La profundidad de esta capa superior es de 125 μm en la Probeta 1 y de 100 μm en la Probeta 2. El análisis de esta última capa permite conocer mejor la influencia de la velocidad de fabricación: al aumentar la velocidad de avance sin modificar el resto de parámetros, disminuye la profundidad fundida, en virtud de la menor energía puesta en juego (véase Tabla 3).

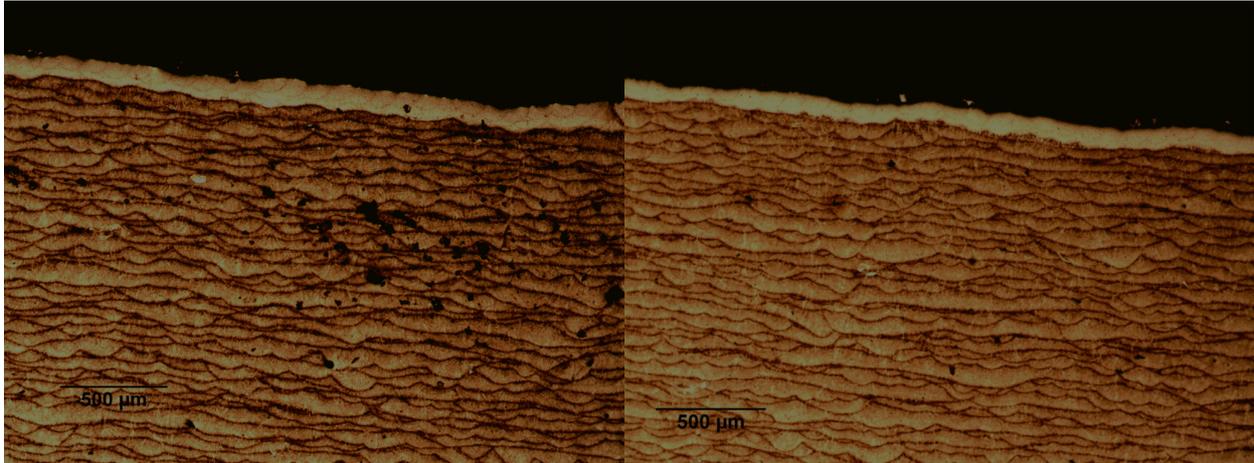


Figura 21: Microestructura de la región superficial superior Probeta 1 (izq.) y Probeta 2 (dcha.). Estado bruto de fabricación.

• 4.1.6- Propiedades mecánicas a tracción.

Las propiedades mecánicas correspondientes a las dos velocidades evaluadas han sido bastante parecidas.

Las Figuras 22 y 23 muestran las curvas tensión-deformación a tracción obtenidas con las dos probetas y la Tabla 19 da cuenta de los resultados obtenidos (módulo elástico, límite elástico, resistencia a la tracción, alargamiento, estricción y las constantes de la ley de Hollomon). De cualquier manera, se puede apreciar que el incremento de la velocidad de escaneo supone una disminución de la resistencia a tracción y especialmente, un descenso de la ductilidad lo que se puede justificar en virtud de la mayor porosidad obtenida.

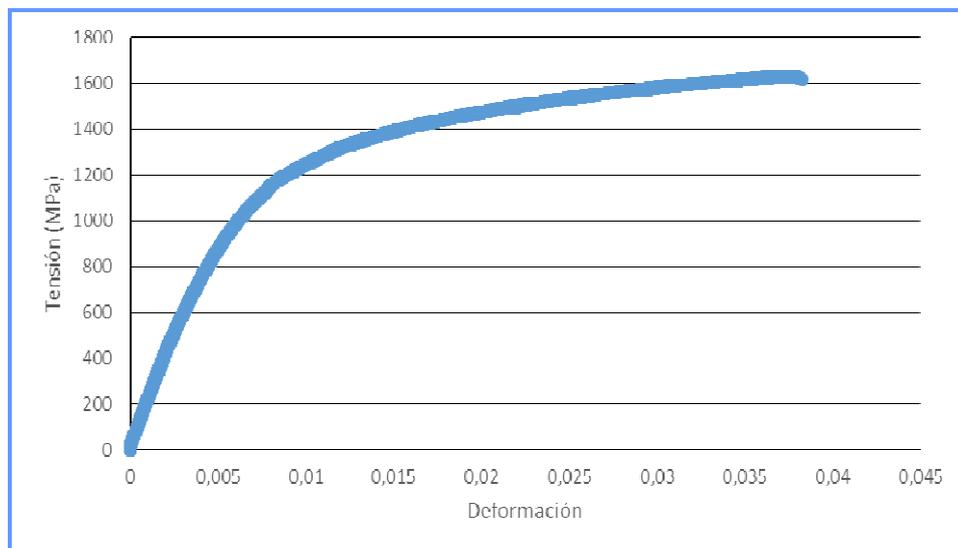


Figura 22: Curva tensión-deformación verdadera de la Probeta 1 (750 mm/s) en estado bruto de fabricación.

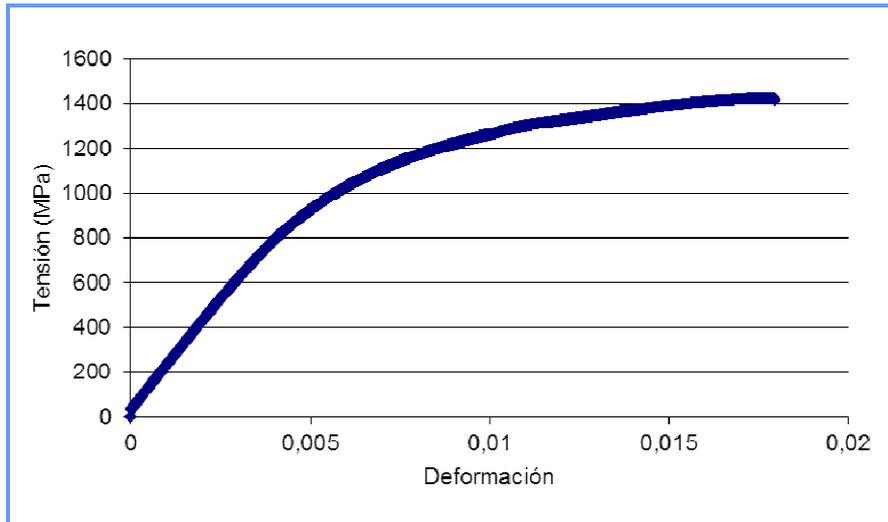


Figura 23: Curva tensión-deformación verdadera de la Probeta 2 (850 mm/s) en estado bruto de fabricación.

	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)	Z (%)	K (MPa)	n
Probeta 1 (750 mm/s)	201	1100	1560	3,2	3,2	2550	0,125
Probeta 2 (850 mm/s)	198	1148	1396	1,1	0	2395	0,113

Tabla 19: Propiedades mecánicas a tracción del acero en estado bruto de fabricación.

4.2- Probetas tras temple y revenido a 300°C.

• 4.2.1- Rugosidad.

La Tabla 21 muestra la rugosidad media medida en las caras lateral y superior de las dos probetas, mientras que en la Tabla 22 se indican los valores medios y desviaciones típicas de dichas rugosidades.

Rugosidad, Ra (μm)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
8,8	10,3	9,6	10
7,3	9,3	8,2	9,7
8,4	11,0	12,9	12,3
11,3	10,8	10,1	12,2
9,1	8,1	9,8	11,2

Tabla 21: Resultados individuales de rugosidad (tras temple y revenido a 300°C).

	Rugosidad, Ra (μm)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	8,9	9,9	10,1	11,1
Desviación típica	1,5	1,2	1,7	1,2

Tabla 22: Valores medios y desviación típica de rugosidad (tras temple y revenido a 300°C).

- **4.2.2- Tensiones residuales.**

En las Tablas 22 y 23 se indican las tensiones residuales medidas en la cara lateral y en la superior, presentándose en la Tabla 24 los valores medios y desviaciones típicas de dichas tensiones, teniendo en cuenta los tres ángulos de medida.

Se hace notar que además de haber disminuido considerablemente el valor de las tensiones en relación al estado bruto de fabricación, ahora todas las tensiones son de tracción.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 1		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	28	68	79
Lateral 1	106	1489	86
Lateral 2	221	202	140

Tabla 22: Tensiones residuales (MPa) Probeta 1 (750mm/s) tras temple y revenido a 300°C.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 2		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	44	65	116
Lateral 1	161	148	128
Lateral 2	109	173	109

Tabla 23: Tensiones residuales (MPa) Probeta 2 (850 mm/s) tras temple y revenido a 300°C.

	Tensiones residuales (MPa)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
Tensión media	151	58	138	75
Desviación típica	33	27	21	37

Tabla 24 Tensión residual media y desviación típica (tras temple y revenido a 300°C).

• **4.2.3- Porosidad.**

En la Tabla 25 se muestran los valores de porosidad medidos en las dos probetas, mostrando la Tabla 26 los valores medios y desviaciones típicas de la porosidad.

En este caso, las medidas vertical y horizontal en la Probeta 1 se han llevado a cabo respectivamente sobre 0,8147 y 0,752 cm², mientras que en el caso de la Probeta 2, las medidas vertical y horizontal se han realizado sobre 0,8147 y 0,564 cm².

Porosidad (%)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
0,17	0,04	0,21	0,21
0,06	0,09	0,1	0,18
0,09	0,094	0,17	0,12
0,1	0,07	0,14	0,11
0,07	0,04	0,12	0,1
0,05	0,075	0,13	0,1
0,08	0,08	0,16	0,13
0,05	0,06	0,08	0,09
0,1	0,39	0,15	0,05
0,05	0,14	0,17	---
0,04	0,04	0,18	---
0,11	0,24	0,16	---
0,1	---	0,11	---

Tabla 25: Valores individuales de porosidad (tras temple y revenido a 300°C).

	Porosidad (%)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,08	0,11	0,15	0,12
Desviación típica	0,04	0,10	0,04	0,05
Valor medio global	0,1		0,13	

Tabla 26: Valores medios y desviación típica de porosidad (tras temple y revenido a 300°C).

En este caso, especialmente en la sección vertical, se ha medido una porosidad mayor en la probeta fabricada utilizando una velocidad superior. En la Figura 24 se muestran ejemplos de los poros encontrados.

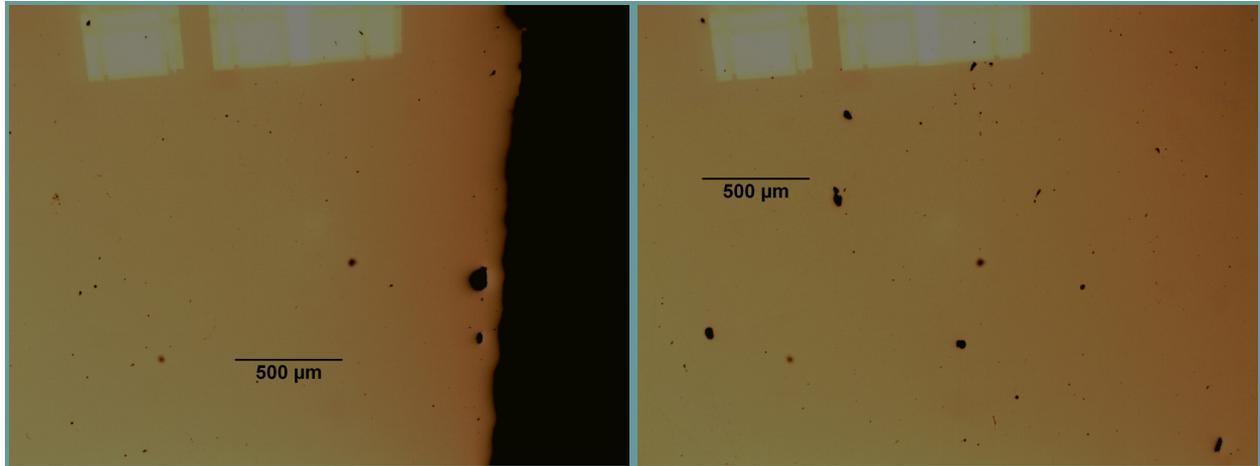


Figura 24: Ejemplos de porosidad detectada en la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de las probetas (tras temple y revenido a 300°C).

En cuanto al tamaño de los poros, el mayor poro se detectó en la Probeta 2 (850 mm/s), siendo la mayor de sus dimensiones 125 µm, mientras que el mayor de los poros detectado en la Probeta 1 (750 mm/s) tenía 119 µm en la mayor de sus dimensiones. Dichos poros se localizaron en la sección horizontal en el caso de la Probeta 1 y en la sección vertical en la Probeta 2.

• **4.2.4- Dureza Vickers.**

En primer lugar, en la Tabla 27 se indican los valores medidos de dureza obtenidos con carga de 1 kg, recogiendo en la Tabla 28 los valores medios y las desviaciones típicas.

Dureza Vickers (1kg)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
507	529	536	529
512	540	515	534
518	512	525	533
520	542	527	520
540	534	533	525

Tabla 27: Medidas individuales de dureza Vickers (tras temple y revenido a 300°C).

	Dureza (1kg)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio (HV)	519	531	527	528
Desviación típica	13	12	8	6
Valor medio global (HV)				
	525		528	
Valor medio global (HRC)				
	49,8		50	

Tabla 28: Valores medios y desviación típica de dureza (tras temple y revenido a 300°C).

A continuación, en la Tabla 29, se indican las microdurezas obtenidas con carga de 200 g. En este caso se indican los valores medios de al menos 12 medidas, tanto en la sección vertical como la horizontal.

	Microdureza (200g)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio (HV)	523	539	510	508
Desviación típica	12	21	25	27
Valor medio (HRC)				
	49,6	51	48,8	48,7

Tabla 29: Valores medios y desviación típica de dureza en la sección horizontal (tras temple y revenido a 300°C).

- **4.2.5- Microestructura.**

La microestructura tras el tratamiento térmico de temple al aire y revenido a 300°C consiste en martensita revenida a baja temperatura, pero en este caso ha dejado de ser visible la estructura de fabricación que se observaba nítidamente antes del tratamiento térmico. Tras el tratamiento de temple y revenido a 300°C se ha obtenido una microestructura homogénea, tal y como se pone de manifiesto en la Figura 25. El revenido a 300°C de este acero prácticamente solo induce una cierta relajación de las tensiones internas desarrolladas en el temple.

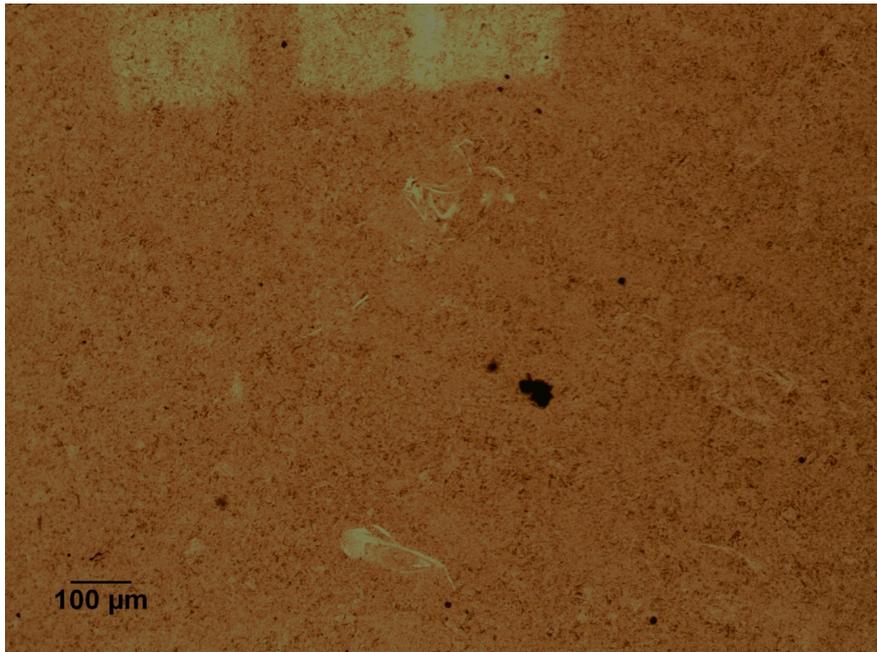


Figura 25: Microestructura típica de las probetas tras temple y revenido a 300°C.

- **4.2.6- Propiedades mecánicas a tracción.**

Las propiedades mecánicas del material obtenido utilizando las dos velocidades de escaneo y el tratamiento térmico de temple al aire y revenido a 300°C se muestran en la Tabla 30. La diferencia más destacable relativa a la influencia de la velocidad de escaneo es el superior alargamiento obtenido al utilizar la menor velocidad, que al igual que ocurría con el estado bruto de fabricación, se puede atribuir a la menor porosidad obtenida en este caso.

Por su parte, en las Figuras 26 y 27 se muestran las curvas de tensión-deformación a tracción que se han obtenido para las dos probetas.

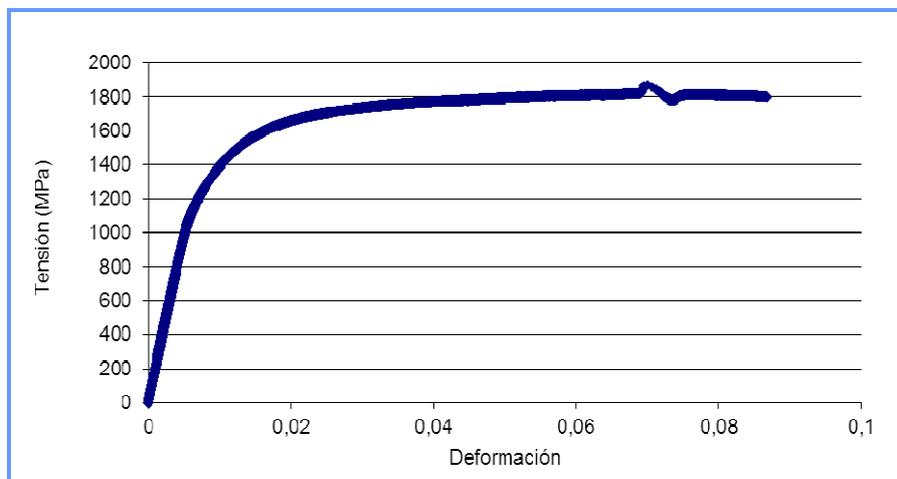


Figura 26: Curva tensión-deformación verdadera de la Probeta 1 (750mm/s) tras temple y revenido a 300°C.

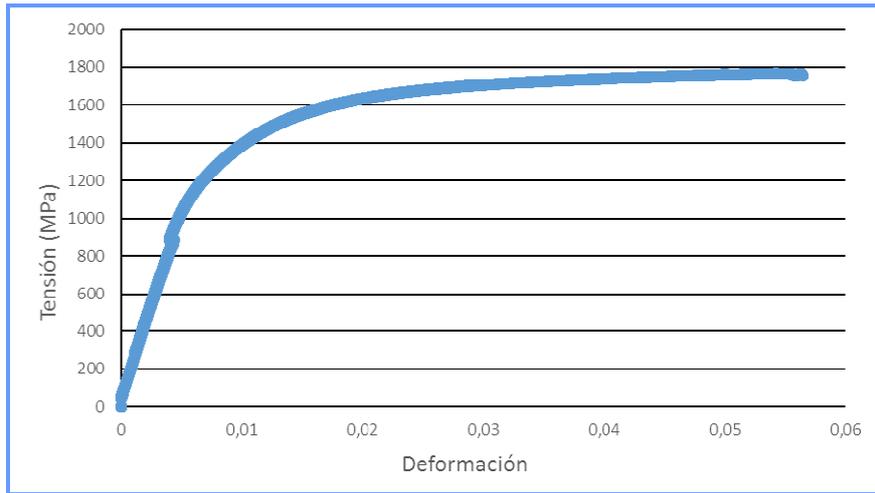


Figura 27: Curva tensión-deformación verdadera de la Probeta 2 (850 mm/s) tras temple y revenido a 300°C.

	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)	Z (%)	K (MPa)	n
Probeta 1 (750 mm/s)	199	1289	1652	8,4	5,4	2104	0,05
Probeta 2 (850 mm/s)	195	1310	1665	5	7,1	2080	0,052

Tabla 30: Propiedades mecánicas a tracción del acero tras temple y revenido a 300°C.

4.3- Probetas tras temple y revenido a 450°C.

- 4.3.1- Rugosidad.

En las Tablas 31 y 32 se indican los valores de rugosidad medidos en las caras lateral y superior de las dos probetas analizadas, así como los valores medios y la desviación típica de las mismas.

Rugosidad, Ra (μm)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
10,4	7,6	10,5	9,8
8,5	9,3	8,5	10,8
9,7	11,3	11,2	12,6
12,0	12,1	9,2	11,7
8,6	9,8	12,3	11,3

Tabla 31: Resultados individuales de rugosidad (tras temple y revenido a 450°C).

	Rugosidad, Ra (μm)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	9,9	10,0	10,3	11,2
Desviación típica	1,5	1,7	1,5	1,0

Tabla 32: Valores medios y desviación típica de rugosidad (tras temple y revenido a 450°C).

- **4.3.2- Tensiones residuales.**

Las tensiones residuales determinadas en las tres direcciones de medida, así como las tensiones medias y las desviaciones típicas calculadas se presentan en las Tablas 33, 34 y 35.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 1		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	244	339	304
Lateral 1	313	352	331
Lateral 2	187	269	159

Tabla 33: Tensiones residuales (MPa) Probeta 1 (750 mm/s) tras temple y revenido a 450°C.

	Tensiones residuales (MPa) Probeta 2		
	- 45°	0°	+ 45°
Cara superior	85	107	103
Lateral 1	241	247	210
Lateral 2	231	234	195

Tabla 34: Tensiones residuales (MPa) Probeta 2 (850 mm/s) tras temple y revenido a 450°C.

	Tensiones residuales (MPa)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Cara lateral	Cara superior	Cara lateral	Cara superior
Tensión media	269	296	227	99
Desviación típica	36	48	21	12

Tabla 35: Tensión residual media y desviación típica (tras temple y revenido a 450°C).

- **4.3.3- Porosidad.**

En la Tabla 36 se muestran los valores medidos de porosidad, indicándose los valores medios y desviaciones típicas de los mismos en la Tabla 37.

Las medidas en la sección vertical y horizontal de la Probeta 1 se llevaron a cabo respectivamente sobre un área total de 0,8147 y 0,6267 cm², mientras que las mismas medidas en la Probeta 2 se efectuaron sobre áreas totales respectivas de 0,8773 y 0,564 cm². En la Figura 28 se muestran ejemplos del tipo de porosidad encontrado.

Porosidad (%)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
0,48	0,31	0,34	0,26
0,34	0,64	0,47	0,19
0,47	0,45	0,4	0,61
0,38	0,72	0,44	0,24
0,28	0,93	0,35	0,23
0,28	0,34	0,29	0,22
0,34	0,49	0,27	0,2
0,27	0,22	0,25	0,11
0,18	0,3	0,32	0,61
0,22	0,43	0,29	---
0,22	---	0,37	---
0,22	---	0,35	---
0,18	---	0,17	---
---	---	0,23	---

Tabla 36: Valores individuales de porosidad (tras temple y revenido a 450°C).

	Porosidad (%)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,30	0,48	0,32	0,30
Desviación típica	0,10	0,22	0,08	0,18
Valor medio global	0,39		0,31	

Tabla 37: Valores medios y desviación típica de porosidad (tras temple y revenido a 450°C).

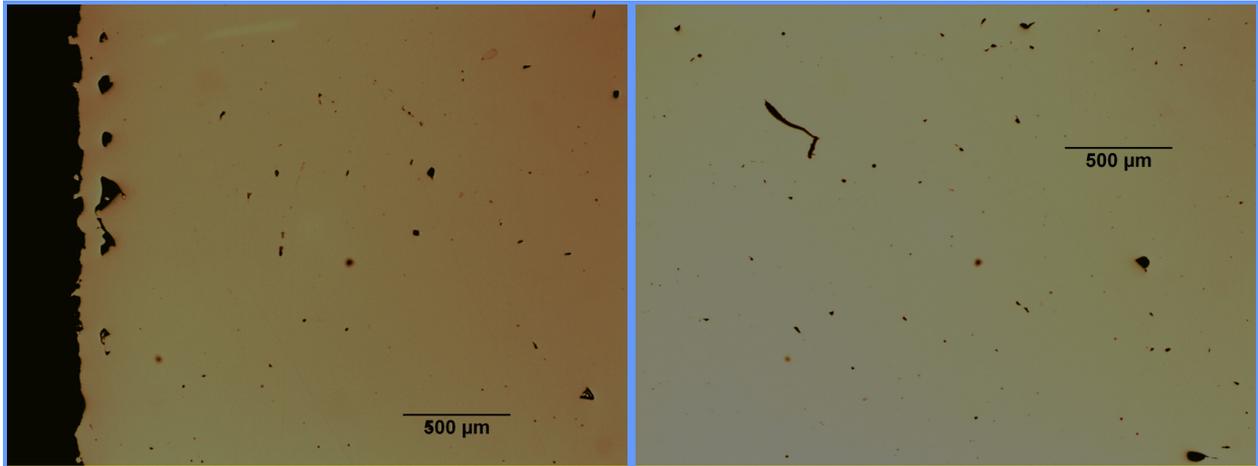


Figura 28: Ejemplos de porosidad detectada en la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de las probetas (tras temple y revenido a 450°C).

En este caso, el poro de mayor tamaño se detectó en la Probeta 1, siendo la mayor de sus dimensiones de 240 µm. En la Probeta 2, el poro de mayor tamaño tenía 220 µm en la mayor de sus dimensiones. La localización de estos poros se produjo en la sección horizontal en el caso de la Probeta 1 y en la sección vertical en el caso de la Probeta 2.

- **4.3.4- Dureza Vickers.**

Las durezas obtenidas con la carga de 1 kg, así como los valores medios y desviaciones típicas se presentan en las Tablas 38 y 39.

Dureza Vickers (1kg)			
Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
542	549	534	563
555	557	551	553
544	549	549	565
557	544	534	538
540	542	544	561

Tabla 38: Medidas individuales de dureza Vickers (tras temple y revenido a 450°C).

	Dureza (1kg)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio (HV)	548	548	542	556
Desviación típica	8	6	8	11
Valor medio global (HV)				
	548		549	
Valor medio global (HRC)				
	51,3		51,3	

Tabla 39: Valores medios y desviación típica de dureza (tras temple y revenido a 450°C).

Por su parte, en la Tabla 40 se muestran los valores medios de la microdureza Vickers, medidos en la sección vertical y horizontal de cada probeta, con carga de 200 g sobre un total de 12 valores.

	Microdureza (200g)			
	Probeta 1 (750 mm/s)		Probeta 2 (850 mm/s)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Valor medio (HV)	548	529	549	546
Desviación típica	17	9	13	16
Valor medio (HRC)				
	50,8	50,2	51	51,2

Tabla 40: Valores medios y desviación típica de dureza en la sección horizontal (tras temple y revenido a 450°C).

- **4.3.5- Microestructura.**

La microestructura observada (Figura 29) corresponde a martensita revenida, ahora a una temperatura superior a la del epígrafe anterior. Al igual que en aquel caso, se trata de una microestructura homogénea donde ya no resulta visible la estructura de fabricación. El revenido de este acero a esta temperatura induce la precipitación de carburos de cromo de forma fina y dispersa, dando lugar al máximo endurecimiento posible.

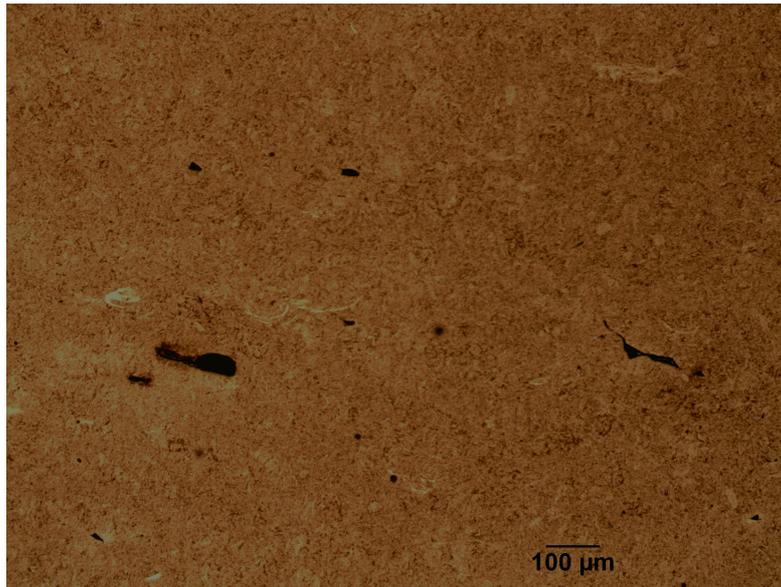


Figura 29: Microestructura típica de las probetas tras temple y revenido a 450°C.

- **4.3.6- Propiedades mecánicas a tracción.**

La Tabla 41 recoge las propiedades a tracción medidas al utilizar las dos velocidades de escaneo y el tratamiento térmico de temple al aire y revenido a 450°C, mostrándose en las Figuras 30 y 31, las curvas tensión-deformación obtenidas para ambas velocidades. En este caso, la velocidad de escaneo utilizada apenas ha tenido influencia alguna destacable. Si bien, se puede destacar que al igual que en los casos anteriores, hay un alargamiento ligeramente mayor al utilizar la menor velocidad de escaneo, que podría explicarse en virtud de la menor porosidad que generalmente se da al utilizar una menor velocidad de escaneo.

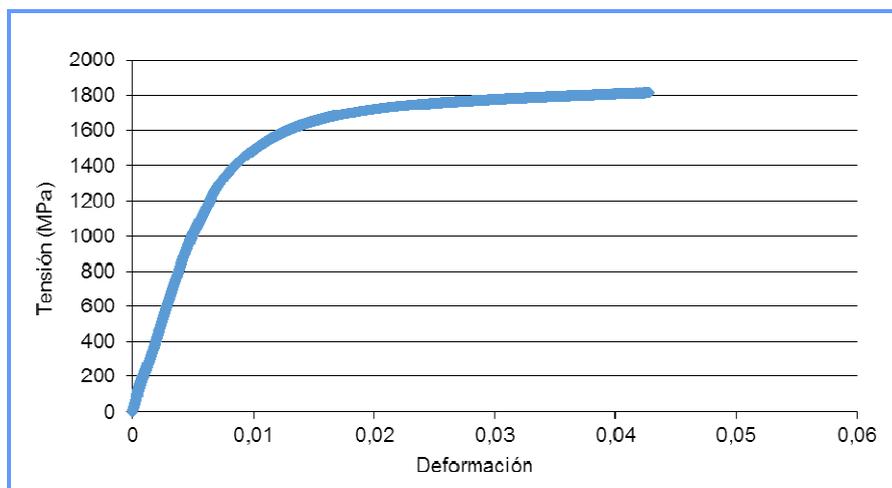


Figura 30: Curva tensión-deformación verdadera de la Probeta 1 (750 mm/s) tras temple y revenido a 450°C.

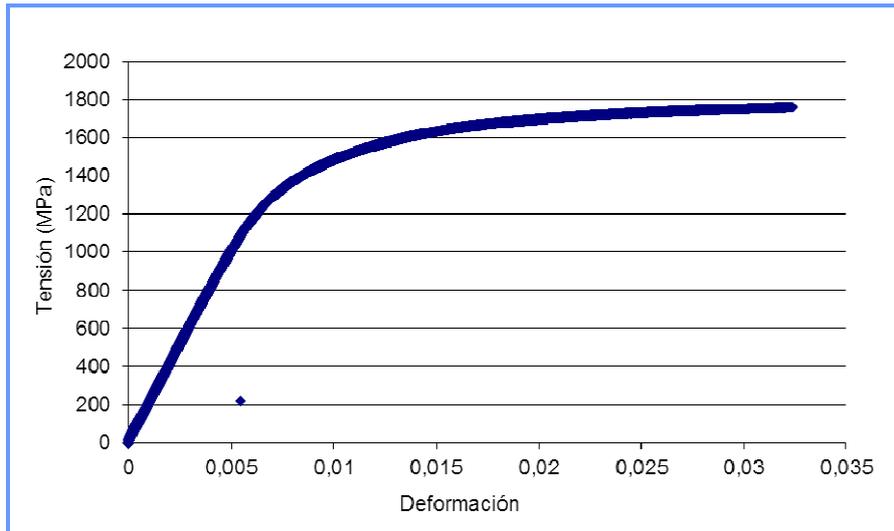


Figura 31: Curva tensión-deformación verdadera de la Probeta 2 (850 mm/s) tras temple y revenido a 450°C.

	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)	Z (%)	K (MPa)	n
Probeta 1 (750 mm/s)	203	1412	1738	3,6	3,93	2138	0,048
Probeta 2 (850 mm/s)	201	1421	1705	2,6	1,96	2080	0,051

Tabla 41: Propiedades mecánicas a tracción del acero tras temple y revenido a 450°C.

4.4- Probeta 3.

- 4.4.1- Rugosidad.

En la Tabla 42 se muestran los valores de la rugosidad media, medida en las caras lateral y superior de la Probeta 3. Por su parte, en la Tabla 43 se indican los valores medios y desviaciones típicas de dichas medidas.

Rugosidad, Ra (μm)	
Cara lateral	Cara superior
8	24,8
4,85	15,2
4,9	10,9
4,3	16,7
3,8	23,3

Tabla 42: Resultados individuales de rugosidad (Probeta 3).

	Rugosidad, Ra (μm)	
	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	5,2	18,2
Desviación típica	1,7	5,8

Tabla 43: Valores medios y desviación típica de rugosidad (Probeta 3).

- **4.4.2- Porosidad.**

En las Tablas 44 y 45 se muestran los valores de porosidad medidos, así como los valores medios y desviaciones típicas de las medidas realizadas.

En este caso, las medidas de porosidad se efectuaron sobre $0,627 \text{ cm}^2$ en la sección horizontal y sobre $0,815 \text{ cm}^2$ en la sección vertical.

Porosidad (%)	
Vertical	Horizontal
0,21	0,28
0,16	0,15
0,17	0,21
0,22	0,3
0,15	0,19
0,2	0,15
0,18	0,22
0,2	0,18
0,24	0,16
0,18	0,14
0,24	---
0,17	---
0,18	---

Tabla 44: Valores individuales de porosidad (Probeta 3).

	Porosidad (%).	
	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,19	0,20
Desviación típica	0,03	0,05
Valor medio global	0,195	

Tabla 45: Valores medios y desviación típica de porosidad (Probeta 3).

El poro de mayor tamaño se detectó en la sección horizontal. Dicho poro presentaba en la mayor de sus dimensiones una longitud de 180 μm . Por su parte, el poro de mayor tamaño que se encontró en la sección vertical tenía 90 μm en la mayor de sus dimensiones. En la Figura 32 se muestran ejemplos de la porosidad encontrada.

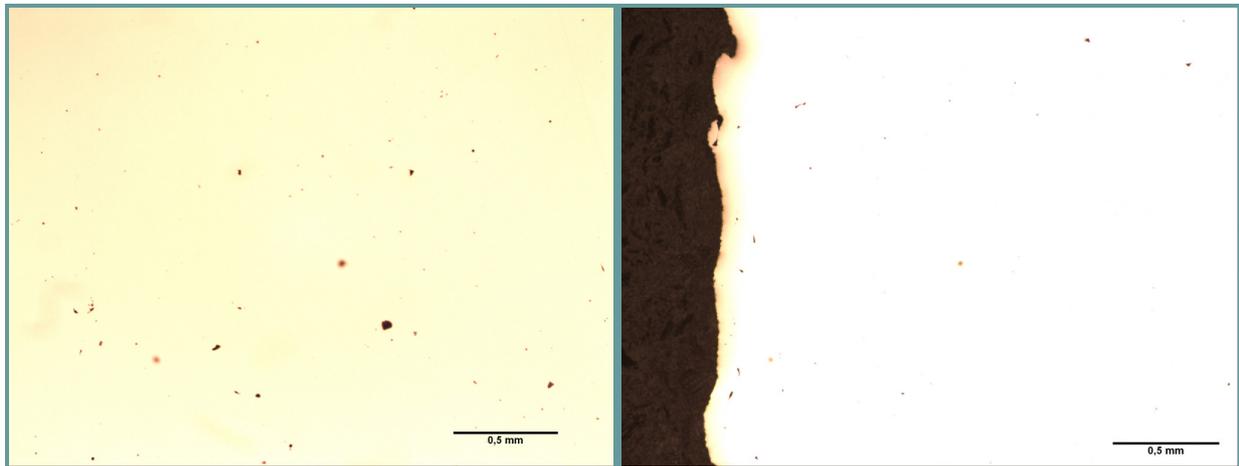


Figura 32: Ejemplo de porosidad en la zona central (izq.) y lateral (dcha.) de la Probeta 3.

- **4.4.3- Microestructura.**

La microestructura es completamente martensítica, observándose un buen solape entre los caminos de fusión y entre las diferentes capas. Se observa que hay una menor cantidad de poros y de un menor tamaño en la zona de unión del contorno con el núcleo de la pieza, debido al contorno y post-contorno adicional utilizados (Figura 33).

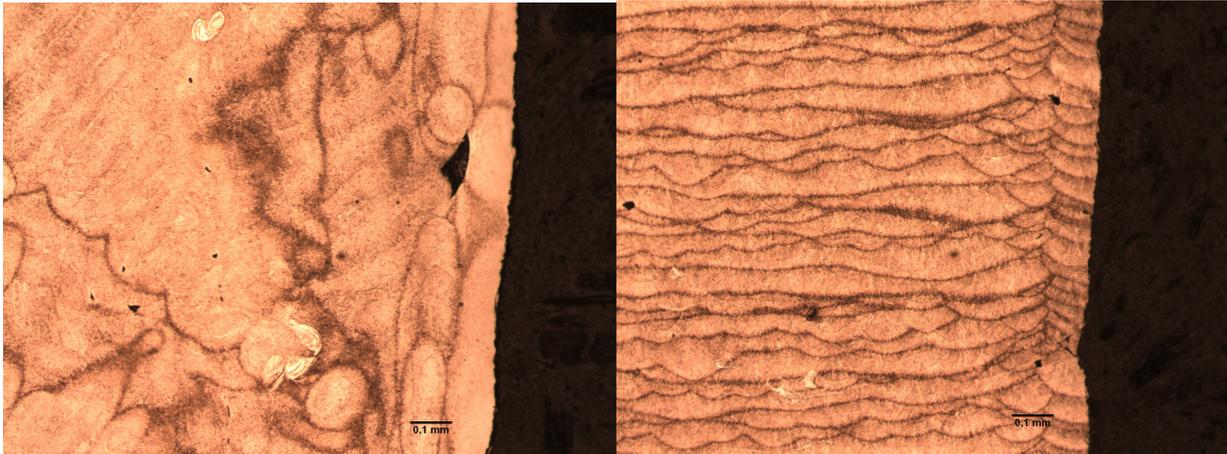


Figura 33: Microestructura sección horizontal (izq.) y sección vertical (dcha.) Probeta 3.

En la Figura 34 se observa que la capa superior presenta una gran cantidad de ondulaciones, lo que explica los elevados valores de rugosidad obtenidos. Por su parte, el espesor de esta capa es del orden de los 60 μm .

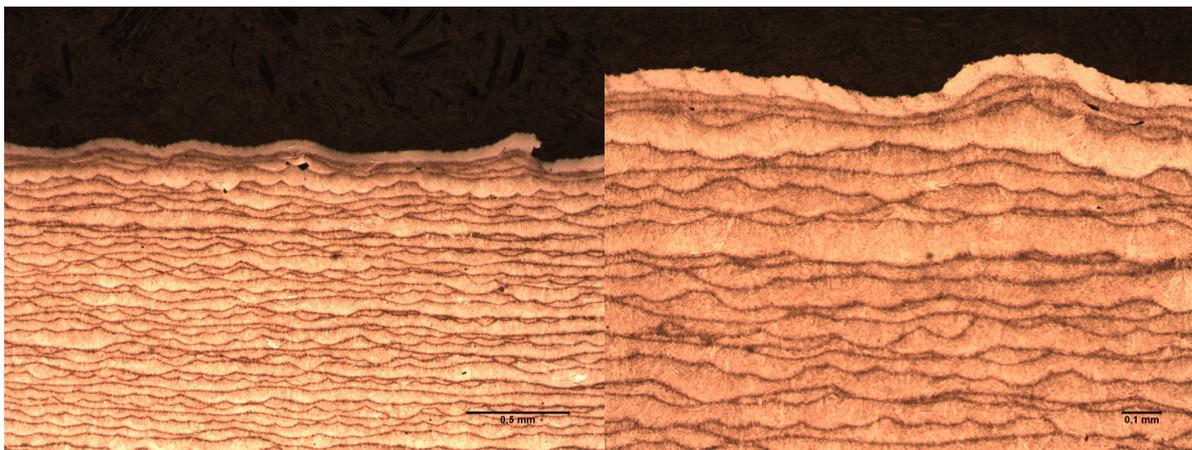


Figura 34: Microestructura de la región superficial superior.

4.5- Probeta 4.

- **4.5.1- Rugosidad.**

En las Tablas 46 y 47 se muestran los valores de rugosidad medidos en las caras lateral y superior de la Probeta 4, así como los valores medios y la desviación típica de las mismas.

Rugosidad, Ra (μm)	
Cara lateral	Cara superior
5,3	28,0
4,7	19,4
5,2	12,6
4,2	15,1
4,2	24,7

Tabla 46: Resultados individuales de rugosidad (Probeta 4).

	Rugosidad, Ra (μm)	
	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	4,7	20,0
Desviación típica	0,5	6,4

Tabla 47: Valores medios y desviación típica de rugosidad (Probeta 4).

- **4.5.2- Porosidad.**

En la Tabla 48 se indican los valores de porosidad medidos en la Probeta 4, mostrándose en la Tabla 49 los valores medios y desviaciones típicas calculados para las medidas realizadas.

Para la Probeta 4, las medidas se llevaron a cabo sobre $0,627 \text{ cm}^2$ en la sección horizontal y $0,752 \text{ cm}^2$ en la sección vertical. La Figura 35 muestra ejemplos de la porosidad encontrada.

Porosidad (%)	
Vertical	Horizontal
0,15	0,2
0,15	0,16
0,16	0,25
0,18	0,28
0,16	0,16
0,2	0,18
0,17	0,19
0,17	0,15
0,15	0,18
0,22	0,32
0,2	---
0,17	---

Tabla 48: Valores individuales de porosidad (Probeta 4).

	Porosidad (%)	
	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,17	0,21
Desviación típica	0,02	0,06
Valor medio global	0,19	

Tabla 49: Valores medios y desviación típica de la porosidad (Probeta 4).

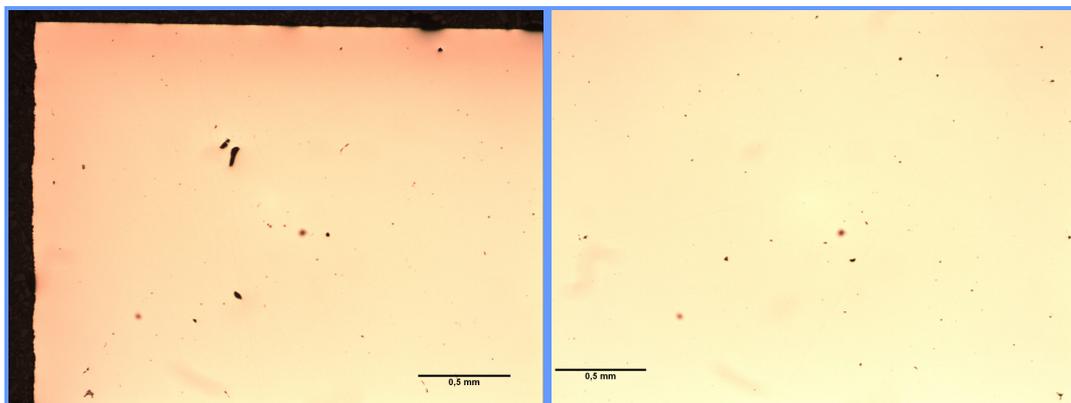


Figura 35: Ejemplo de porosidad en la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de la Probeta 4.

El mayor de los poros en esta probeta se localizó en la sección horizontal, presentando 117 μm en la mayor de sus dimensiones. En lo que respecta a la

sección vertical, el poro de mayor tamaño observado tenía en la mayor de sus dimensiones 69 μm .

- **4.5.3- Microestructura.**

Tras el ataque con el reactivo Vilella, se observa que la probeta presenta una microestructura completamente martensítica, poniéndose de manifiesto un buen solape entre los caminos de fusión. Se puede también ver, que a pesar de presentar cierta porosidad en la zona de unión entre el núcleo y el contorno de la probeta, la cantidad y tamaño de los poros en esa zona es significativamente menor al encontrado en las pruebas anteriores.

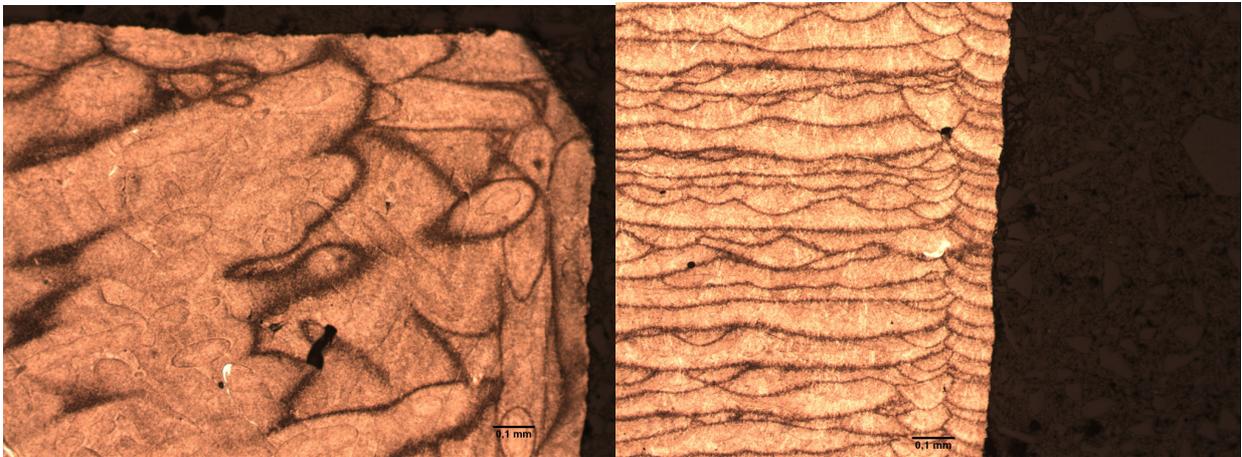


Figura 36: Microestructura sección horizontal (izq.) y sección vertical (dcha.) de la Probeta 4.

También se pone de manifiesto, como se puede ver en la Figura 37, la presencia de una capa final más clara, ya que como se ha explicado anteriormente es la última capa que se depositó (capa no revenida). El espesor que presenta la citada capa es de 60 μm .

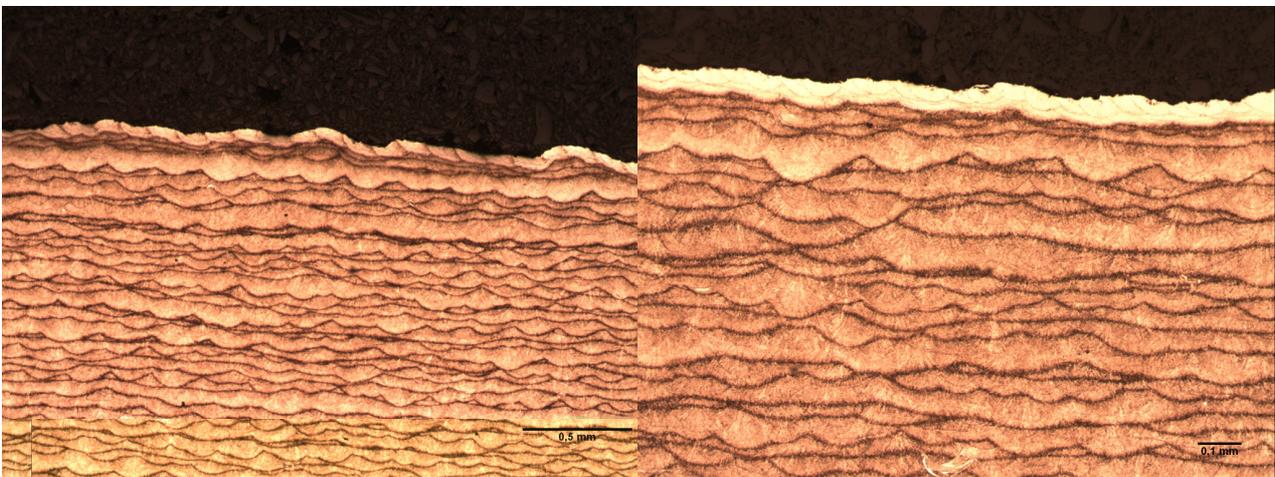


Figura 37: Microestructura de la región superficial superior.

4.6- Probeta 5.

- **4.6.1- Rugosidad.**

Los valores de rugosidad media, medidos en las caras lateral y superior de la Probeta 5, así como los valores medios y desviaciones típicas de dichas medidas, se muestran en las Tablas 50 y 51.

Rugosidad, Ra (μm)	
Cara lateral	Cara superior
5,6	10,0
3,5	12,5
4,3	15,8
5,5	30,6
3,9	13,8

Tabla 50: Resultados individuales de rugosidad (Probeta 5).

	Rugosidad, Ra (μm)	
	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	4,5	16,5
Desviación típica	0,9	8,1

Tabla 51: Valores medios y desviación típica de rugosidad (Probeta 5).

- **4.6.2- Porosidad.**

A continuación, en las Tablas 52 y 53 se exponen tanto los valores de porosidad medidos, como los valores medios y desviaciones típicas calculados para las medidas realizadas.

La medida de porosidad se realizó en la sección horizontal sobre una superficie de $0,627 \text{ cm}^2$, mientras que en la sección vertical la medida se realizó sobre $0,752 \text{ cm}^2$ de superficie. Ejemplos de la porosidad encontrada se muestran en la Figura 38.

Porosidad (%)	
Vertical	Horizontal
0,11	0,14
0,14	0,2
0,12	0,1
0,1	0,15
0,1	0,15
0,13	0,17
0,2	0,17
0,12	0,15
0,15	0,11
0,15	0,15
0,15	---
0,1	---

Tabla 52: Valores individuales de porosidad (Probeta 5).

	Porosidad (%).	
	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,13	0,15
Desviación típica	0,0294	0,0288
Valor medio global	0,14	

Tabla 53: Valores medios y desviación típica de porosidad (Probeta 5).

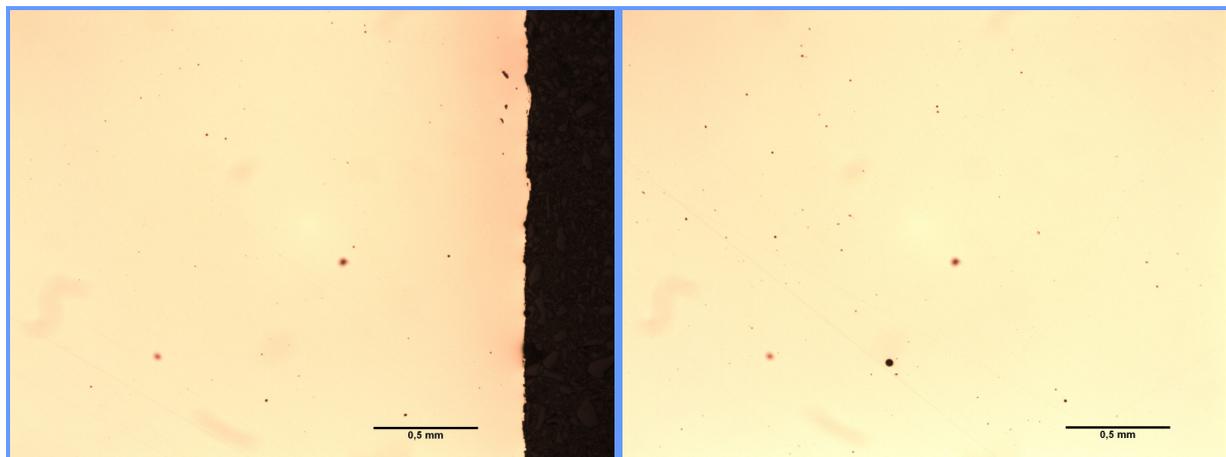


Figura 38: Ejemplo de porosidad en la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de la Probeta 5.

El poro de mayor tamaño que presentaba esta probeta tenía 100 μm de longitud en la mayor de sus dimensiones, localizándose este poro en la sección vertical. En la sección horizontal el mayor de los poros que se localizó presentaba una longitud de 95 μm en la mayor de sus dimensiones.

- **4.6.3- Microestructura.**

La microestructura que presenta esta probeta es una microestructura totalmente martensítica, con un buen solape entre los distintos caminos de fusión. Se puede observar también una reducción en la cantidad y tamaño de los poros presentes en la zona de unión del núcleo con el contorno de la pieza, resultado del contorno y post-contorno adicional que se han utilizado en la fabricación de la probeta (véase la Figura 39).

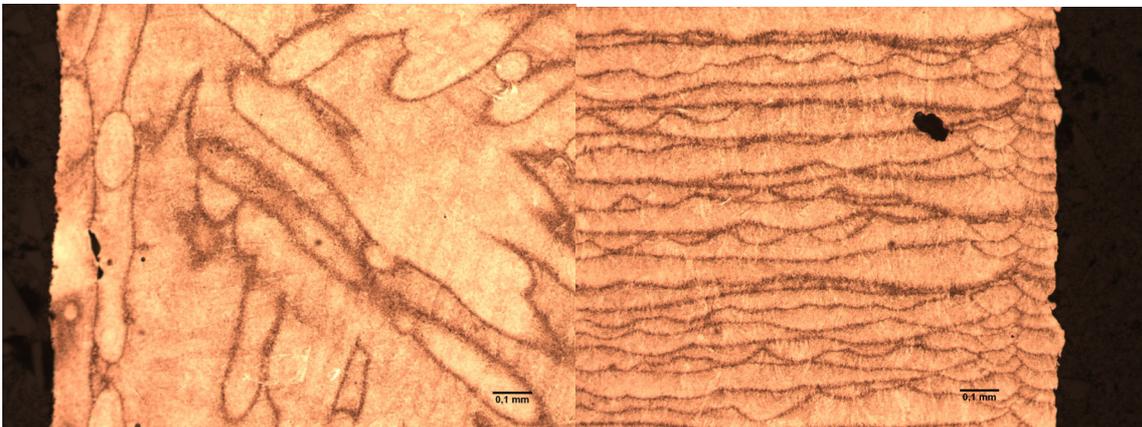


Figura 39: Microestructura sección horizontal (izq.) y sección vertical (dcha.) de la Probeta 5.

La última de las capas depositadas durante la fabricación, que tras el ataque con el reactivo muestra una coloración más clara (Figura 40), tiene en esta probeta un espesor de unos 66 μm .

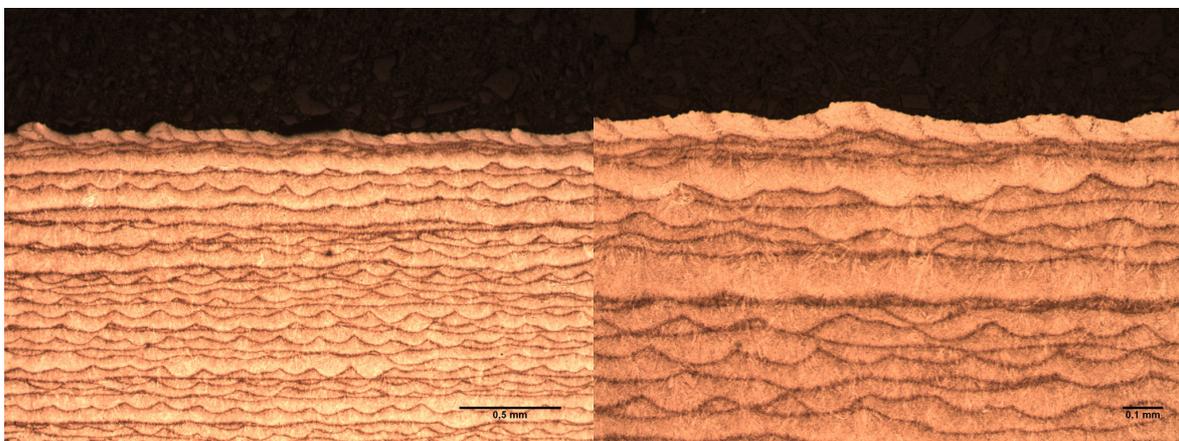


Figura 40: Microestructura de la región superficial superior.

4.7- Probeta 6.

- **4.7.1- Rugosidad.**

Los valores de rugosidad media medidos en la Probeta 6 en las caras lateral y superior se indican en la Tabla 54, mientras que en la Tabla 55 se presentan los valores medios y las desviaciones típicas de las medidas anteriormente expuestas.

Rugosidad, Ra (μm)	
Cara lateral	Cara superior
4,8	13,7
3,3	13,8
4,2	15,3
4,3	18,8
3,5	14

Tabla 54: Resultados individuales de rugosidad (Probeta 6).

	Rugosidad, Ra (μm)	
	Cara lateral	Cara superior
Valor medio	4,0	15,1
Desviación típica	0,6	2,2

Tabla 55: Valores medios y desviación típica de rugosidad (Probeta 6).

- **4.7.2- Porosidad.**

En la Tabla 56 se indican los valores de porosidad medidos en la Probeta 6, tanto en la sección vertical como horizontal. Los valores medios y desviaciones típicas de dichas medidas aparecen en la Tabla 57.

En la sección horizontal las medidas de la porosidad se efectuaron sobre $0,627 \text{ cm}^2$, mientras que en el caso de la sección vertical la superficie analizada fue de $0,877 \text{ cm}^2$. En la Figura 41 se muestran ejemplos de la porosidad.

Porosidad (%)	
Vertical	Horizontal
0,14	0,15
0,15	0,14
0,15	0,16
0,14	0,18
0,15	0,17
0,14	0,14
0,14	0,16
0,13	0,14
0,1	0,14
0,15	0,16
0,15	0,13
0,14	---
0,15	---
0,11	---

Tabla 56: Valores individuales de porosidad (Probeta 6).

	Porosidad (%).	
	Vertical	Horizontal
Valor medio	0,14	0,15
Desviación típica	0,01	0,01
Valor medio global		
	0,145	

Tabla 57: Valores medios y desviación típica de porosidad (Probeta 6).

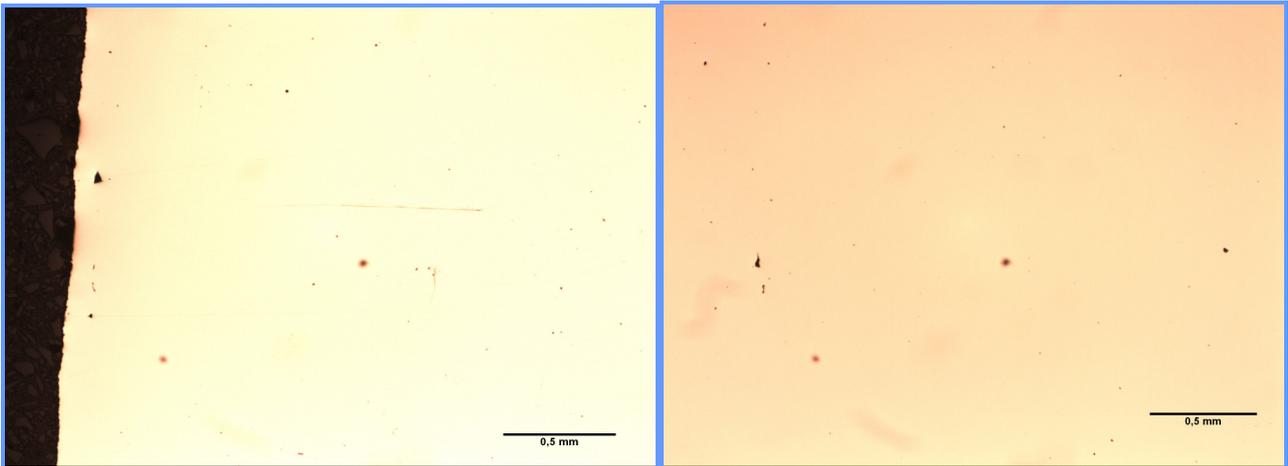


Figura 41: Ejemplo de porosidad en la zona lateral (izq.) y central (dcha.) de la Probeta 6.

En esta probeta se detectó un poro de 89 μm en la mayor de sus dimensiones, situándose dicho poro en la sección horizontal. El mayor de los poros que presentaba la sección vertical tenía 72 μm en la mayor de sus dimensiones.

- **4.7.3- Microestructura.**

La Probeta 6 presenta una estructura 100% martensítica. Se puede ver también que la probeta presenta un buen solape entre los caminos de fusión. Debido que al igual que las probetas 3, 4 y 5, la Probeta 6 fue fabricada utilizando un contorno y post-contorno adicional, esta probeta también presenta poros de menor tamaño y en menor número en la zona de unión del núcleo con el contorno de la pieza (véase la Figura 42).

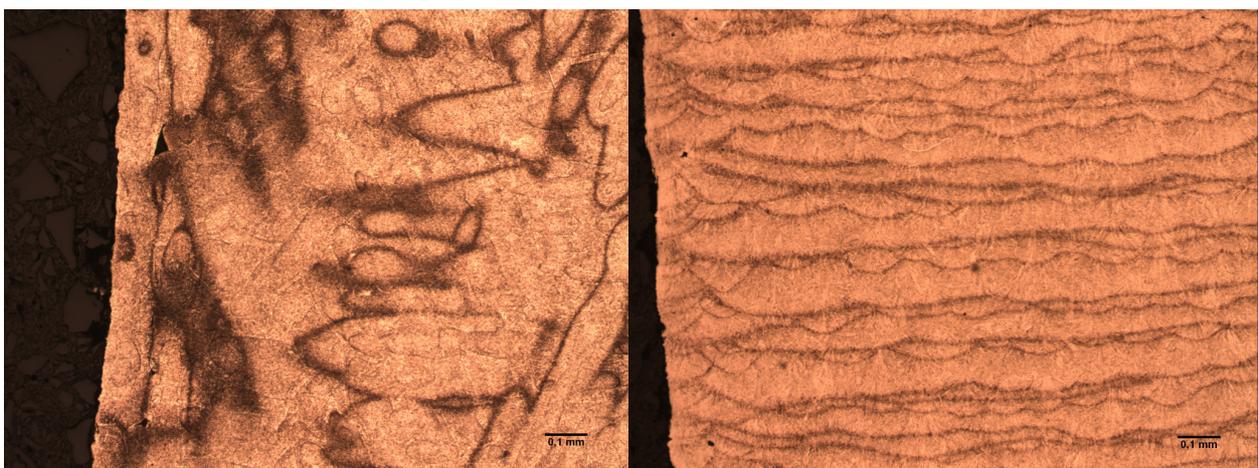


Figura 42: Microestructura sección horizontal (izq.) y vertical (dcha.) de la Probeta 6.

El espesor de la capa superficial, que se muestra en la Figura 43, medido en esta probeta es de 70 μm .

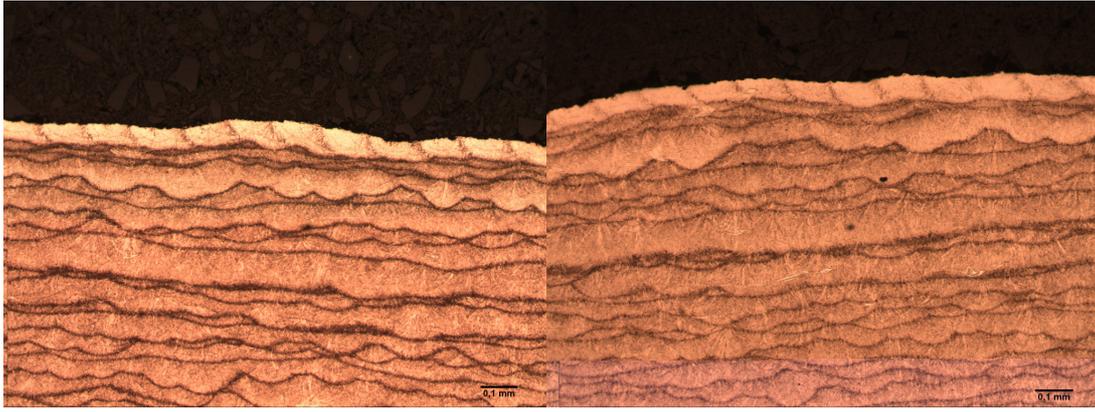


Figura 43: Microestructura de la región superficial superior.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Las Figuras 44 y 45 resumen los valores de la rugosidad media determinados tanto en la cara superior como en las laterales en los tres estados de fabricación analizados, bruto de fabricación (inicial), tras temple y revenido a 300°C (T+R300°C) y tras temple y revenido a 450°C (T+R450°C).

Como cabría esperar, las diferencias entre los tres estados no son significativas, ya que se encuentran dentro del rango de dispersión de las medidas individuales. Tampoco se han observado variaciones significativas de rugosidad entre las caras laterales y superior, ni con la variación de la velocidad de escaneo.

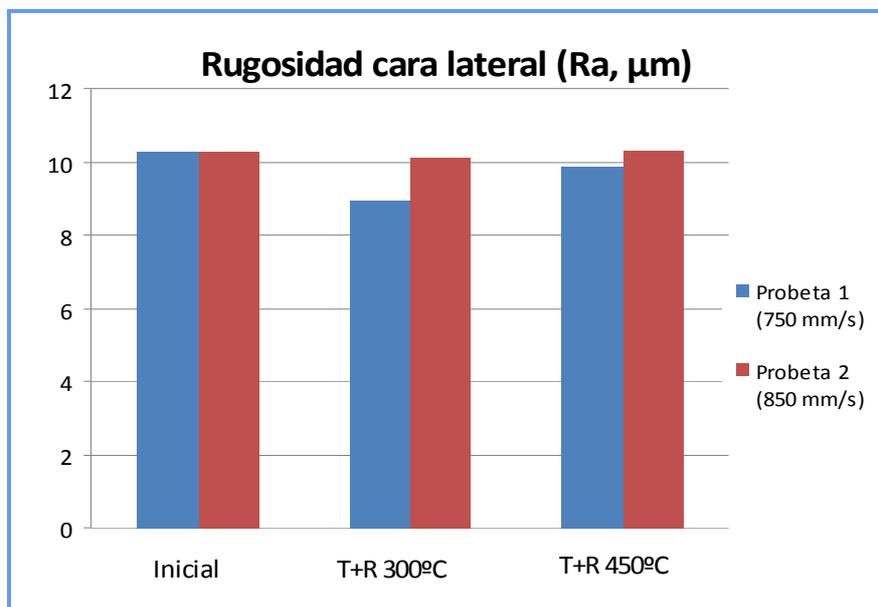


Figura 44: Rugosidades laterales en estado bruto de fabricación y tras tratamientos térmicos.

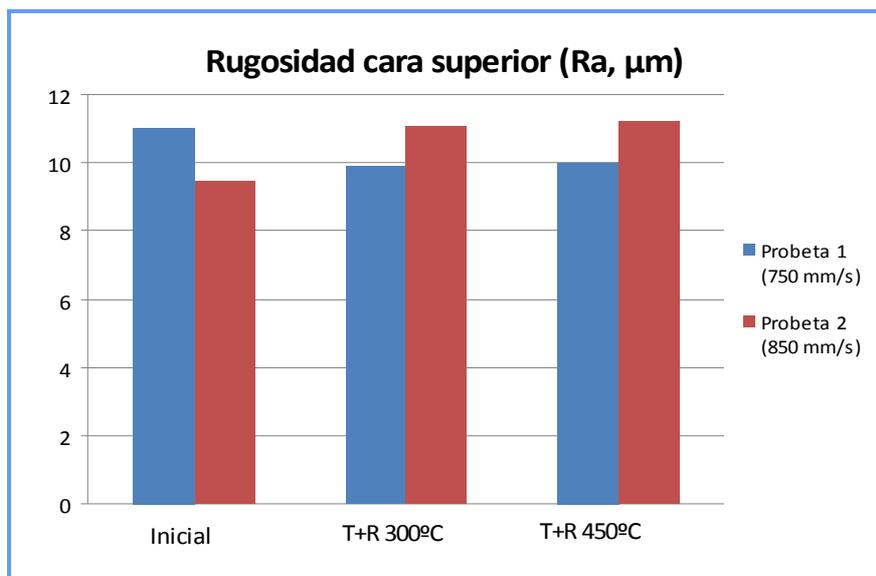


Figura 45: Rugosidades en la cara superior, en estado bruto de fabricación y tras tratamientos térmicos.

Por su parte, en las Figuras 46 y 47 se muestran los valores de rugosidad media obtenidos en las caras lateral y superior de las probetas 3, 4, 5 y 6.

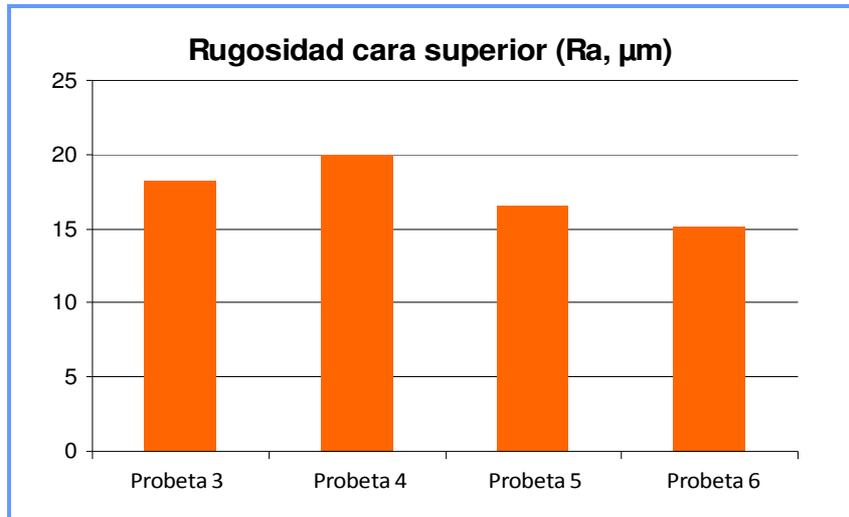


Figura 46: Rugosidad en la cara superior (probetas 3, 4, 5 Y 6).

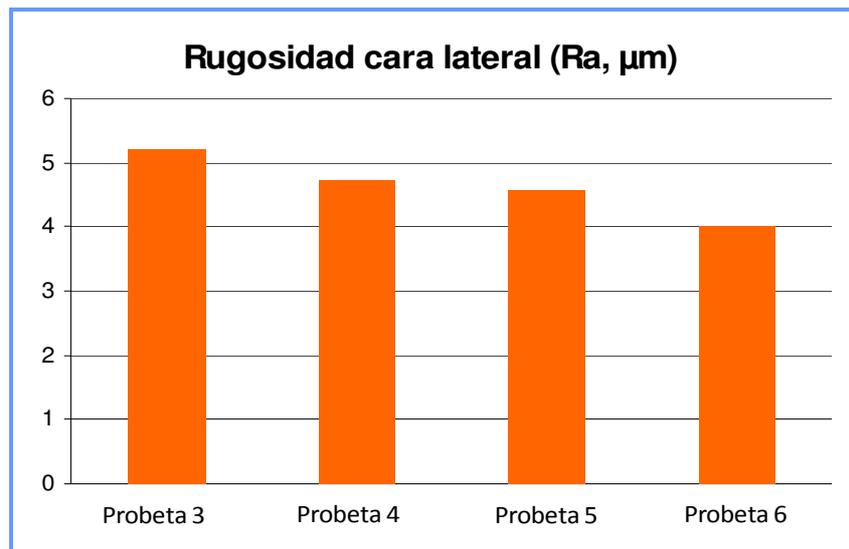


Figura 47: Rugosidad en la cara lateral (probetas 3, 4, 5 y 6).

Se observa que la rugosidad lateral ha disminuido considerablemente, debido al contorno y post-contorno adicionales utilizados en estos casos. Por su parte, la rugosidad de la cara superior no solo no ha disminuido, sino que ha aumentado apreciablemente al haberse modificado los parámetros de fabricación de esta última capa (aumento significativo de la energía aportada por unidad de área). Si bien, se puede observar como para una misma velocidad la rugosidad disminuye al disminuir el espaciado entre pasadas (60 μm para la Probeta 4 y 50 μm para la Probeta 3) y como para un mismo espaciado cuanto menor es la velocidad de escaneo menor es la rugosidad (500 mm/s para la Probeta 4, 450

mm/s para la Probeta 5 y 400 mm/s para la Probeta 6). En todas estas probetas ya se había apreciado, durante la observación microestructural, una ondulación significativa de la superficie de la cara superior, lo que explica la mayor rugosidad.

En lo que respecta a las tensiones residuales, su evolución se muestra en los gráficos de las Figuras 48 y 49. Se observa que las probetas en estado bruto de fabricación (inicial), muestran unas tensiones importantes, de compresión en la cara superior y de tracción en las caras laterales y como consecuencia de la realización de los tratamientos térmicos de temple y revenido, estas tensiones se relajan.

Por otro lado, tras la fabricación se puede observar que las tensiones residuales en la cara lateral son ligeramente superiores en la Probeta 1, mientras que en la cara superior las tensiones son superiores en la Probeta 2. De cualquier manera, las diferencias observadas tanto en la cara superior como en las caras laterales han sido pequeñas.

Las mayores tensiones en la cara lateral, obtenidas en la Probeta 1 pueden ser debidas a la menor velocidad utilizada en su fabricación, ya que esto da lugar a mayores gradientes térmicos.

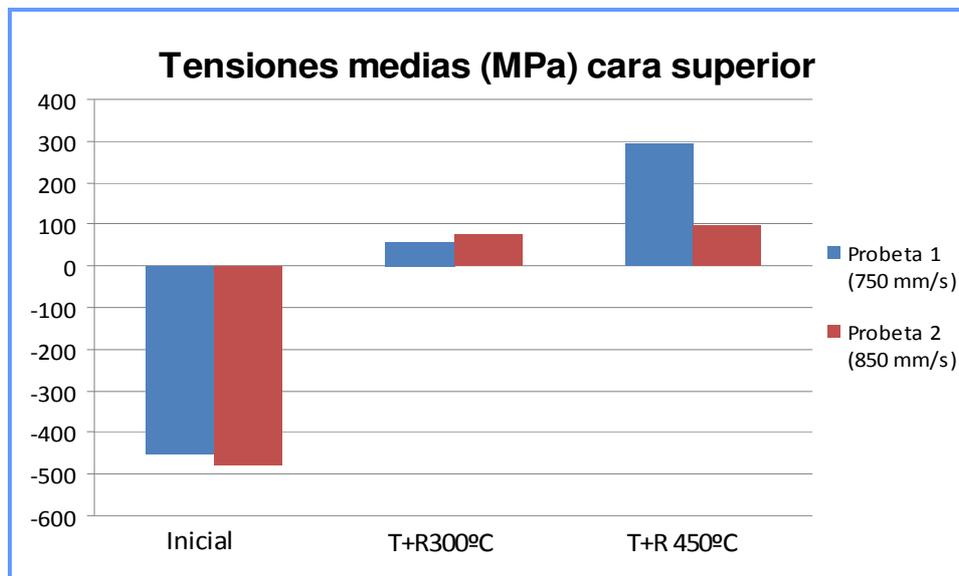


Figura 48: Evolución de las tensiones residuales en la cara superior.

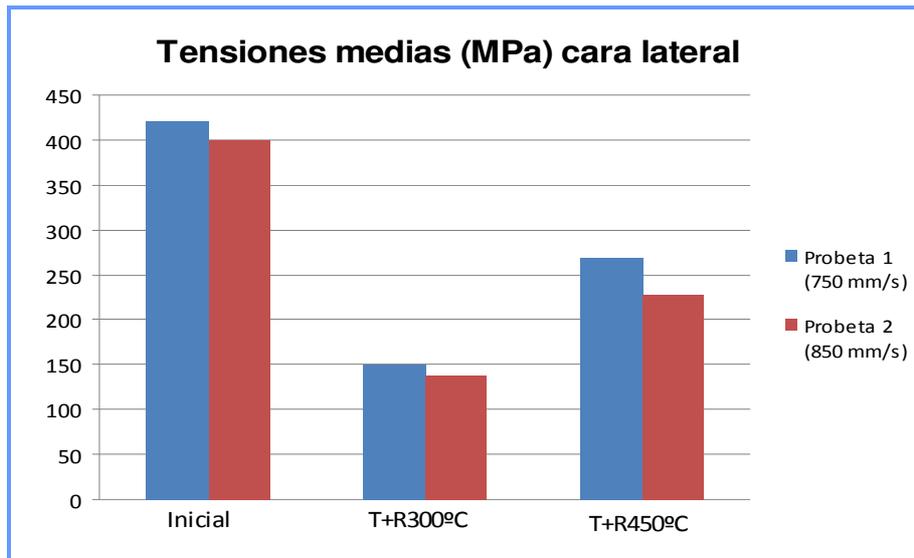


Figura 49: Evolución de las tensiones residuales en la cara lateral.

Justo tras la fabricación, las tensiones que se generan en la superficie superior son de compresión, lo que se justifica porque tras la fusión y resolidificación de los polvos, en el enfriamiento subsiguiente el acero templea. El paso de la estructura austenítica a martensítica en el temple tiene lugar con un aumento de volumen, que el material situado justo debajo impide, introduciendo de este modo una tensión superficial de compresión.

De cualquier manera, las tensiones de compresión de la superficie superior se han convertido en tensiones de tracción tras los tratamientos de temple y revenido, ya que durante el temple, el exterior de la pieza es el que sufre en primer lugar el paso de estructura austenítica a martensítica. En este caso, las tensiones a las que se ve sometido el núcleo se absorben a modo de deformación plástica. Cuando se produce la transformación del núcleo, la periferia de la pieza, ya transformada y por lo tanto más fría y menos plástica, se opone al aumento de volumen que tiene lugar durante la transformación del núcleo, ejerciendo una acción a modo de zuncho, lo que hace que aparezcan tensiones residuales a tracción en la superficie.

Tras el revenido, las probetas fueron enfriadas al aire, produciéndose así un enfriamiento bastante rápido, dando esto lugar a tensiones residuales, mayores cuanto mayor fue la temperatura de revenido. Para eliminar completamente las tensiones residuales que tienen las probetas en estado bruto de fabricación, el

enfriamiento de estas probetas tras el revenido se tendría que haber realizado en el interior del horno.

En las gráficas de la Figuras 50 se indican los valores medios de porosidad medidos en los tres estados analizados, así como el valor promedio global medido sobre cada una de las dos condiciones de fabricación. En estas gráficas se muestra que la porosidad es menor en las probetas realizadas a menor velocidad (mayor aporte térmico), excepto en las probetas que se midieron tras el revenido a 450°C. Al utilizar una velocidad de fabricación menor, se pone en juego una energía por unidad de superficie y de volumen mayor, que permite consolidar mejor el material.

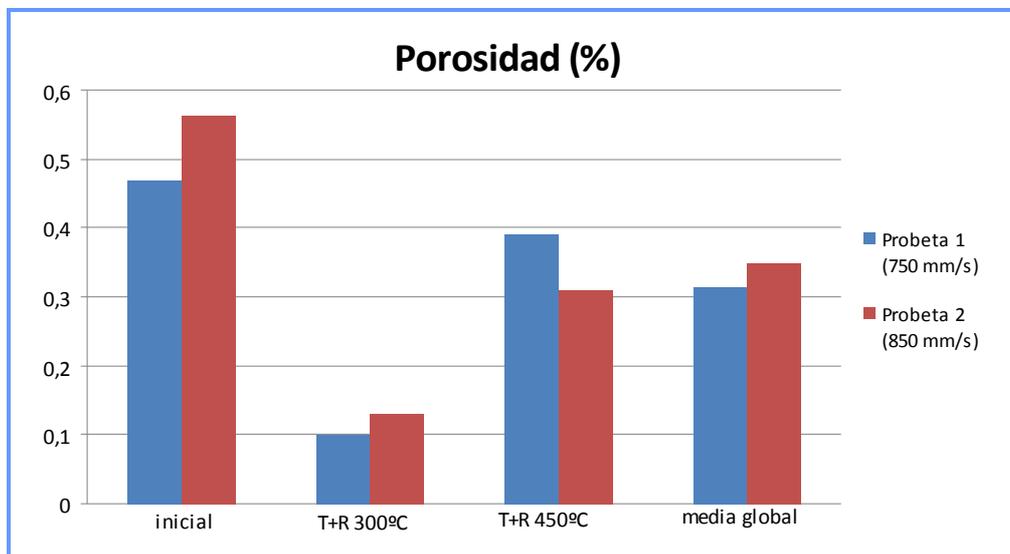


Figura 50: Porosidad en estado bruto de fabricación y tras los tratamientos térmicos, así como porosidad global.

Se ha de indicar que en todos los casos la densidad obtenida es superior al 99%, de la del material fabricado convencionalmente, es decir, se ha obtenido un producto muy bien consolidado.

También se ha de señalar que las diferencias de porosidad entre los tres estados (inicial, T+R 300°C y T+R 450°C), no deberían atribuirse al tratamiento térmico, ya que cabe pensar que este en principio no influye en la porosidad, por lo que habría que atribuirla más bien a la dispersión del propio proceso de fabricación.

Los resultados de porosidad que aparecen en la Figura 51, ponen de manifiesto como la porosidad ha disminuido en las probetas 3, 4, 5 y 6, con

respecto a la porosidad de las dos probetas anteriores. Esto es debido al contorno y post-contorno adicional utilizados, que han reducido significativamente la porosidad en esta región. A su vez, se observa como las probetas 5 y 6, tienen menor porosidad que las probetas 3 y 4, debido a la mayor energía por unidad de área (véase Tabla 4) aportada durante su fabricación, consecuencia del menor espaciado utilizado.

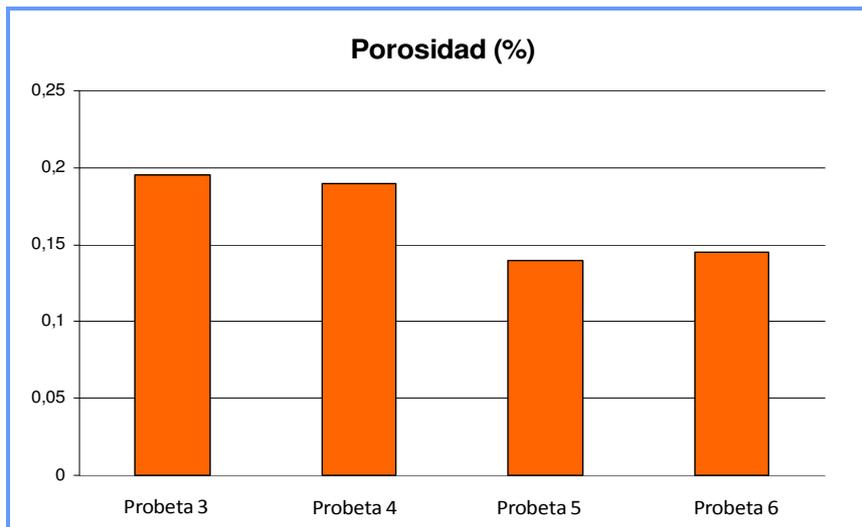


Figura 51: Valores de porosidad (probetas 3, 4, 5 y 6).

En la Figura 52 se comparan ahora los valores medios de dureza medidos en los tres estados analizados.

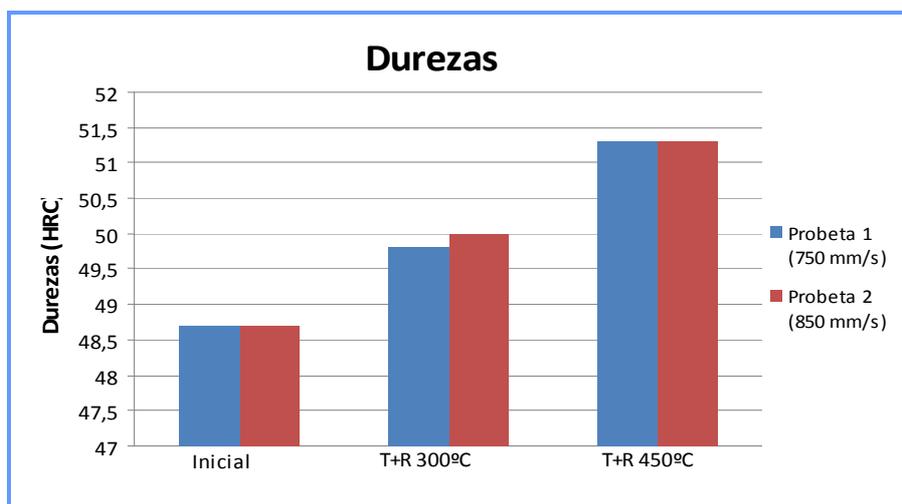


Figura 52: Evolución de la dureza (HRC).

En el estado bruto de fabricación (inicial), la dureza obtenida es independiente de la velocidad de fabricación utilizada. Recuérdese que en este estado la dureza del producto obtenido era muy heterogénea, conteniendo zonas sin

revenir y otras bastante revenidas. Tras los tratammientos térmicos se ha conseguido uniformizar la dureza del producto y aumentar apreciablemente la misma.

Con el revenido a 300°C no se logra asegurar el valor de dureza buscado de 50 HRC, aunque se está muy cerca de la misma, pero con el revenido a 450°C se alcanza la dureza máxima posible de este acero, que como se puede ver es cercana a 51,5 HRC.

La evolución de las propiedades mecánicas más importantes con el tratamiento térmico aplicado se muestran en las Figuras 53, 54 y 55, en las que se puede comprobar la escasa influencia de la velocidad de escaneo en todas estas propiedades (las variaciones observadas en el alargamiento a tracción se atribuyen principalmente a la porosidad).

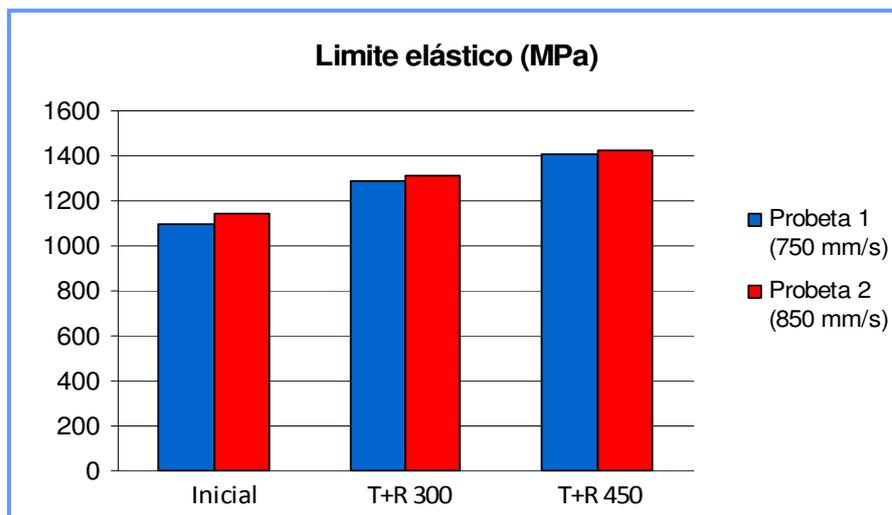


Figura 53: Evolución del límite elástico con los tratamientos térmicos.

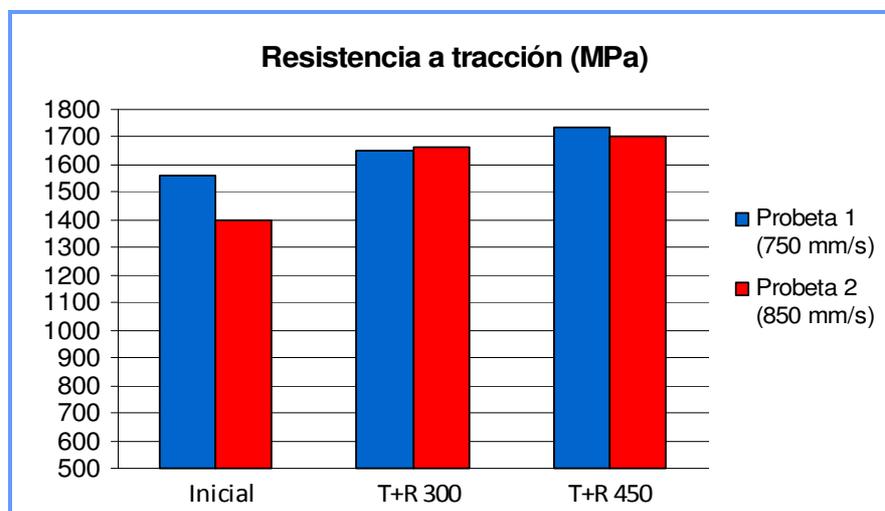


Figura 54: Evolución de la resistencia a tracción con los tratamientos térmicos.

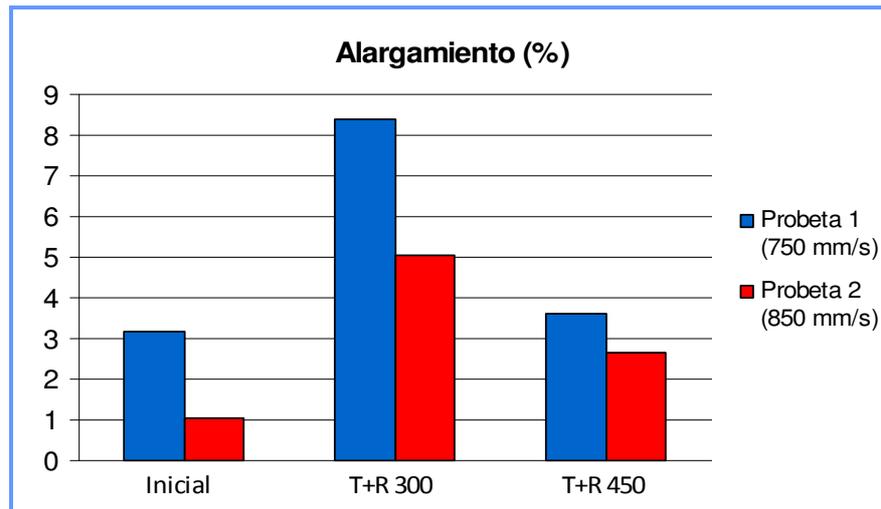


Figura 55: Evolución del alargamiento con los tratamientos térmicos.

Se pone de manifiesto un claro y significativo aumento de todas las propiedades mecánicas al aplicar el temple al aire seguido de un revenido a 300°C respecto al estado bruto de fabricación, mientras que cuando se aplica el temple al aire seguido de el revenido a 450°C el límite elástico y la resistencia a tracción continúan aumentando, mientras que se reduce el alargamiento, aunque sobrepasando todavía el valor medido en el estado bruto de fabricación.

Resulta interesante destacar que las bajas propiedades del estado bruto de fabricación (la menor dureza, resistencia y alargamiento) se deben a su heterogeneidad microestructural (véanse, por ejemplo las Figuras 15 y 18): las regiones templadas no revenidas tienen una fragilidad excesiva y en ellas tiene sin duda lugar el rápido inicio del proceso de rotura.

Por último, señalar que los valores de límite elástico y de la resistencia a la tracción alcanzados son del orden de los valores que normalmente presenta un acero AISI 420 templado y revenido en esta gama de temperaturas, valores que se sitúan en torno a 1200 MPa para el límite elástico y sobre 1500-1600 MPa para la resistencia a tracción. Por el contrario, únicamente tras el revenido a 300°C se logran valores de alargamiento que se encuentren dentro del rango de los que presenta un acero AISI 420 templado y revenido a baja temperatura fabricado por métodos convencionales (8%).

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.

La densidad obtenida en todos los casos es superior al 99% de la densidad del material fabricado mediante métodos convencionales, si bien, la porosidad obtenida es ligeramente inferior cuando se utiliza la menor de las velocidades de fabricación analizadas en este trabajo.

Por otro lado, se ha observado que tanto la porosidad como el tamaño de los poros, es menor cuando para la velocidad de 750 mm/s se utiliza un espaciado de 90 μm , en lugar de el espaciado de 100 μm utilizado inicialmente. Se ha de destacar también, que mediante la utilización de un contorno y post-contorno adicionales, con un beam offset de 100 μm en lugar de 0, se ha conseguido disminuir significativamente la cantidad y el tamaño de los poros en la región de unión del núcleo de la pieza con el contorno de la misma.

Pese a que se ha determinado, que para una misma velocidad de escaneo cuanto menor es el espaciado menor es la rugosidad, lo cual también sucede cuando para un mismo espaciado se reduce la velocidad, los cambios en los parámetros que se llevaron a cabo con el fin de disminuir la rugosidad en la cara superior no solo no dieron los resultados deseados, sino que dieron lugar a una rugosidad peor que la inicial.

Tras un tratamiento térmico de temple al aire y revenido a 450°C, se ha conseguido obtener la dureza deseada. Pese a la realización de dicho tratamiento térmico y aunque las tensiones residuales se han relajado respecto a las existentes en estado bruto de fabricación, las tensiones residuales presentes aun son importantes, si bien cabe esperar que esas tensiones se reduzcan significativamente si el enfriamiento tras el revenido se realiza en el horno, en lugar del enfriamiento al aire utilizado en este caso.

Las propiedades mecánicas son comparables a las de un acero AISI 420 templado y revenido, obtenido mediante métodos convencionales y solamente cabe destacar que el alargamiento obtenido ha sido algo inferior. La mejor combinación de resistencia y alargamiento corresponde al producto templado y revenido a 300°C, mientras que la mayor dureza y resistencia mecánica corresponde al material templado y revenido a 450°C, aunque en este caso se ha reducido significativamente la ductilidad del acero.

CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO.

<u>Partida</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Precio unitario</u>	<u>Importe (€)</u>
Horas de trabajo	480	20	9600
Medidas de rugosidades	129	2	258
Perfiles de durezas	10	20	200
Medidas de tensiones residuales.	24	30	720
Preparaciones metalográficas	20	20	400
Exámenes metalográficos	20	50	1000
Tratamientos térmicos	4	50	200
Ensayos de tracción	6	40	240
Material	0,194	670	130
Placas de fabricación	3	50	150
Costes de fabricación	86	40	3440
Coste total antes de impuestos			16338
Impuestos (21% I.V.A.)			3430,98
COSTE TOTAL			19768,98

La partida correspondiente a material hace referencia a la cantidad de material, AISI 420, en kg utilizado para la realización del trabajo.

La partida correspondiente a costes de fabricación incluye el consumo eléctrico y el coste de personal, midiéndose el coste en horas de trabajo.

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.

Kempen K., Yasa E., Thijs L., Kruth J.P., Van Humbeeck J. "Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel". *Physics procedia*, (2011) pp. 255-263.

Król M., Dobrzanski L.A., Reimann L., Czaja I. "Surface quality in selective laser melting of metal powders". *Archives of materials science and engineering*, (2013) pp. 87-92.

Kruth J.P., Froyen L., Van Vaerenbergh J., Mercelis P., Rimbouts M. Lauwers B. "Selective laser melting of iron based powder". *Journal of materials processing technology*, (2004) pp. 616-622.

Simchi A. "Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features". *Materials science & engineering*, (2006) pp. 148-158.

Simchi A. Pohl H. "Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder". *Materials science & engineering*, (2003) pp. 119-128.

Song B., Dong S.J., Deng S., Liao H.L., Coddet C. "Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting". *Optics & Laser Technology*, (2013) pp. 451-466.

Yaidroitsev I., Pavlov M., Smurov I., Bertrand Ph. "Mechanical properties of samples fabricated by selective laser melting". *14èmes Assies Européennes du Prototypage & Fabrication Rapide, 24-25 Juin 2009, Paris*.

Yadroitsev I., Smurov I. "Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape". *Physics procedia*, (2010) pp. 551-560.

Yadroitsev I., Smurov I. "Surface morphology in selective laser melting of metal powders". *Physics procedia*, (2011) pp. 264-270.

Yasa E., Kruth J.P., "Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting". *Procedia engineering*, (2011) pp. 389-395.