



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**Efecto de FeSi y FeSiBa como Inoculantes en
Hierro Dúctil para una Pieza Automotriz de
Sección Gruesa**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

OSWALDO IVES RODRÍGUEZ CONTRERAS



MÉXICO, D.F. 26 JUNIO del 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: Profesor: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

SECRETARIO: Profesor: ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO

1er. SUPLENTE: Profesor: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

2° SUPLENTE: Profesor: MARIA GABRIELA GONZALEZ FLORES

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FACULTAD DE QUÍMICA.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA METALÚRGICA.**

ASESOR DEL TEMA: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

SUPERVISOR TÉCNICO: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

SUSTENTANTE: OSWALDO IVES RODRÍGUEZ CONTRERAS

ÍNDICE	Página.
I. Introducción	3
II. Hipótesis	5
III. Objetivos	5
Capítulo 1. Antecedentes.	
1.1. Producción de hierro nodular en México.....	6
1.2. Hierro nodular.....	7
1.3. Composición química de un hierro nodular.....	8
1.4. Métodos de nodularización.....	12
1.5. Inoculación y postinoculación.....	15
1.6. Velocidad de enfriamiento y análisis térmico.....	15
1.7. Metodología de conteo de densidad de nódulos.....	16
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.	
2.1. Efecto del carbono equivalente en el hierro nodular.....	18
2.2. Defectos microestructurales en el hierro nodular.....	19
2.3. Efecto de la velocidad de enfriamiento y tamaño de sección en el hierro nodular.....	22
2.4. Efecto de Mg y Ba en el hierro nodular.....	26
2.5. Efecto de la inoculación y postinoculación en el hierro nodular.....	29
Capítulo 3. Procedimiento experimental.	
3.1. Diseño de experimentos y dispositivos.....	31
3.2. Condiciones de moldeo en arena en verde.....	36
3.3. Técnica de fusión.....	37
3.4. Tratamiento de nodularización, inoculación y postinoculación.....	39
3.5. Instrumentación para análisis térmico.....	40
3.6. Desmoldeo y preparación de muestras representativas...	42
Capítulo 4. Resultados.	
4.1. Placa modelo e instrumentación.....	44
4.2. Fabricación de piñones y balance de carga.....	51
4.3. Tiempo y temperatura de colada.....	57
4.4. Análisis químicos.....	58
4.5. Análisis térmico: curvas de enfriamiento.....	61
4.6. Caracterización metalográfica.....	62

4.7. Análisis metalúrgico.....	62
Capítulo 5. Análisis de resultados.	
5.1. Instrumentación.....	68
5.2. Composición química en el hierro nodular.....	68
5.3. Análisis estadístico.....	69
5.4. Inoculación y postinoculación.....	74
5.5. Tamaño de sección.....	76
5.6. Defectos microestructurales.....	76
Capítulo 6. Conclusiones.....	83
Apéndices.	
Apéndice A. Nomenclatura, temperatura y tiempo de colada.....	85
Apéndice B. Análisis químicos.....	90
Apéndice C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.....	101
Apéndice D. Caracterización metalográfica.....	136
Apéndice E. Análisis metalográfico.....	185
Bibliografía.....	194

I. Introducción.

Este proyecto busca determinar el nivel óptimo de inoculación utilizando Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba para producir la mayor densidad de nódulos, un porcentaje de nodularidad mayor al 80% y una homogeneidad de nódulos alta en un hierro dúctil de aplicación automotriz (piñón).

Se fabricó hierro dúctil en un horno de inducción inoculado con Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba. La composición química se determinó mediante el uso de espectrómetro de emisión atómica. Se realizó la metalografía de cada sección de hierro dúctil para evaluar la microestructura: tamaño de nódulo de grafito, densidad de nódulos, porcentaje de nodularidad y porcentaje de perlita y de ferrita en la matriz.

Actualmente se busca generar una alta densidad de nódulos, mayor a 400 nódulos/mm² con el fin de mejorar las propiedades mecánicas. Una de las problemáticas que se presentan al utilizar inoculantes convencionales como Fe-75%Si en piezas de sección gruesa es que su efecto como inoculante se pierde rápidamente al disolverse los centros de nucleación, obteniendo baja densidad de nódulos (100 a 150 nódulos/mm²); por ello, es indispensable utilizar otro tipo de inoculantes como el Fe-64%Si-4.5%Ba, con el cual, los centros de nucleación generados son más estables durante la solidificación. En el proceso de fabricación del hierro dúctil se debe tener control sobre la composición química, método de fabricación de hierro nodular (eficiencia del magnesio), inoculación en la olla y postinoculación.

CAPÍTULO 1. Antecedentes. En ésta parte se habla acerca de la producción actual de hierro nodular en México y se mencionan las definiciones de hierro nodular, carbón equivalente, métodos de

nodularización, inoculación temprana, inoculación tardía, velocidad de enfriamiento y análisis térmico así como el efecto de elementos aleantes en la producción de hierro nodular.

CAPÍTULO 2. Fundamentos teóricos. En los fundamentos se establecen las bases que soportan la realización de éste proyecto, se citan los estudios realizados sobre la producción de hierro nodular y el efecto de inoculantes convencionales e inoculantes con contenido de bario (Ba). También se mencionan los efectos de las variables que deben controlarse y la necesidad de producir hierro nodular con alta densidad de nódulos.

CAPÍTULO 3. Procedimiento experimental. Se establecen las condiciones experimentales en las cuales se efectuaron los experimentos de fabricación de hierro dúctil con el propósito de determinar el nivel óptimo de inoculación usando Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba. Asimismo se detalla la metodología de experimentación de realización del proyecto de manera que sea reproducible.

CAPÍTULO 4. Resultados. Se presentan los resultados obtenidos de los dispositivos fabricados, la fabricación del hierro nodular, balance de carga, obtención de curvas de enfriamiento, análisis químicos, metalografías y análisis metalográfico.

CAPÍTULO 5. Análisis de resultados. Se analiza la influencia de las variables como el tipo de inoculante, la cantidad de postinoculación, tamaño de sección y temperatura de colada sobre la densidad de nódulos en la fabricación del hierro nodular. Finalmente se analiza la presencia de defectos microestructurales en los piñones fabricados.

CAPÍTULO 6. Conclusiones. Se evalúan las hipótesis propuestas mediante el análisis de resultados.

II. Hipótesis.

Al inocular con *Fe-64%Si-4.5%Ba* un hierro dúctil para piezas de sección gruesa con el mismo porcentaje de inoculación se espera obtener un hierro dúctil con mayor densidad de nódulos (nódulos/mm²), un tamaño de nódulo homogéneo y un porcentaje de nodularidad mayor a 80% en comparación a que cuando se utiliza inoculante convencional de *Fe-75%Si*.

III. Objetivos.

- ❖ Determinar el nivel de postinoculación empleando *Fe-64%Si-4.5%Ba* como inoculante en un hierro dúctil para obtener una densidad máxima de esferoides de grafito (nódulos/mm²), en una pieza automotriz de sección gruesa, usando un rango de inoculación de 0.05 a 0.45%.
- ❖ Determinar el nivel de postinoculación empleando *Fe-75%Si* como inoculante en un hierro dúctil para obtener una densidad máxima de esferoides de grafito (nódulos/mm²), en una pieza automotriz de sección gruesa, usando un rango de inoculación de 0.05 a 0.45%.

1. Antecedentes.

1.1. Producción de hierro nodular en México.

La industria automotriz en México es una de las áreas económicas más importantes para el país, debido principalmente al número de empleos directos e indirectos que genera, así como por el volumen de sus exportaciones. El volumen de ventas ha crecido en los últimos años, como puede apreciarse en la figura 1.

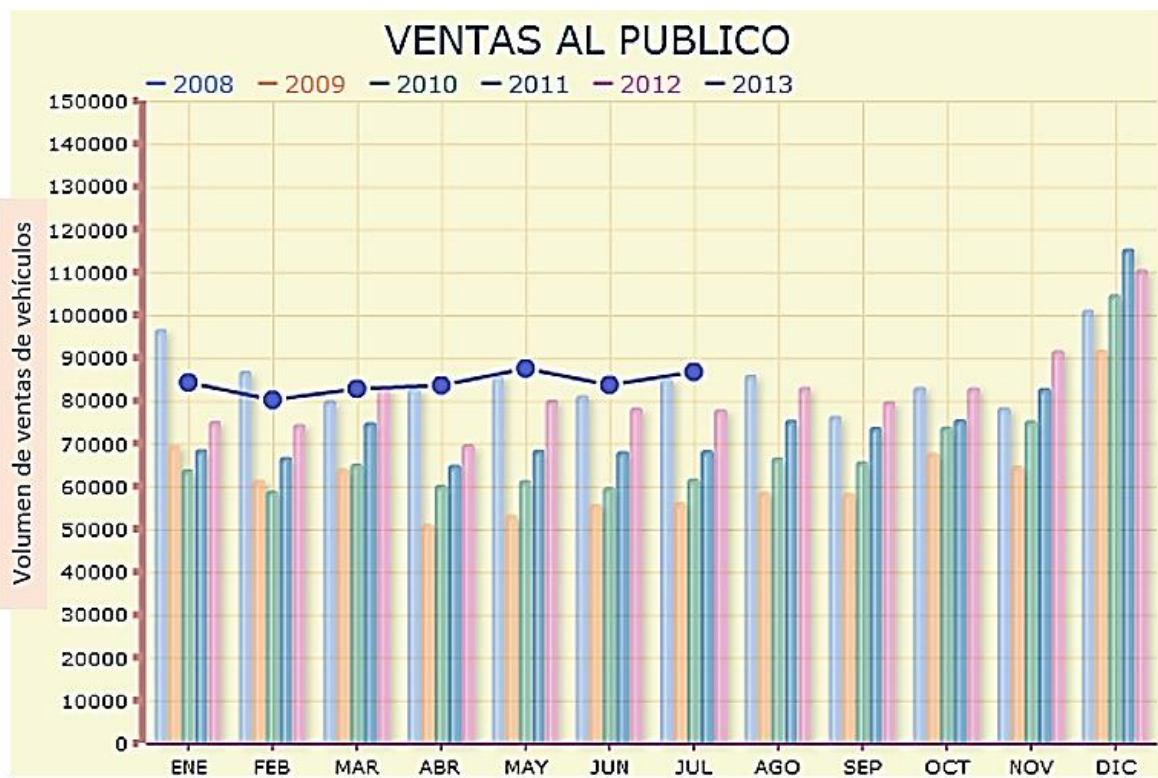


Figura 1. Ventas al público de vehículos por la industria automotriz en México. [1]

El hierro nodular es uno de los materiales más ampliamente utilizados en la industria automotriz. Aproximadamente el 63% de los vehículos ligeros que se producen en México son exportados a Estados Unidos. [1]

El hierro nodular posee algunas ventajas con respecto al acero o el hierro gris: presenta mayor resistencia a la fatiga, mayor resistencia al desgaste, alta tenacidad, es relativamente duro, tiene moderada resistencia al impacto, poca conductividad térmica, baja permeabilidad magnética, buena maquinabilidad; además, la presencia de grafito esferoidal inhibe el crecimiento y propagación de grietas. Todas estas propiedades son primordiales en cigüeñales, engranes, piñones, etc.

1.2. Hierro nodular.

El *hierro nodular o hierro dúctil*, como se observa en la figura 2, se caracteriza por presentar grafito en forma esferoidal. Se produce por el proceso de nodularización con magnesio seguido por el proceso de inoculación. Se rige por la norma ASTM 247-67, tipo I.

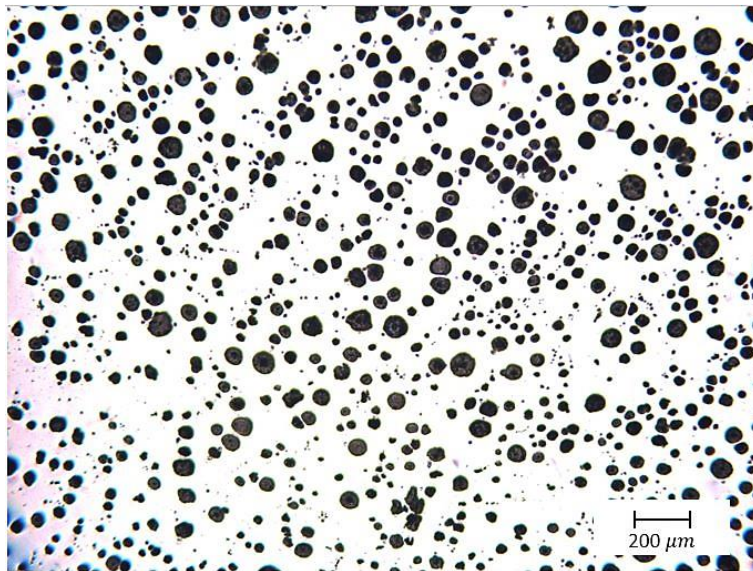


Figura 2. *Microestructura típica de un hierro dúctil o nodular. 100x.*

La metodología de producción de hierro dúctil requiere sólidos conocimientos técnicos y procedimientos de control de calidad eficientes. La composición química, la temperatura de colada, la técnica

de fusión, el tratamiento de esferoidización (nodularización), el método de inoculación y postinoculación, están directamente relacionadas con el espesor de la pieza de fundición y las propiedades mecánicas específicas de la colada.

1.3. Composición química de un hierro nodular.

La composición química es muy importante para la fabricación de hierro nodular. En la tabla 1 se observa la composición química de un hierro nodular grado 120-90-02 (norma ASTM 247-67).

Tabla 1. *Composición química relativa y promedio de un hierro dúctil grado 120-90-02. [2]*

Hierro Nodular Grado 120-90-02			
Elemento	Composición química relativa (%)	Composición Promedio (%)	Rendimiento (%)
C	3.5-3.8	3.65	95%
Si	2.2-2.7	2.45	96%
Mn	0.6 MAX	0.6	98%
Mg	0.045	0.045	60%
Cr	0.1 MAX	0.1	100%
Cu	0.2-0.5	0.35	100%
P	0.05 MAX	0.05	100%
S	0.015 MAX	0.015	100%

Dependiendo del tipo de tratamiento que se lleve a cabo al metal líquido, la composición química y la velocidad de enfriamiento la

solidificación sigue dos tipos de diagramas: el metaestable (Fe-Fe₃C) y el estable (Fe-C_g). Estos mecanismos pueden ser modificados por los elementos de aleación considerablemente. El diagrama estable, que se puede ver en la figura 3, tiene suma importancia en la fabricación de hierros nodulares. En base al diagrama de fases estable las fundiciones de hierro se dividen en eutécticas, hipoeutécticas e hipereutécticas.

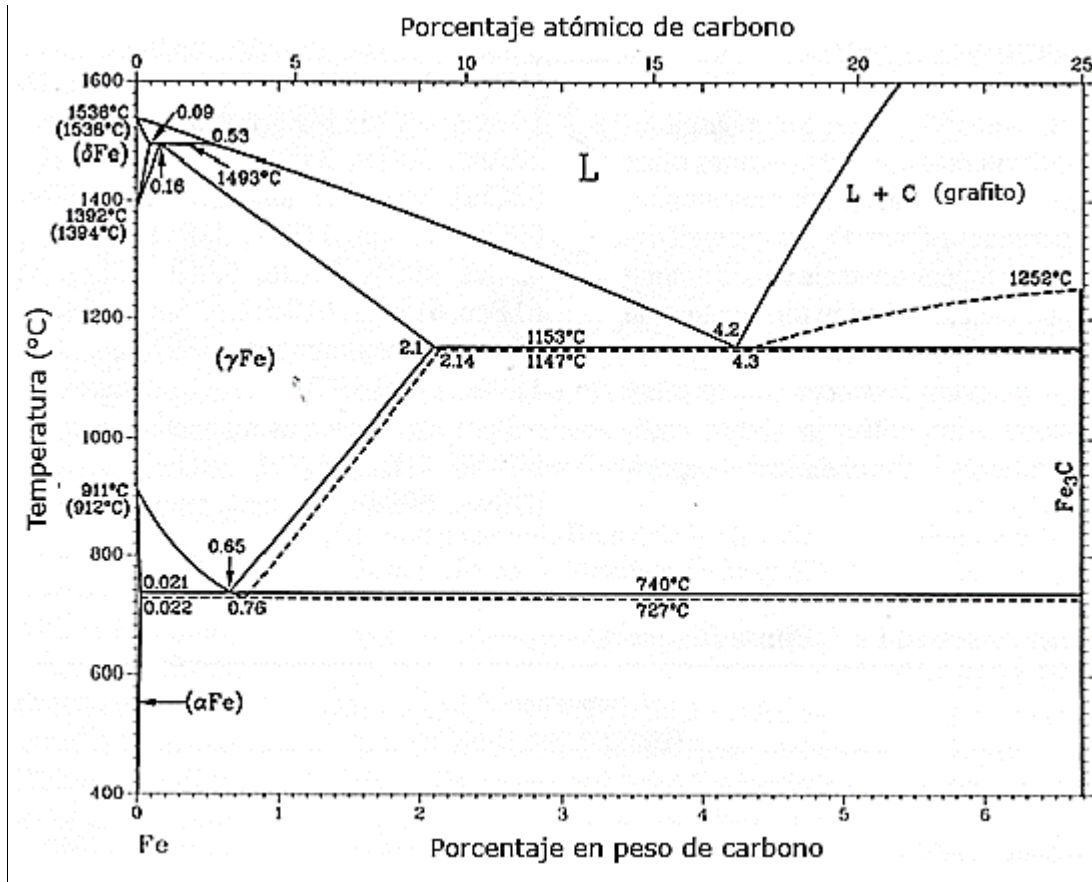


Figura 3. Diagrama de fase estable (Fe-C_g) y metaestable (Fe-Fe₃C).

Las transformaciones hipoeutécticas en hierros se forman cuando el contenido de carbono está entre 2.1% y 4.3% iniciando su solidificación convirtiéndose en austenita (γ), a los 1153°C (temperatura eutéctica estable) se obtiene austenita junto con carbono grafito (γ + C_g). Cuando

el enfriamiento continúa, a unos 740°C (temperatura eutectoide estable), la austenita pasa a formar hierro alfa ($\alpha + C_g$).

La transformación eutéctica se efectúa con un contenido de 4.3% en carbono. La solidificación inicia de un líquido que solidifica a 1153°C formando el eutéctico ($\gamma + C_g$), y a 740°C la austenita se transforma en ferrita acompañada de carbono grafito.

Los hierros hipereutécticos tienen carbono entre 4.3 y 6.67%. El líquido solidifica formando exclusivamente cementita (C_g) y líquido. A 1153°C se forma austenita más carbono en forma de grafito, finalmente a 740°C existe ferrita y grafito ($\alpha + C_g$).

En el caso del sistema Fe-Si-C, se forma el grafito por nucleación heterogénea. Este término indica que el núcleo de grafito se forma sobre algún sitio preferido en el hierro líquido, el cual proporciona un sustrato sobre el cual el grafito puede nuclear con una energía más baja existente entre el grafito y el hierro líquido. Al proporcionar esta baja energía interfacial para algunos núcleos de grafito en la superficie, el sustrato ayuda en el proceso de nucleación y reduce la cantidad de subenfriamiento necesario para que un núcleo de grafito se pueda formar. La nucleación determina el número de partículas de grafito.

El carbono equivalente (C.E.) considera el efecto del silicio y el carbono en las transformaciones que sufre el hierro durante su solidificación de acuerdo al diagrama de fases. Se puede calcular mediante la ecuación 1.

$$C.E. = \%C + \frac{1}{3} \%Si \dots (1)$$

El C.E. debe mantenerse en ciertos rangos para obtener el tipo de hierro deseado. Dependiendo de la temperatura de colada, es necesario mantener un carbono equivalente mínimo de 4.3% para obtener un nódulo de buena calidad y libre de carburos. [3]

El carbono (C) está relacionado directamente con el tamaño y la cantidad de nódulos de grafito. Se puede encontrar en forma de cementita (Fe_3C) o en forma libre.

Uno de los elementos más importantes en la producción de hierro dúctil es el silicio (Si). Se encuentra en un rango de 1.5 a 3.5% y favorece la precipitación de grafito, además desplaza la transformación eutéctica hacia la zona hipoeutéctica.

El manganeso (Mn) es estabilizador de carburos, aunque en menor medida que el azufre; incrementa la solubilidad de carbono en la austenita y se combina fácilmente con el hierro y el azufre formando carburos intercelulares indeseables en el hierro dúctil.

El magnesio (Mg) es el elemento más comúnmente utilizado para producir hierro nodular. La nodularidad depende de la cantidad de magnesio residual presente en la composición química final. El Mg actúa como desoxidante y desulfurante al entrar en contacto con el hierro líquido. Es altamente volátil por lo que su contenido disminuye rápidamente. El magnesio residual modifica la forma del grafito libre, un porcentaje mayor al 0.035% de magnesio residual motiva la formación de grafito esferoidal.

La influencia positiva de las tierras raras como cerio (Ce) y bario (Ba) es el incremento de la densidad de nódulos y optimiza la inoculación. Sin embargo, la influencia es que al adicionarse en exceso promueve la formación de carburos y defectos como el grafito "chunky" en secciones gruesas.

En la figura 4 se observa la influencia de distintos elementos de aleación en las temperaturas eutécticas de los diagramas estable y metaestable.

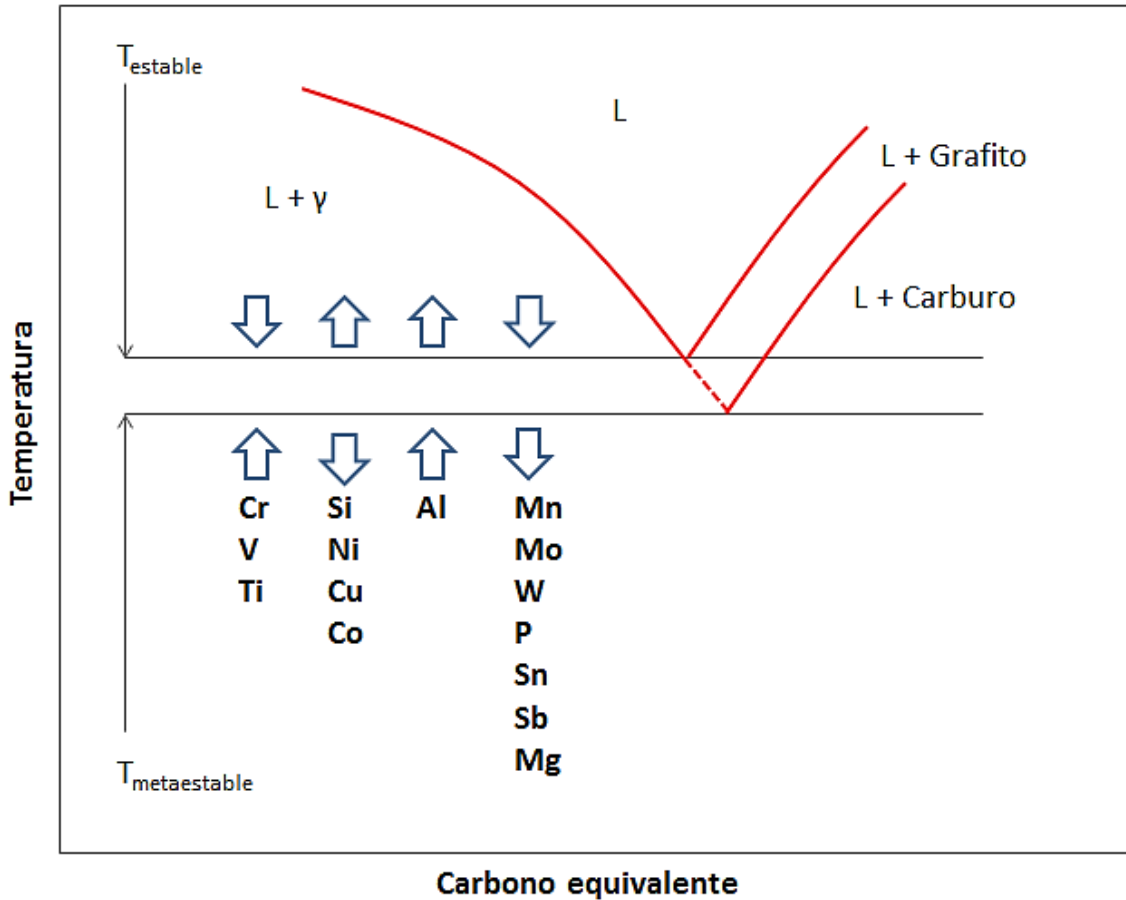


Figura 4. Sección esquemática del diagrama Fe-C ilustrando la influencia de elementos de aleación en las temperaturas eutécticas estable y metaestable.

Las curvas de enfriamiento se utilizan con éxito para explicar la solidificación estable y metaestable, así como la influencia de elementos de aleación y la velocidad de enfriamiento en la solidificación de hierro fundido. El diagrama de la figura 4 es muy útil para describir la influencia de la composición en la solidificación del hierro dúctil.

1.4. Métodos de nodularización.

La precipitación en forma de grafito libre es un factor clave para lograr propiedades mecánicas específicas en un hierro nodular. La

densidad de nódulo en un hierro dúctil está ligada a muchas variables; una de ellas es el tratamiento de nodularización. [3]

Existen distintos métodos para llevar a cabo la nodularización, dentro de los sistemas de olla abierta se tienen tres métodos distintos:

I. Adición Simple.

Consiste en colocar el agente nodulizante en el fondo de la olla sin cubierta protectora; debido a esto la recuperación de magnesio es baja, del 20 al 30%. La gran desventaja de este proceso es que genera una gran cantidad de humos, provocados por la oxidación del magnesio generando MgO, además, el proceso es peligroso debido a la reacción violenta que se lleva a cabo. Sin embargo es un método barato y rápido.

II. Método Sándwich.

Es similar al método de adición simple, pero tiene una mayor eficiencia ya que hay menor pérdida de magnesio en la reacción que aún es violenta. En éste método se coloca en un pequeño desnivel dentro de la olla dónde se coloca el nodularizante y posteriormente es recubierto con rebaba de acero.

La olla debe tener ciertas características de altura relacionada con el diámetro desde 1.5:1 hasta 3:1. La pequeña recámara donde se coloca la ferroaleación de magnesio debe tener un ancho = diámetro / 3 y la altura = diámetro / 6 (fig. 5).

El nodulizante colocado en la recámara debe recubrirse con rebaba de acero para retrasar en gran medida la reacción de oxidación del Mg. La eficiencia es de 45% para la recuperación de Mg.

La temperatura de tratamiento normalmente es de 1500°C. Las ventajas principales de éste método son su bajo costo de operación, su practicidad.

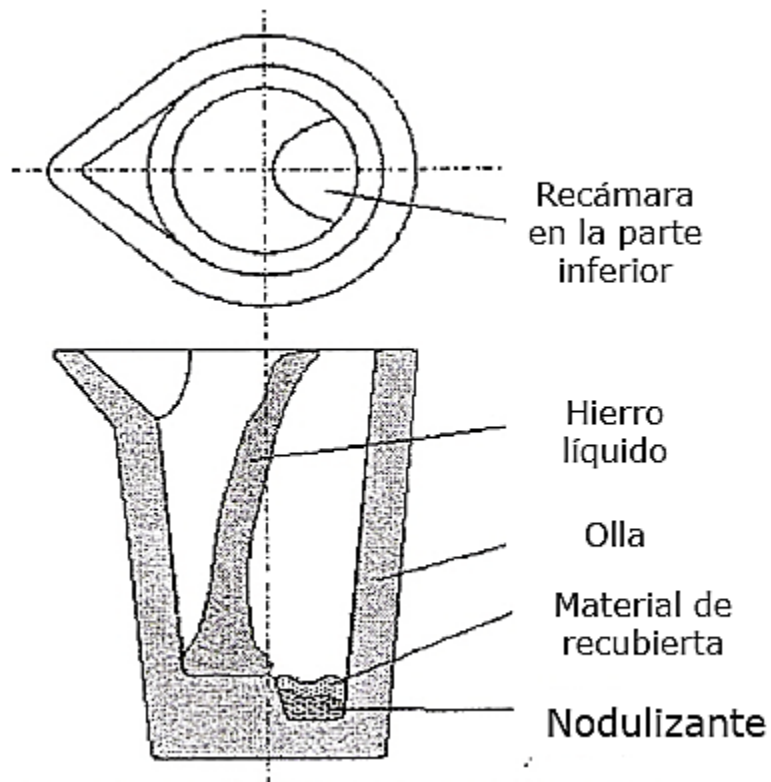


Figura 5. Método del sándwich para la fabricación de hierro nodular.

III. Método Trigger.

Es parecido al método Sándwich, con la diferencia de que la ferroaleación nodulizante es recubierta con carburo de calcio, el cual inhibe efectivamente la reacción entre metal líquido y nodularizante hasta que la olla esta total o parcialmente llena. La reacción empieza al romperse la cubierta de carburo de calcio permitiéndose así la reacción metal líquido-nodularizante.

Algunas de las ventajas de éste método es que se producen menor cantidad de humos, menos salpicaduras de metal líquido y una mayor recuperación de magnesio debida a la presión metalostática sobre el nodularizante.

1.5. Inoculación y postinoculación.

La inoculación se define como la adición de ciertas ferroaleaciones de silicio y otros elementos para producir centros de nucleación y favorecer la precipitación de carbono en forma de grafito esferoidal para el caso de hierro nodular. [4]

El ferrosilicio es el inoculante más comúnmente usado. La adición de ferrosilicio con 75-85% de silicio, sustancialmente incrementa la densidad de nódulos. La cantidad de silicio adicionada en la postinoculación es generalmente menos de 1% de la masa total en la fusión.

La producción de hierro fundido con grafito esferoidal requiere la adición de un inoculante después del tratamiento con magnesio. Esto es necesario para eliminar la presencia de carburos y producir buenas propiedades mecánicas. Dicho tratamiento se denomina postinoculación o inoculación tardía.

La inoculación reduce el subenfriamiento durante la solidificación y ayuda a evitar la presencia de carburos en la estructura especialmente en secciones delgadas.

1.6. Velocidad de enfriamiento y análisis térmico.

La velocidad de enfriamiento depende del espesor de las piezas de fundición, de las propiedades térmicas del material y del molde empleado. La velocidad de enfriamiento está relacionado directamente

con la microestructura de los hierros colados. Velocidades de enfriamiento lentas producen hierros blancos, mientras que rápidas velocidades de enfriamiento promueven la formación de carbono grafito, es decir, producen hierros nodulares o grises.

1.7. Metodología de conteo de densidad de nódulos.

La metalografía cuantitativa puede definirse como la técnica de muestreo utilizada para cuantificar los aspectos morfológicos de las imágenes obtenidas de un material mediante microscopía óptica, microscopía de barrido o microscopía de transmisión. [5,6]

Una simplificación denominada "método del cuadrante" realizada en 1931, demostró que si se coloca una rejilla de puntos sobre una sección plana sobre una fracción de área, puede ser estimada la proporción de puntos de la rejilla que caen o hacen contacto con el cuadrante en estudio.

Los puntos de conteo producidos dependen de la cantidad de cuadrantes de prueba que son dibujados sobre el área superficial. En la figura 6 se observa un ejemplo del método de conteo. Se aprecia que elementos son contabilizados en cada cuadrante para determinar la densidad de elementos sobre el área superficial de análisis.

Se secciona la superficie de conteo en cuatro cuadrantes (1, 2, 3 y 4). En cada cuadrante se contabilizan las partículas que se encuentren en el área del mismo y las que se intersectan con las línea inferior y la línea izquierda del cuadrante.

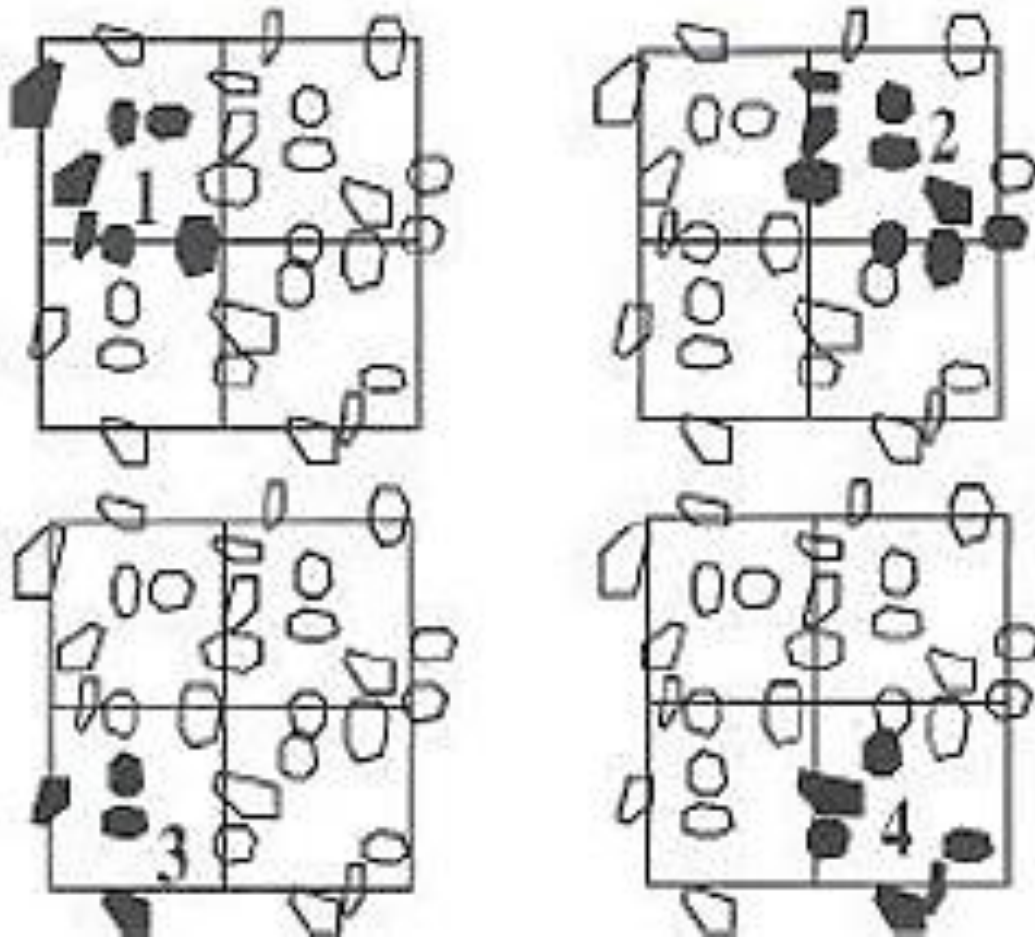


Figura 6. Método del cuadrante para llevar a cabo cuantificación metalográfica. [5]

2. Fundamentos Teóricos.

El mercado de las fundiciones de hierro dúctil se expande continuamente. El sector de la industria automotriz es una zona con una tasa de crecimiento relativamente alta. Para cumplir con los requisitos de este tipo de piezas de fundición, las fundiciones de hierro dúctil deben evitar o minimizar los defectos estructurales inherentes a este tipo de componentes sobre todo en las piezas automotrices de sección gruesa.

2.1. Efecto del carbono equivalente en el hierro nodular.

Los elementos típicos de un hierro dúctil, como ya se mencionó, generalmente consisten en carbono, silicio, azufre, fósforo y manganeso. Sin embargo, el nivel aceptable de un elemento a menudo afecta el nivel tolerable de otro elemento. Una composición promedio de un hierro dúctil es: 3.65% C, 2.40% Si, 0.01% S, 0.02% P y 0.40% Mn. También se señaló que el carbón equivalente (C.E.) es un valor empírico en porcentaje en peso, en relación a los efectos combinados de diferentes elementos de aleación utilizados en la fabricación de hierros colados, por lo tanto está relacionado directamente con la producción de nódulos de grafito.

Carbono equivalente en exceso produce flotación de grafito y otros defectos sobre la microestructura del hierro nodular. Se debe establecer un C.E. para evitar defectos de acuerdo a una sección gruesa y temperatura de colada, como se presenta en la tabla 2.

Temperatura de colada	Valor máximo de C.E. para tamaños de secciones distintas			
	°C	20 mm	30 mm	50 mm
1315	4.56	4.52	4.44	4.31
1340	4.53	4.49	4.41	4.27
1370	4.5	4.46	4.38	4.24
1400	4.47	4.43	4.35	4.21
1425	4.45	4.4	4.32	4.19
1455	4.42	4.37	4.29	4.15

Tabla 2. Valores máximos de C.E. para evitar la flotación de grafito en hierro dúctil. [2]

Considerando la composición química promedio del hierro dúctil 120-90-02 a fabricar (tabla 1), se obtiene el C.E. correspondiente:

$$CE = \left(\%C + \% \frac{Si}{4} \right) + \%P/2 = \left(3.65 + \frac{2.45}{4} \right) + 0.05/2$$

$$CE = 4.2875$$

2.2. Defectos microestructurales en hierro nodular.

El hierro nodular exhibe una gama de propiedades mecánicas que lo hacen adecuado para trabajos de alta exigencia mecánica. Sin embargo, estas propiedades son sensibles a los defectos microestructurales cuyas características están, en algunos casos, relacionados con la manera en que fue colada la pieza de fundición. [7]

Por ejemplo, los defectos, como el grafito "chunky", defectos de segregación intercelulares y la presencia de escoria. Aunque no se encuentran exclusivamente en las secciones gruesas de piezas de fundición de hierro dúctil presentan una mayor probabilidad de formación en secciones gruesas.

El *grafito flotado*, mostrado en la figura 7, es el grafito libre que se forma antes de la solidificación en hierro hipereutéctico y flota en la parte superior del hierro colado o en el área interior de una pieza de fundición centrífuga. La flotación del grafito es una anomalía en la fabricación de hierro dúctil, por lo tanto es indeseable y puede ser evitado al controlar el C.E., el tamaño de la sección y/o la velocidad de enfriamiento. El control de la composición química del hierro líquido antes del tratamiento con magnesio y la inoculación es una forma práctica y eficaz para impedir la flotación de grafito. [7]

Para evitar la flotación en la fundición de hierro dúctil, se recomiendan los valores de C.E. que se muestran en la tabla 2 para diferentes tamaños de las secciones y temperatura de colada.

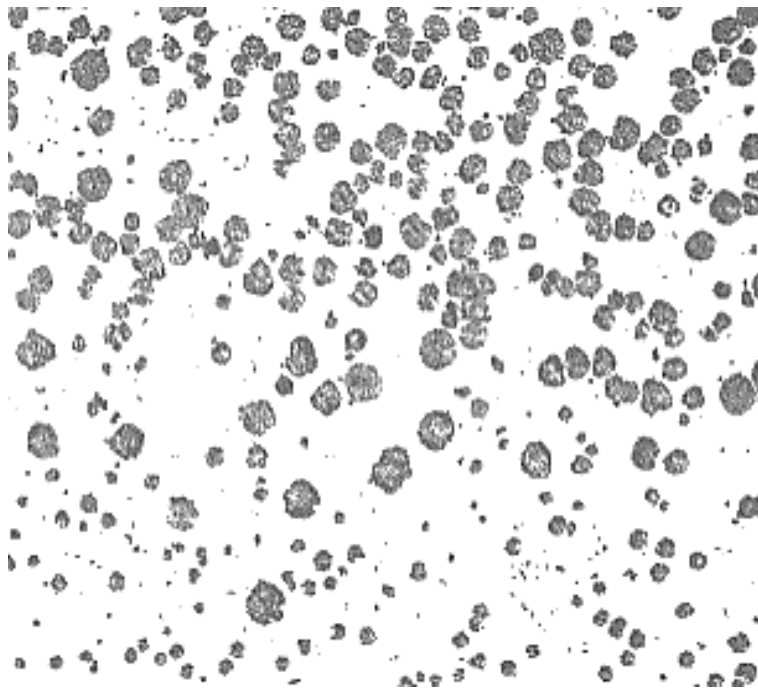


Figura 7. Flotación de grafito presente en un hierro nodular. [7]

El *grafito explotado*, como se observa en la figura 8, es causado por un contenido en exceso de tierras raras y un alto carbono equivalente; principalmente en secciones gruesas de piezas de fundición.

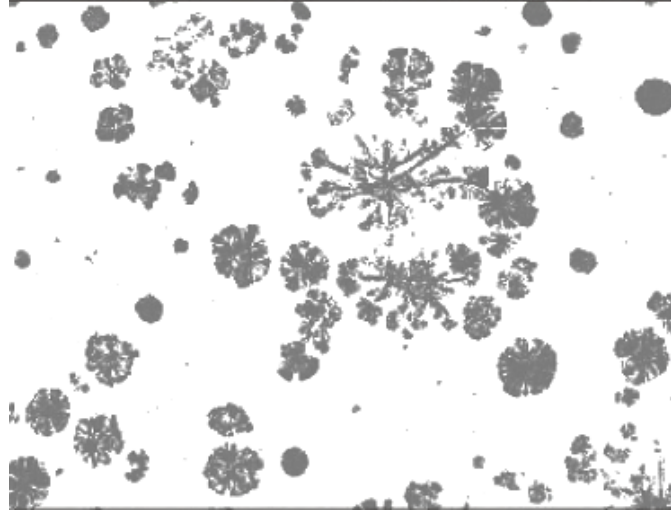


Figura 8. *Grafito explotado presente en un hierro nodular. [7]*

Sí se agrega un exceso de silicio, cerio, níquel y/o calcio, así como tierras raras, usualmente en el centro de piezas de hierro gruesas se puede generar *grafito chunky*. (Ver figura 9).

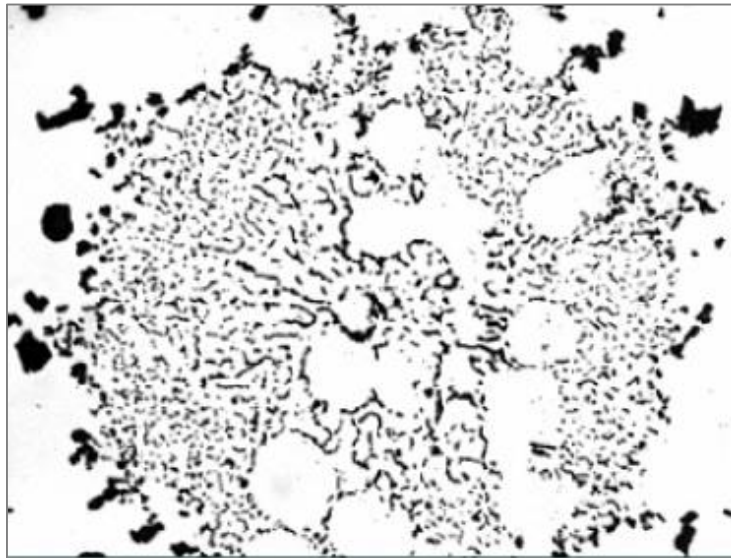


Figura 9. *Grafito chunky presente en un hierro nodular. [7]*

2.3. Efecto de la velocidad de enfriamiento y tamaño de sección en el hierro nodular.

Una velocidad de solidificación lenta obtenida en perfiles de sección gruesa provoca que el hierro sea susceptible a una pérdida de calidad debido a la degeneración de grafito, una densidad de nódulos reducida y, en algunos casos, carburos libres [8]. La figura 10 muestra que tiempos de enfriamiento rápidos producen una densidad de nódulos más alta. Es decir, el aumento del tiempo de solidificación aumenta inversamente proporcional con la densidad de nódulos en el hierro dúctil.

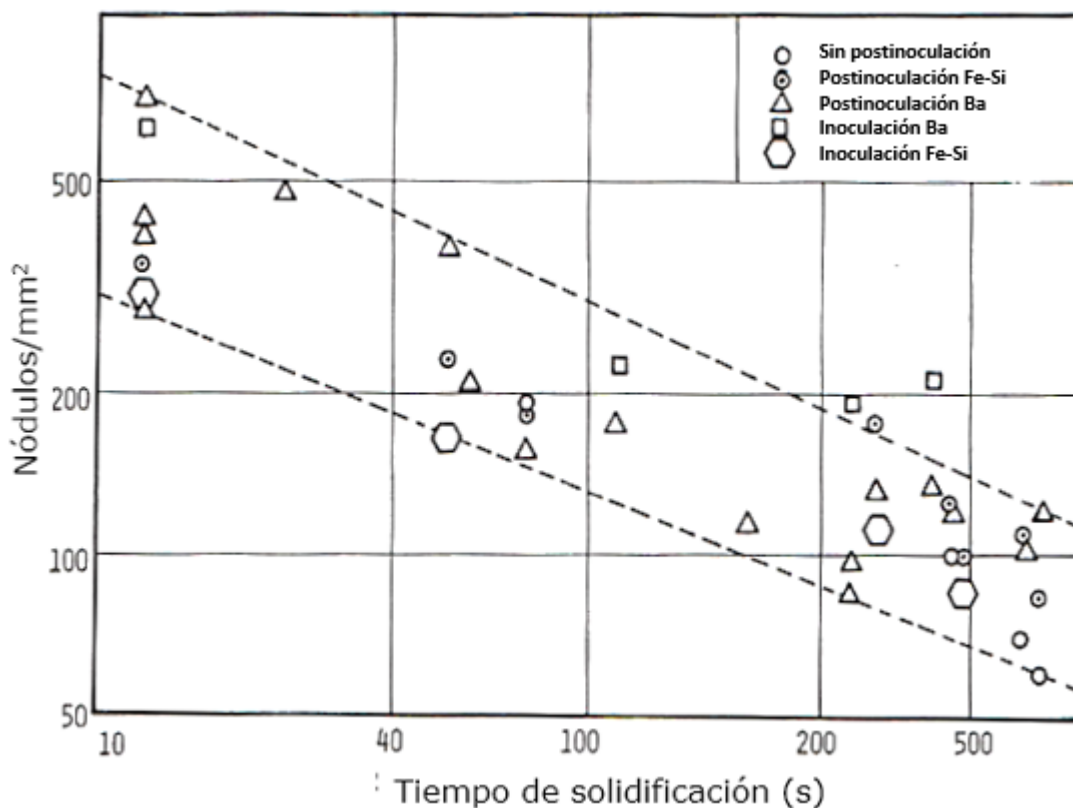


Figura 10. Efecto del tiempo de solidificación en la densidad de nódulos. [8]

Cuando la temperatura de colada disminuye, la velocidad de enfriamiento en el molde aumenta y crea un efecto secundario que causa incremento en la densidad de nódulos. El efecto de las velocidades de enfriamiento más rápidas que aumentan la densidad de nódulos fue demostrado por Labraque y Cabanne. [9]

Cuando el tamaño de la sección disminuye la densidad de nódulos aumenta, lo cual es otro indicativo del efecto de enfriamiento más rápido. Este efecto es consistente con las teorías de nucleación y crecimiento⁶. Los fundamentos de estas teorías indican que, cuando aumenta el tiempo de solidificación, la cantidad de núcleos estables disminuye. En otras palabras, las secciones más delgadas tienen mayor densidad nodular.

Resultados indican que una temperatura de colada de 1428 °C produce nódulos más grandes, pero no en una temperatura menor a 1316 °C.

La formación de carburos en piezas de fundición de hierro nodular durante la solidificación disminuye su maquinabilidad y otras propiedades mecánicas notablemente. Es un motivo frecuente de rechazo de piezas. Aunque la microestructura blanqueada puede ser transformada por tratamiento térmico, el tratamiento podría incrementar el costo de los productos.

El modelado de la transición de hierro nodular a blanco ha sido estudiado por Górnny y López [10] y Zhao Haidong y Liu Baicheng [11]. La nucleación y la microsegregación de los diversos elementos son factores que deben ser tenidos en cuenta durante la solidificación.

La transformación de hierro gris y hierro blanco bajo temperaturas de equilibrio $T_{Estable}$ y $T_{Metaestable}$ respectivamente, pueden ser calculados con las ecuaciones (2) y (3):

$$T_{Estable} (^{\circ}\text{C}) = 1154 + 4\langle\text{Si}\% \rangle - 2\langle\text{Mn}\% \rangle - 30\langle\text{P}\% \rangle \dots (2)$$

$$T_{Metaestable} (^{\circ}\text{C}) = 1148 - 15\langle\text{Si}\% \rangle + 3\langle\text{Mn}\% \rangle - 37\langle\text{P}\% \rangle \dots (3)$$

Cuando una fundición de hierro se enfría y solidifica, la solidificación eutéctica sucede de dos modos: ya sea de acuerdo con la transformación eutéctica de hierro-grafito estable que conduce a la estructura de gris o nodular, o bien de acuerdo con la transformación metaestable hierro-carburo de hierro (cementita) resultante en hierro blanco. Upadhyya, Banerjee y Stefanescu indican que la temperatura eutéctica para la transformación estable ($T_{estable}$) de una aleación de Fe-C_g es 7°C más alta que de la reacción metaestable [12]. Esta diferencia puede ser aumentada o disminuida por la adición de elementos de aleación considerablemente durante la solidificación dependiendo de si la solidificación se produce por encima o debajo de $T_{metaestable}$.

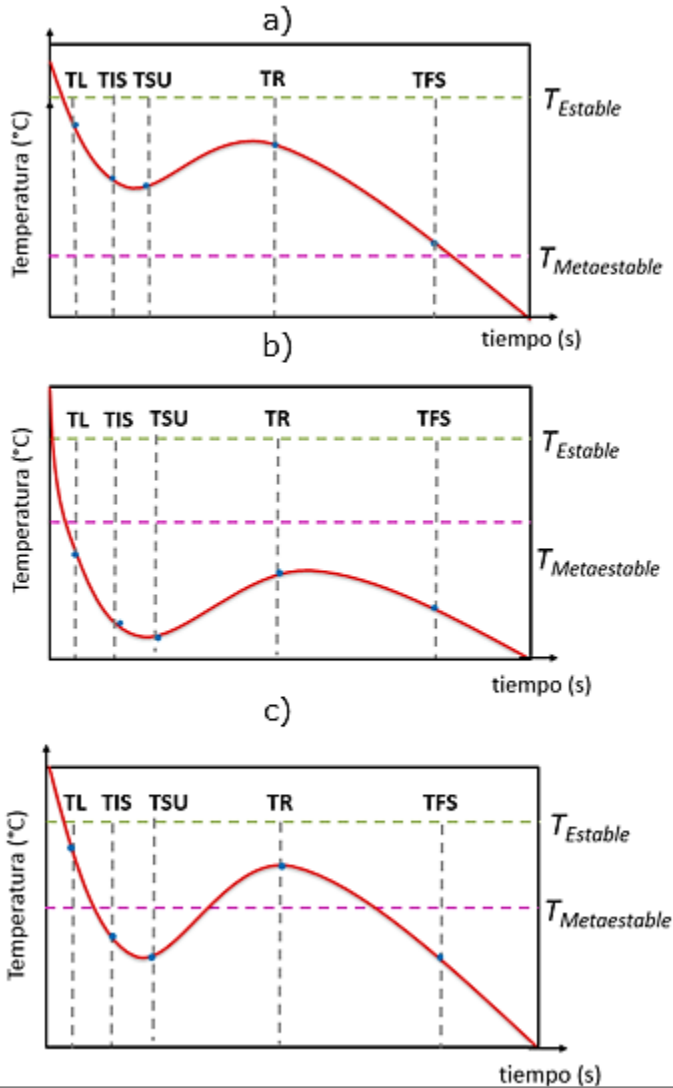
La teoría aceptada es que si la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), la Temperatura de Subenfriamiento (TSU), la Temperatura de Recalescencia (TR) y la Temperatura Final de Solidificación (TFS) están por encima de la $T_{metaestable}$ el hierro solidifica completamente nodular o gris, ver figura 11(a). Si todas estas temperaturas están por debajo de la $T_{metaestable}$, el hierro solidifica completamente como hierro blanco, ver figura 11(b). Si algunas de las temperaturas características están debajo de la $T_{metaestable}$ se produce un hierro con un cierto porcentaje de cementita figura 11 (c). Si la TSU es inferior a la $T_{metaestable}$ carburos de hierro se distribuyen a través de la microestructura del hierro. Este tipo de estructura blanca se denomina "chill". Si TFS es más bajo que $T_{metaestable}$ el resultado es la presencia de carburos intercelulares. Es bastante obvio que si la $T_{metaestable}$ se eleva o se incrementa el

subenfriamiento, se produce una transición gradual del gris o nodular al blanco en la estructura del hierro.

Las variables que afectan a la transición gris o nodular/blanco en hierro fundido son las siguientes:

- 1- Tiempo de solidificación de la pieza de fundición.
- 2- Espesor de la pieza.
- 3- Nucleación (inoculación).
- 4- Composición química del hierro.
- 5- Temperatura de colada.

El tiempo de solidificación y la nucleación afectan mayormente el subenfriamiento. Cuando el hierro se solidifica a altas velocidades de enfriamiento puede producir un excesivo subenfriamiento bajo la $T_{estable}$, y el metal líquido se puede enfriar por debajo de la temperatura de transformación metaestable antes de solidificarse. Esto puede resultar en una estructura parcialmente blanqueada, es decir, se producen carburos; especialmente en secciones delgadas y en las esquinas de las piezas de fundición. [12]



TL= Temperatura de Líquidus
TIS= Temperatura de Inicio de Solidificación
TSU= Temperatura de Subenfriamiento
TR= Temperatura de Recalescencia
TFS= Temperatura de Fin de Solidificación

Figura 11. Curvas de enfriamiento típicas de un hierro hipoeutéctico, se muestran las condiciones de solidificación a) Hierro gris o nodular, b) hierro blanco y c) hierro moteado.¹²

2.4. Efecto de Mg y Ba en el hierro nodular.

Se ha sugerido que hay tres razones para hacer uso de magnesio (Mg) y bario (Ba):

1. Para propiciar una nucleación eficaz de grafito esférico.
2. Para efectuar un aumento en la densidad de nódulos.
3. Para que la nucleación sea sólo de grafito en forma esférica.

Como se indicó anteriormente, el Mg es el elemento más comúnmente utilizado para producir hierro nodular; en un rango de composición final en el hierro dúctil fabricado de 0.03% a 0.05%. La cantidad de Mg a adicionar depende inicialmente de la cantidad de azufre en el hierro fundido pues forma sulfuro de magnesio (MgS) y posteriormente produce magnesio residual. [13]

Cuando la adición de magnesio es suficientemente baja, de modo que el magnesio residual está en el intervalo 0.02-0.05%, se produce una alta densidad de nódulos. Sin embargo, un exceso de magnesio residual, con una presencia de más de 0.05% provoca un aumento de carburos y reduce la densidad de nódulos. [13]

El aumento de magnesio residual a 0.045% resulta en un aumento en el recuento de nódulos. Con un mayor aumento en el nivel de magnesio a 0.075%, se observa una disminución en el recuento de nódulos y un aumento en la cantidad de grafito con defectos, particularmente en secciones gruesas [4].

El cerio (Ce), bario (Ba) y tierras raras deben ser controlados para obtener la forma deseada de grafito esferoidal. Los investigadores Dong, Henning y Ward sugieren que en concentraciones inferiores a 1% de Ce e inferiores a 3% de Ba en el inoculante, se tiene una capacidad mayor para aumentar la densidad de nódulos. Específicamente, cuando el cerio está presente con menos de 0.5% y 1% de bario en el inoculante, se aumenta la densidad de nódulos; como se observa en la figura 12.

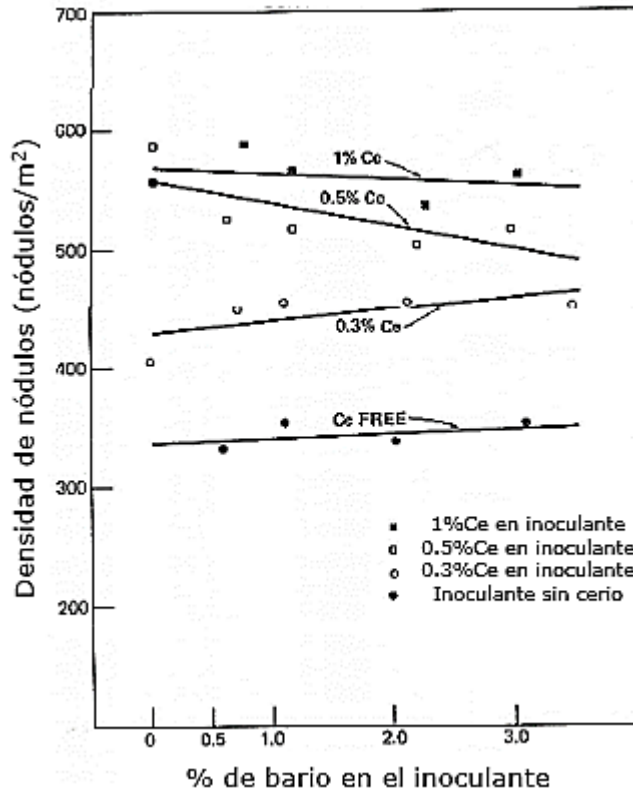


Figura 12. Efecto del bario sobre la densidad de nódulos con distintos niveles de cerio. [13]

La densidad de nódulos en hierro dúctil es extremadamente sensible al contenido de cerio en el hierro. La densidad de nódulos disminuye rápidamente y el contenido de carburo se incrementa, cuando el cerio residual supera el 0.02%. La presencia de Ce en un rango de 0.15-0.7% en el nodulizante tiene un pronunciado efecto sobre la densidad de nódulos. Un aumento de más del 50% en la densidad de nódulos se reportó en una adición de Ce de 0.3% en el nodulizante. Por encima de 0.7%, el cerio no tiene ningún efecto aparente. Por lo tanto, pequeñas adiciones de Ce generalmente producen un mayor número de nódulos, particularmente a temperaturas más bajas de colada (1315 °C). [13]

Dong y Henning [13] mencionan qué nivel máximo de densidad de nódulos se logra cuando el cerio residual está en el intervalo de 0.009-

0.012%, hasta un límite superior de 0.02%. Por encima de ese punto, la nodularidad disminuye como se ve en la figura 13.

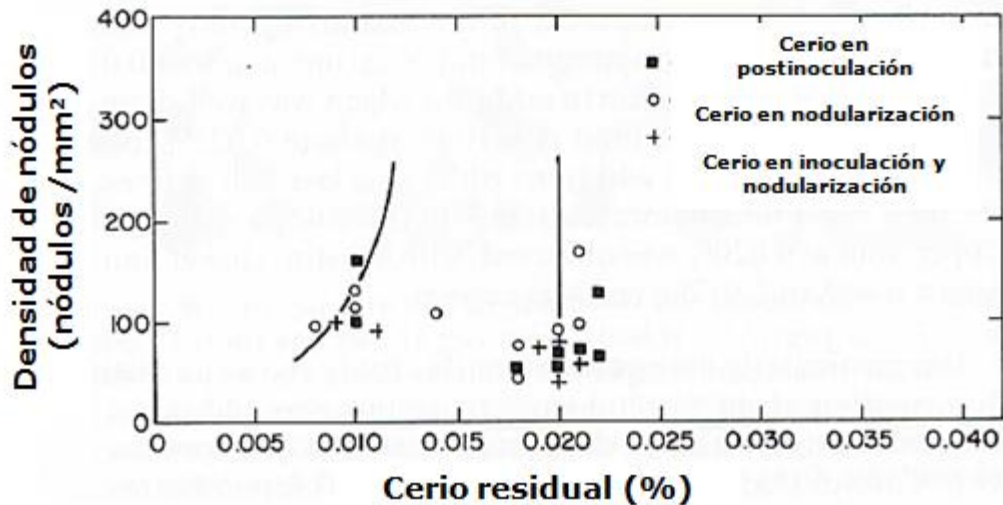


Figura 13. Densidad de nódulos obtenida en una sección de 50.8mm en función del porcentaje de cerio residual. [14]

Los resultados obtenidos por Amin y Loper Jr. [14] indican que el cerio (Ce) juega un papel más importante que el bario (Ba) en la producción de altas cantidades de nódulos de grafito.

2.5. Efecto de la inoculación y postinoculación en el hierro nodular.

El efecto de la inoculación es muy importante desde varios puntos de vista. Dependiendo de la cantidad de inoculante, la inoculación elimina el subenfriamiento e incrementa la densidad de nódulos. El tiempo de la inoculación también tiende a ser importante. A medida que el tiempo después de la inoculación aumenta, la densidad de nódulos disminuye. [4]

La inoculación se lleva a cabo comúnmente en la olla de colada utilizando un inoculante granulado, que puede ser ferrosilicio que contiene 75% de Si o de una de la amplia gama de aleaciones que contienen por lo general de 60 a 80% de silicio. La cantidad de inoculante añadido por lo general está en el intervalo aproximado de 0.05 a 1.0%. Un mayor porcentaje de silicio en el inoculante puede permitir menos inoculación.

Cuando un metal puro solidifica bajo condiciones de no equilibrio, los cristales sólidos no se forman a la temperatura de solidificación, sino que ocurre a una temperatura T menor que TIS , lo que implica el requerimiento de un subenfriamiento cinético, ver la figura 11 (c).

Los inoculantes que contienen bario son especialmente útiles cuando la fundición de hierro dúctil posee secciones gruesas (mayor a 40mm). El contenido total de bario en el inoculante por encima del 3% es innecesario y puede causar generación de escoria [15].

3. Procedimiento Experimental.

3.1. Diseño de experimento y dispositivos.

La experimentación en este proyecto constó de la fabricación de hierro dúctil en un horno de inducción a partir de chatarras de acero y retornos de hierro nodular, inoculando con Fe-75%Si (Hierro con 75% en peso de silicio) y Fe-64%Si-4.5%Ba (Hierro 64% en peso de silicio y 4.5% en peso de bario). La pieza seleccionada para fabricar fue un piñón, una pieza automotriz que posee diámetros mayores a 50mm, es decir, un hierro dúctil de sección gruesa. Los piñones son sometidos a esfuerzos mecánicos, por lo que es necesario tengan propiedades mecánicas altas y una calidad microestructural alta. La placa modelo de la pieza automotriz fue fabricada en un proyecto anterior. La composición química de las piezas fabricadas se determinó mediante un espectrómetro de emisión atómica. Se realizó caracterización metalográfica a cada pieza de hierro dúctil para evaluar: tamaño de nódulo de grafito, densidad de nódulos, % de nodularidad y tipo de matriz (% de perlita y % de ferrita).

Antes de iniciar la fabricación del hierro nodular 120-90-02 se diseñaron y elaboraron dispositivos para obtener la mayor información posible durante la fabricación del hierro. El objetivo de la creación de dichos dispositivos fue efectuar el experimento de una forma controlable y así garantizar su reproducibilidad.

Una de las técnicas que se implementó fue la obtención de una muestra representativa para análisis químico. La cantidad de carbono y otros elementos puede variar de acuerdo a la sección de la pieza automotriz, por lo tanto, resulta complejo obtener un análisis químico que represente homogéneamente la muestra. Para ello, se diseñó un molde

permanente de cobre, el cual, al ser instalado dentro del molde de arena, redujera súbitamente el tiempo de solidificación de la muestra de hierro nodular propiciando el blanqueo de la misma y produciendo así, una muestra homogénea en composición química capaz de representar la pieza fabricada. De ésta manera, se tomó una muestra para análisis químico antes de vaciar al molde y otra dentro del molde adecuadas para el análisis por espectrometría de emisión óptica con el fin de conocer la cantidad de Mg adicionado además de conocer si existió segregación de elementos de aleación en el hierro nodular.

La adaptación de dicho molde de cobre supuso la modificación de la placa modelo. La modificación se muestra en la figura 14.

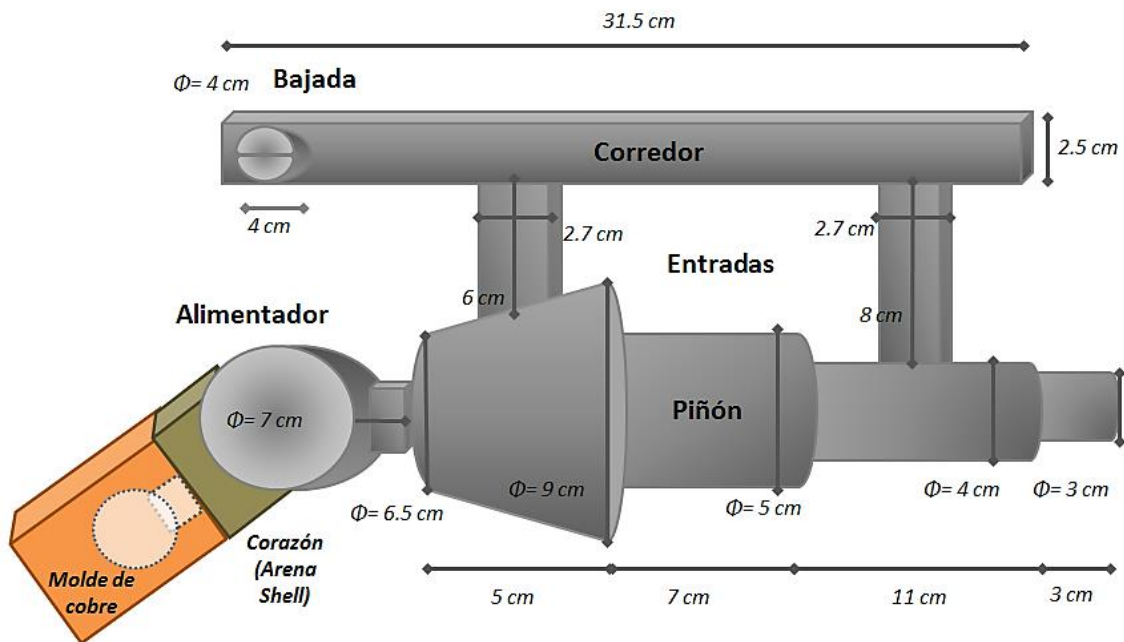


Figura 14. Medidas del sistema de colada, instrumentación con molde de cobre y corazón de arena Shell.

Otro de los aspectos a resolver, fue el diseño y fabricación de un método de postinoculación efectivo. Comúnmente, en el laboratorio, para

efectuar la postinoculación se utiliza una cuchara metálica que conduce el polvo inoculante hacia el molde. No obstante, resulta muy poco eficiente, pues la mayoría de las veces no permite distribuir homogéneamente el inoculante durante todo el tiempo de llenado del sistema de colada. Por lo tanto, este método fue considerado crítico en el experimento, y precisó el diseño de un procedimiento más eficaz para llevar a cabo la postinoculación. Para resolverlo se diseñó un módulo postinoculador (fig. 15), el cual, dependiendo de la cantidad en gramos del inoculante (tamaño de partícula 100 micras) a agregar, pudiera ser calibrado para dosificar el inoculante en un tiempo aproximado de quince segundos, que corresponde al tiempo de llenado del molde.

El molde de cobre con las dimensiones expuestas en la figura 15, tenía ángulos de 2° para facilitar su extracción del molde de arena.

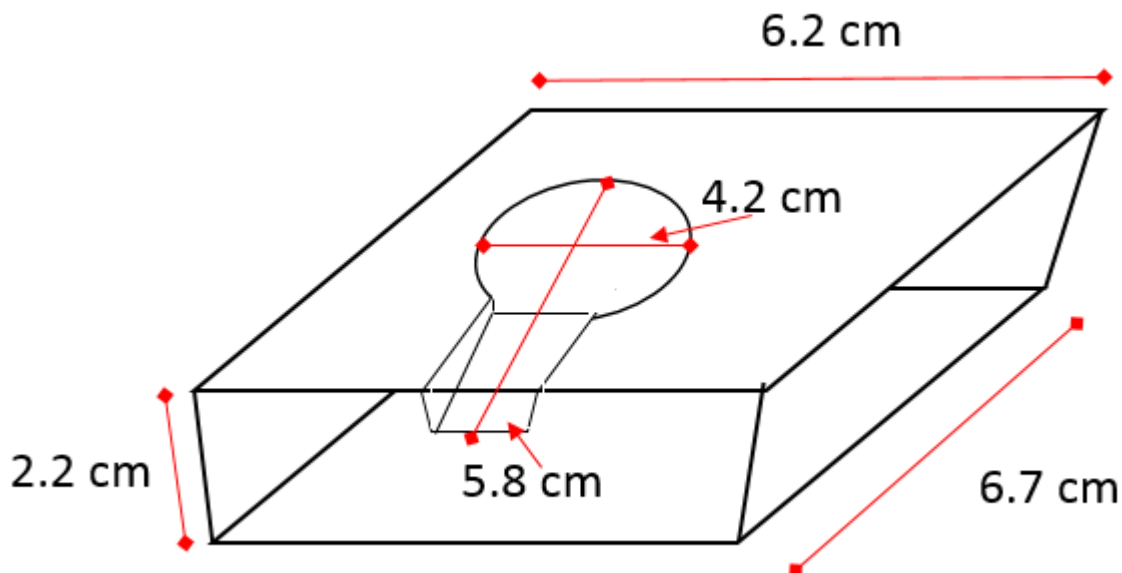


Figura 15. *Diseño del molde de cobre para obtención de probeta.*

El molde de cobre se colocó en la parte más extrema de la bajada, a un costado del alimentador (ver figura 14). El objetivo fue someter la probeta a un enfriamiento más rápido que no afectara el sistema de alimentación y que no alterara la eficiencia del alimentador, provocando que la pieza automotriz se fabricara sin defectos. El metal líquido tuvo que recorrer todo el sistema para alcanzar a llenar el molde de cobre, por lo tanto su tiempo de enfriamiento fue corto, lo que garantizó el blanqueamiento de la muestra.

El análisis químico para conocer el contenido de carbono se hizo en una muestra donde el grafito no estuviera precipitado, debido a la pérdida de carbono en la preparación o por la segregación.

La implementación de un *corazón* hecho de arena Shell permitió proteger el molde de cobre del cambio súbito de la temperatura que era capaz de perjudicarlo cambiando su forma. Por lo tanto, debido a la cantidad de experimentos realizados, fue necesario reutilizar los moldes de cobre; el corazón de Shell pudo sacrificarse, pero fue necesario darle la forma y cavidades necesarias para permitir la entrada de hierro líquido.

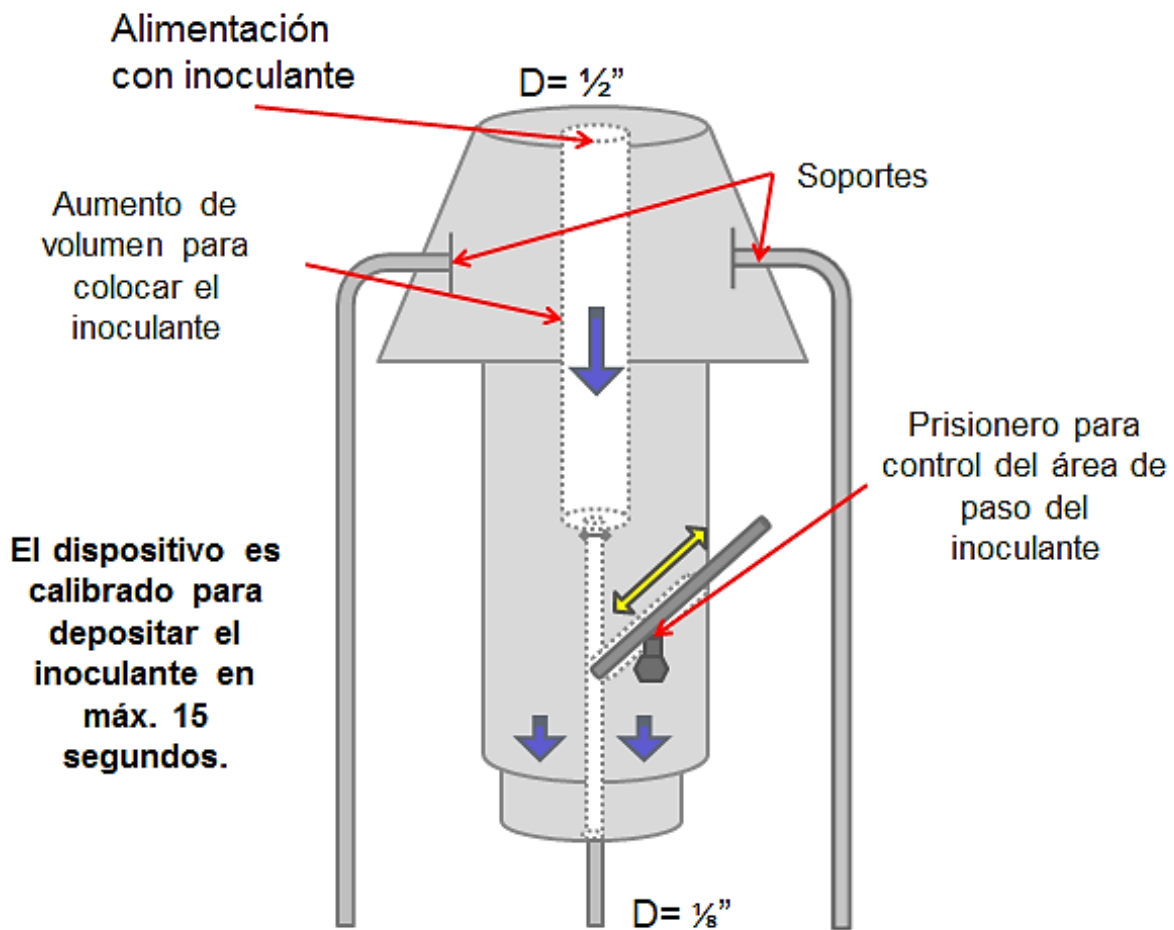


Figura 16. Se muestra el diseño del módulo postinoculador.

En la tabla 3 se puede observar el diseño de experimentos para éste proyecto. El número de experimentos fueron diez y las variables consideradas fueron:

- I. Tipo de inoculante.
- II. Nivel de postinoculación.
- III. Tamaño de sección.
- IV. Temperatura de colada.

Se utilizaron dos tipos de inoculantes: Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba, con cinco niveles distintos de postinoculación: 0.05, 0.15, 0.25, 0.35 y 0.45% en peso respecto a la masa total de hierro líquido en el horno de inducción (33Kg). Así mismo, la pieza automotriz (piñón) contó con cuatro distintos tamaños de sección: 30, 40, 50 y 90mm. Finalmente, se efectuaron coladas con tres distintas temperaturas de colada: T_{c1} (1400°C a 1380°C), T_{c2} (1360 a 1340°C) y T_{c3} (1330°C a 1310°C).

No. De Experimento	Fe-75%Si							
	Nivel de postinoculación (%)	Temperatura de colada			Tamaño de sección (mm)			
1	0.05	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
2	0.15	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
3	0.25	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
4	0.35	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
5	0.45	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
	Fe-64%Si-4.5%Ba							
	Nivel de postinoculación (%)	Temperatura de colada			Tamaño de sección (mm)			
6	0.05	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
7	0.15	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
8	0.25	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
9	0.35	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90
10	0.45	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	30	40	50	90

Tabla 3. *Diseño de experimentos.*

3.2. Condiciones de moldeo en arena en verde.

La elaboración del molde de arena en verde se llevó a cabo con 50 Kg de mezcla total. Las condiciones de preparación de la mezcla fueron:

10% de bentonita (40% cálcica y 60% sódica), con un porcentaje de humedad del 3.7%. La preparación del molde de arena supuso la instrumentación del mismo para llevar a cabo el registro de las curvas de enfriamiento. Para ello se colocaron cuatro termopares por piñón a fabricar. El propósito fue conocer la historia térmica de cada sección del piñón.

3.3. Técnica de fusión.

La técnica de fusión fue un paso importante en la experimentación. Para fabricar el hierro nodular 120-90-02 se cuenta con distintas materias primas, dos chatarras de acero diferentes, inoculantes, etc. Como se muestra en la tabla 4.

Base de cálculo 33Kg									
Materias Primas	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%Ca	%Ba	%Mg
Retornos	3.65	2.45	0.6	0.05	0.015				0.045
Chatarra tubo de acero	0.0717	0.02515	1.223	0.0172	0.0023				
Chatarra lámina de acero	0.0773	0.027	0.2988	0.0013	0.0009				
Fe-Si (aleante)		75							
Fe-Si (inoculante)		75				1.15	0.95		
Fe-Si-Ba (inoculante)		64	9			1.3	2.5	4.5	
Noduloy 6R	45.43					0.62	1.12		6.42
Fe-Mn			73						
Recarburante	99.8								

Tabla 4. Materias primas para la fabricación de hierro nodular 120-90-02.

Una vez que fue realizado el balance de carga correspondiente, como se resume en la figura 17. Se realizó la técnica de fusión, en un horno de inducción con capacidad de 100Kg de hierro gris. En los experimentos se llevó a cabo la fusión de 33Kg de masa total en el horno de inducción.

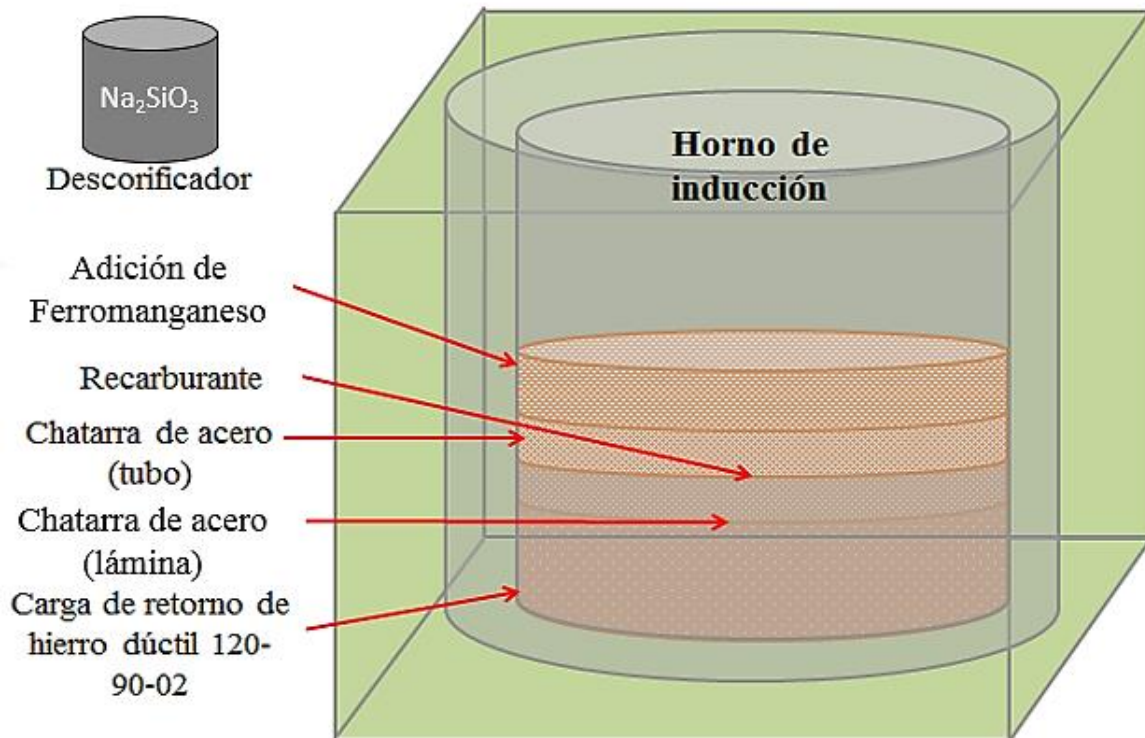


Figura 17. *Secuencia de carga en el horno de inducción para la fabricación de hierro nodular 120-90-02.*

Una vez hecho un análisis químico para conocer la cantidad de carbono presente en el horno de inducción, se agregó el recarburante necesario para ajustar el carbono. Enseguida se cargó el resto de la chatarra de acero de lámina para llenar con 33Kg totales la masa total en el horno de inducción y finalmente se agregó el ferromanganeso.

3.4. Tratamiento de nodularización e inoculación temprana y tardía.

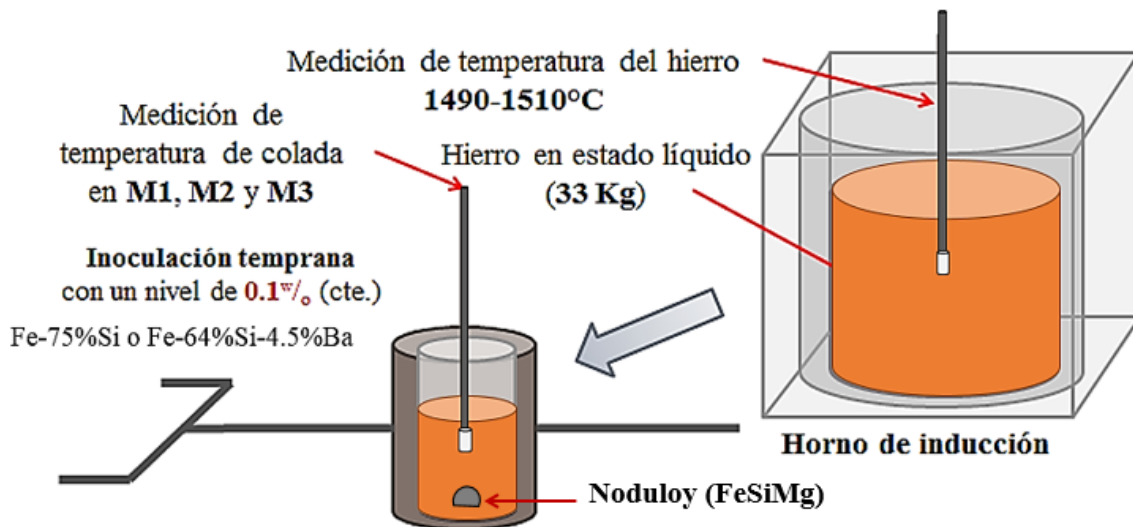


Figura 18. Registro de temperaturas de colada y tratamientos al metal líquido.

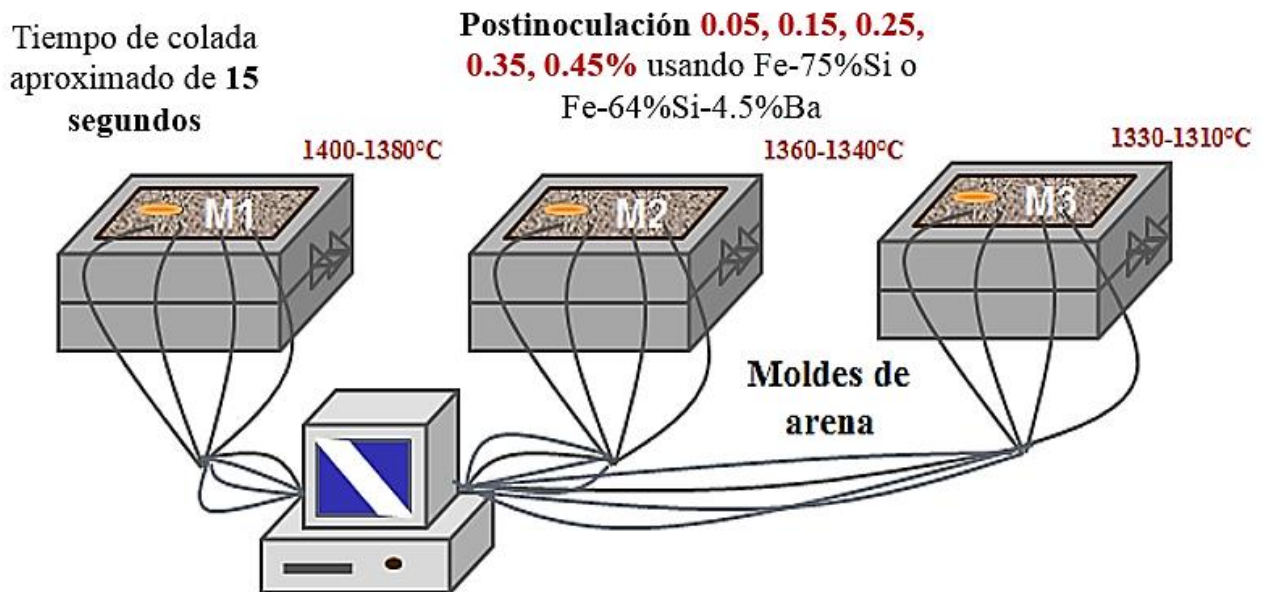


Figura 19. Postinoculación e instrumentación con termopares tipo k para análisis térmico.

Una vez fundida la carga en el horno de inducción, el metal líquido se calentó entre 1490 y 1510°C.

Como se observa en la figura 18, se trasladó la olla de tratamiento para fabricar el hierro nodular por el método del sándwich, hacia el horno de inducción para proseguir al vaciado.

En el proceso de vaciado en la olla de tratamiento se llevó a cabo la inoculación temprana con un nivel de 0.1% constante con el inoculante Fe-75%Si o Fe-64%Si-4.5%Ba. El vaciado del horno a la olla se realizó en dos ocasiones de 16.5 Kg cada uno. Al final se usó silicato de sodio (Na_2SiO_3) como descorificante para evitar la presencia de escoria durante el vaciado en los moldes.

Así mismo, se instrumentó con el módulo de postinoculación previamente calibrado para dosificar la cantidad de inoculante respectiva (0.05%, 0.15%, 0.25%, 0.35% o 0.45% en peso de nivel de postinoculación) en un tiempo aproximado de 15 segundos, ver la figura 19.

3.5. Instrumentación para análisis térmico.

Los termopares se colocaron en la parte superior de cada molde (cope) según la figura 20 en cada una de las cuatro secciones de la pieza automotriz para obtener la historia térmica correspondiente de cada tamaño de sección.

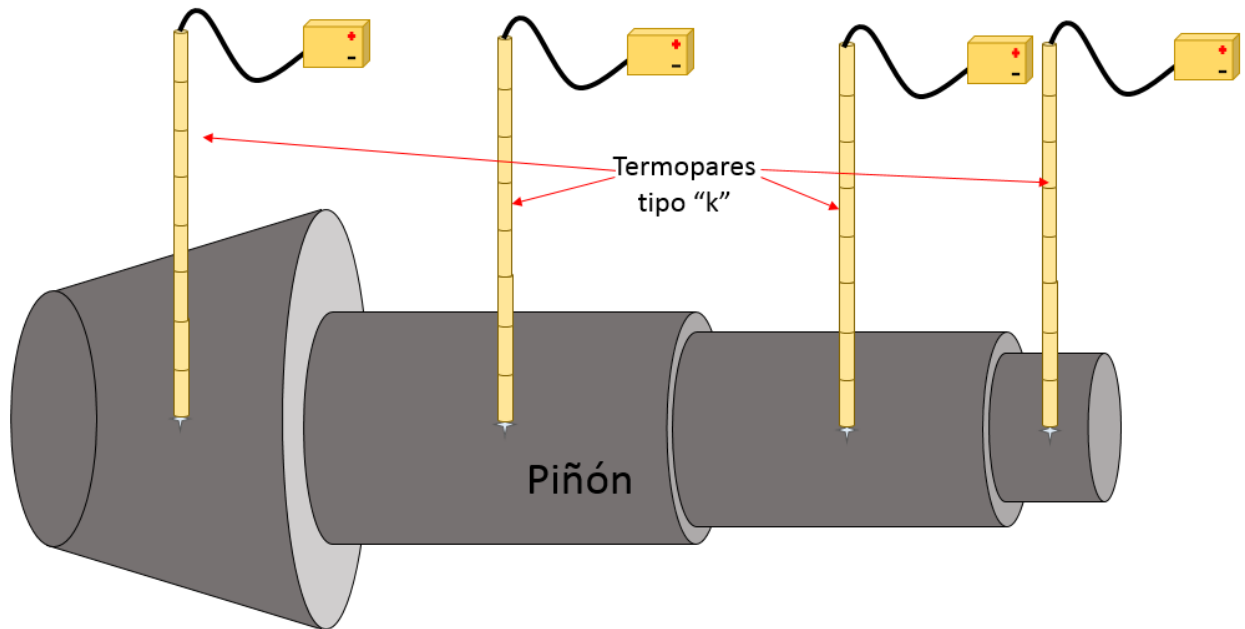


Figura 20. *Diseño de la instrumentación con termopares tipo k en cada una de las secciones de la pieza automotriz a fabricar (piñón).*

Se registró la temperatura del hierro líquido en la olla de tratamiento hasta llegar a la temperatura de vaciado en cada molde, esto implicó que este paso se repitiera previo a cada colada. Posteriormente se llevó a cabo la colada, y la adición del inoculante mediante el módulo postinoculador. Se inició el registro de datos de las curvas de enfriamiento durante 45 minutos.

En consecuencia, la información que se recopiló fue: curvas de enfriamiento de cada sección del piñón, considerando que el piñón está dividido en cuatro secciones diferentes, lo que implica que se obtuvieron cuatro curvas de enfriamiento por cada pieza (mediante un adquisidor y un software), es decir, doce curvas de enfriamiento por fusión.

3.6. Desmoldeo y preparación de muestras representativas.

Una vez solidificado el metal, se prosiguió con el desmoldeo. Para esto, se cortaron los termopares lo más cercano posible al metal, para reutilizarlos. Enseguida, se separaron los moldes de cobre y se fracturaron las probetas para separarlas del sistema de colada y realizar su correspondiente análisis químico. Posteriormente se limpiaron con cepillo de alambre los piñones para retirar la arena con el objetivo de obtener retornos para la fabricación del hierro dúctil consiguiente. Una vez separado el piñón se seccionó y se dividió con cortadora de disco las secciones para el posterior análisis metalográfico como se muestra en la figura 21.

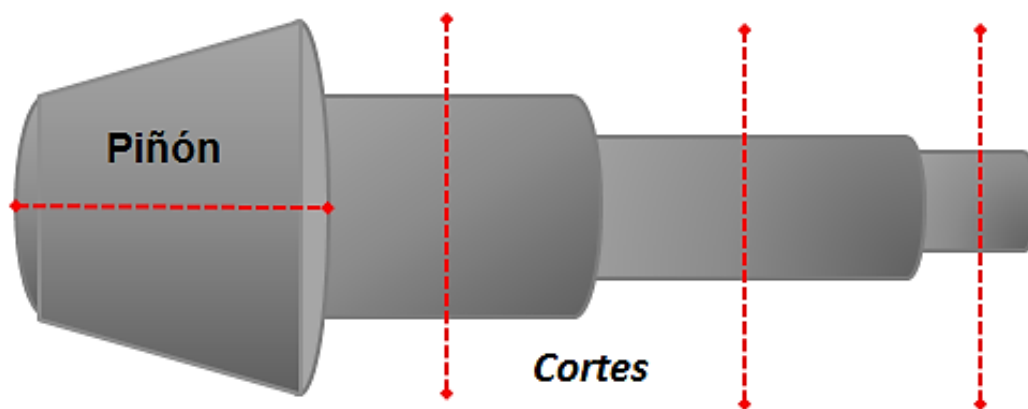


Figura 21. Muestra las secciones de corte en las piezas fabricadas para realizar análisis metalográfico.

El análisis individual de cada sección se llevó a cabo dividiendo el área superficial de la muestra en tres partes iguales ubicadas en la zona en la que esté situado el termopar. De ésta manera la información obtenida del análisis metalográfico será representativa y estará en concordancia con la información de la curva de enfriamiento correspondiente. En la figura 22 se muestran los cortes transversales que se realizaron en las

piezas de los piñones a fabricar. El área superficial de análisis metalográfico se divide en superior (I), intermedia (II) e inferior (III).

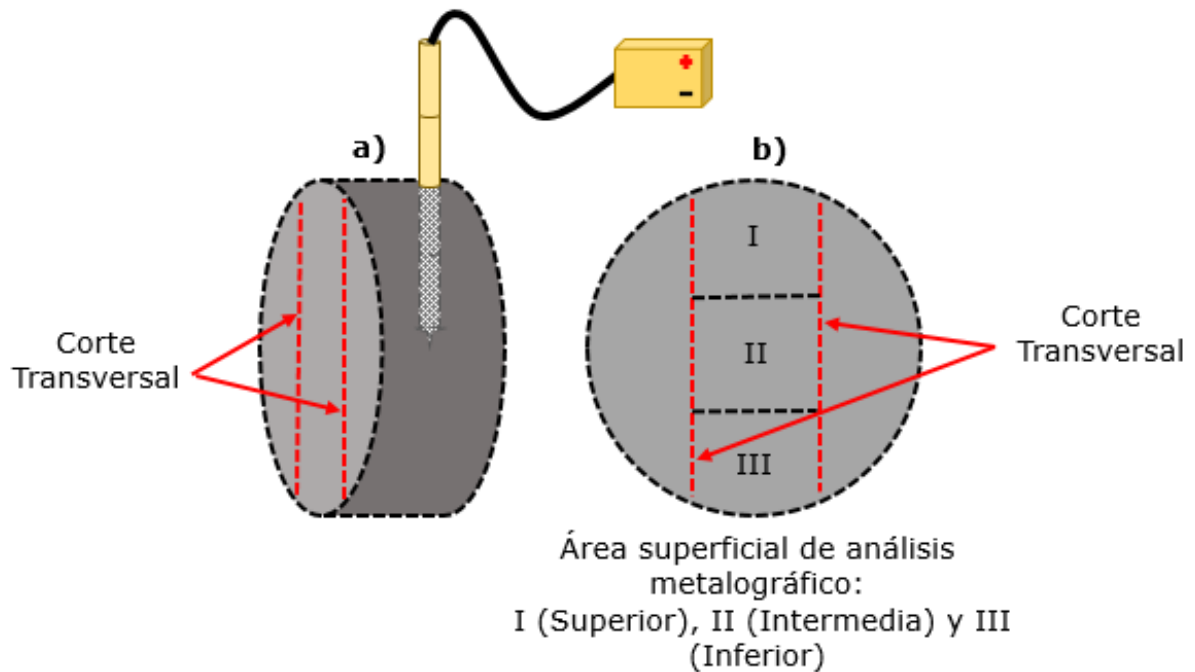


Figura 22. Muestra los cortes transversales en las secciones (a) y en el área superficial de análisis (b), para realizar análisis metalográfico.

Cada muestra fue desbastada, preparada con lijas 240, 320, 400, 600 y 1200, para finalizar con paño fino y grueso; se atacaron en un tiempo promedio de 5 segundos con Nital 3.

En cada una de estas divisiones se hizo un barrido con el microscopio óptico en la cual se tomaron tres fotografías digitales para un análisis promedio de densidad de nódulos, tamaño de nódulo y porcentaje de nodularidad. Posteriormente al ataque de las muestras con Nital 3, se llevó a cabo el mismo barrido y análisis para determinar el tipo de matriz y presencia de carburos.

4. Resultados.

4.1. Placa modelo e instrumentación.

El diseño de la placa modelo para la fabricación de la pieza automotriz (piñón) sugirió la modificación de la misma para la implementación de una caja de cobre que permitiera la obtención de una muestra de hierro blanco capaz de representar la composición química de la pieza fabricada.

En primer lugar, se fabricó una probeta con resina epóxica. Para ello se usó un molde usado comúnmente en el laboratorio para producir probetas para análisis químico.

Con la probeta de resina se fabricaron moldes de yeso de alta resistencia. La fabricación de los moldes de yeso de alta resistencia se llevó a cabo con una mezcla de 250mL de agua por cada 200 gramos de yeso de alta resistencia. Debido a la gran cantidad de yeso utilizado, los moldes de yeso parcialmente endurecidos se sometieron a 60°C de calor durante 24 horas, de esta manera la humedad fue extraída de los moldes y se obtuvo una mayor dureza en las mismas. Paralelamente se fabricó la cara opuesta del molde con madera, ya que supuso un diseño muy simple, además de una fabricación y maquinado sencillos.

En la figura 23 se observan los moldes de yeso de alta resistencia y madera para la obtención de probeta en forma circular y con un espesor de 4mm.



Figura 23. *Molde de yeso de alta resistencia y molde de madera.*

En la figura 24 se observa el molde de cobre permanente a partir de los moldes de yeso y madera.



Figura 24. *Molde permanente de cobre para obtención de probeta.*

Paralelamente, para la modificación de la placa modelo, la cual, como ya se mencionó antes, ya fue fabricada en un proyecto anterior supuso sólo la fabricación de dos piezas de aluminio para dar espacio al molde de cobre permanente en el molde de arena.

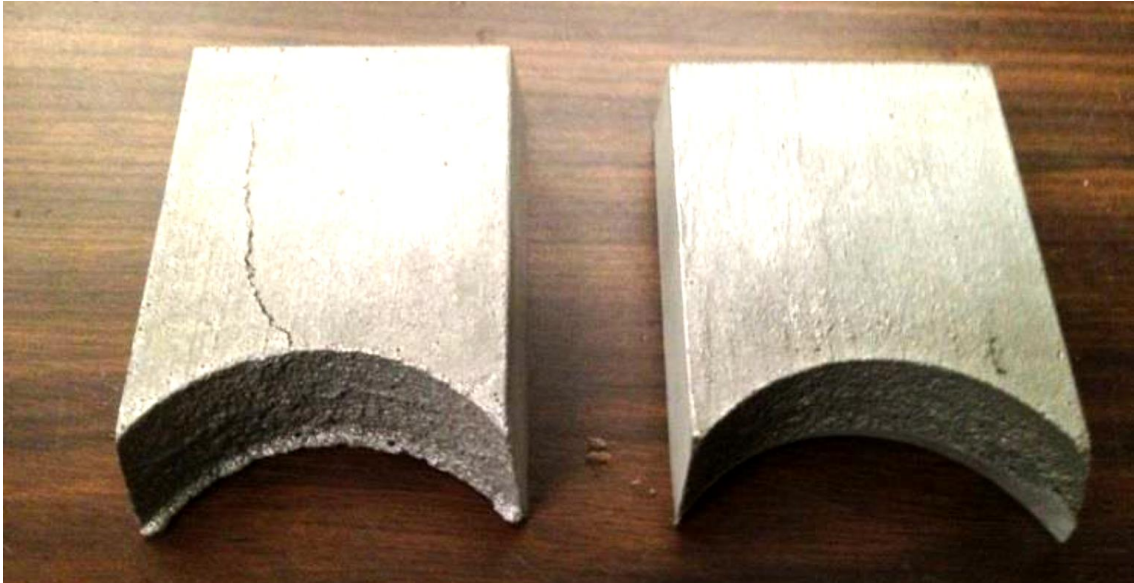


Figura 25. *Piezas de aluminio para la modificación de la placa modelo.*

Las piezas de aluminio fueron desbastadas para crear una pared curva en uno de sus extremos con el fin de adecuarla a la forma del alimentador, como se observa en la figura 25. La instalación de estas piezas se realizó fijándolas con pernos en la placa modelo y usando pasta resanadora automotriz para llenar el espacio entre la pieza de aluminio y el alimentador de la placa modelo.

Las piezas de aluminio fabricadas se instalaron en la placa modelo de la pieza automotriz, como se observa en la figura 26.



Figura 26. *Modificación de la placa modelo para dar cabida al molde de cobre permanente. a) Parte superior y b) Parte inferior.*

La temperatura de sobrecalentamiento fue de 1500 °C, aproximadamente, por otro lado, la temperatura de fusión del cobre es de 1084 ° C, por lo que al entrar en contacto el hierro fundido con el molde de cobre, este último podría resultar dañado durante la experimentación.

Para evitar el daño en el molde de cobre por las temperaturas elevadas, se protegió con pintura de zirconio en la cara hacia el alimentador y en las superficies con las que entraría en contacto la probeta. Además el uso de la pintura facilita la extracción de la moneda una vez solidificado el hierro colado.

Se fabricaron "corazones" con el fin de evitar la fusión del cobre y reutilizar los moldes. Los corazones fueron fabricados con arena Shell, como se muestra en la figura 27.

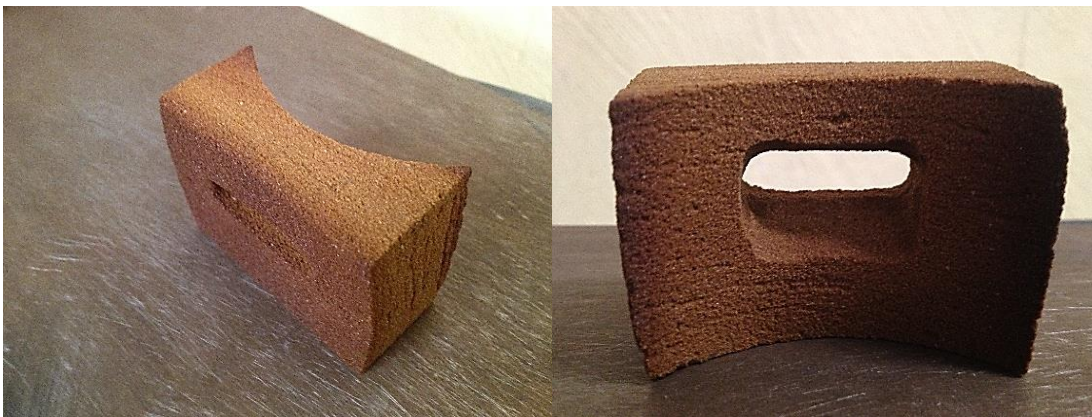


Figura 27. Corazón de arena Shell para protección del molde de cobre.



Figura 28. *Instrumentación con el molde permanente de cobre y el corazón de arena Shell.*

Al *corazón* se le dio la misma dimensión de la cara del molde de cobre por la cual entró el metal fundido, como se observa en la figura 28; de esta manera generó una barrera de protección ante el calor irradiado por el metal líquido.

Además, un procedimiento previo para los moldes de cobre fue el precalentamiento de dichas piezas para crear un amortiguamiento en el precipitado aumento de la temperatura que sufren dichos moldes de cobre.

Una vez hecho esto, se instrumentaron los moldes de arena para permitir un vaciado del hierro nodular sin salpicaduras o fugas de metal líquido. Además, se adecuó el molde para permitir colocar los termopares tipo "k" y registrar la historia térmica de cada una de las cuatro secciones de los tres piñones fabricados por fusión, es decir, se instrumentaron doce termopares tipo "k", como puede verse en la figura 29.



Figura 29. *Instrumentación con termopares tipo k y con el dosificador para llevar a cabo la postinoculación.*

Para la instrumentación con los termopares, se usó una broca de 3/8", se realizaron orificios en el "cope" de cada molde, ubicados de forma centralizada en cada una de las cuatro secciones de la pieza automotriz. El objetivo principal fue obtener curvas de enfriamiento representativas del hierro nodular fabricado, de forma tal que las puntas de los termopares adquirieran la temperatura justo en el centro de cada sección de las piezas fabricadas; si algún termopar registrará la temperatura en la orilla de la pieza, se obtendría una curva de enfriamiento incongruente con las metalografías respectivas.

Paralelamente, una vez cerrado el molde de arena, se creó una tina justo a un lado de la bajada del molde de arena, para propiciar un vaciado uniforme, además, de ésta manera se crea un vórtice en la

bajada que ayuda al inoculante a distribuirse homogéneamente en el sistema de colada y en la pieza a fabricar; de ésta manera se instaló el dispositivo inoculador “dosificador” por encima de la bajada del molde para que suministrará el inoculante en máximo 15 segundos con tamaño de partícula de 100 micras. Por ende, fue necesario calibrar el dosificador de acuerdo a la cantidad en gramos correspondiente a cada nivel de postinoculación a adicionar mediante un perno y un prisionero, como se muestra en la figura 29.

4.2. Fabricación de piñones y balance de carga.

Las pruebas se realizaron en orden ascendente respecto a la cantidad de postinoculación, es decir, 0.05%, 0.15%, 0.25%, 0.35% y 0.45% con Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba. Una vez que el hierro fundido alcanzó las composiciones químicas promedio necesarias previas al vaciado a la olla de tratamiento se verificó la temperatura dentro del horno de inducción usando un pirómetro de inmersión, cuando la temperatura era cercana a $1500 \pm 20^{\circ}\text{C}$ se vació en la olla de tratamiento.

Se llevó a cabo la reacción con magnesio por el método del sándwich y al mismo tiempo la inoculación temprana con un nivel de 0.1% usando Fe-75%Si o Fe-64%Si-4.5%Ba. Una vez terminada la reacción con magnesio, se midió la temperatura dentro de la olla, se obtuvo una probeta de la olla de tratamiento previa a la colada (CX) con el objetivo de conocer el nivel real de postinoculación llevado a cabo. Finalmente se llevó a cabo el vaciado en el molde de arena, con su respectivo registro del tiempo de vaciado para cada uno de los tres moldes por fusión con su respectiva temperatura de colada (T_{cX}).

A partir de la composición química promedio del hierro nodular grado 120-90-02 que se muestra en la tabla 1 en los antecedentes y la

composición química de las materias primas mostrados en la tabla 4 del procedimiento experimental, se realizó el siguiente balance de carga representativo de las diez fusiones llevadas a cabo.

Cantidad de kilogramos necesarios por elemento:

$$\text{Elemento} = \frac{\text{Masa total (Kg)} \cdot \frac{\text{Composición química promedio}}{100}}{\frac{\text{Rendimiento}}{100}} = x \text{ Kg}$$

$$C = \frac{33\text{Kg} \cdot \frac{4}{100}}{\frac{95}{100}} = 1.3894 \text{ Kg}$$

$$Si = \frac{33\text{Kg} \cdot \frac{2.45 - 0.55 - 0.463}{100}}{\frac{96}{100}} = 0.49396 \text{ Kg}$$

$$Mn = \frac{33\text{Kg} \cdot \frac{0.6}{100}}{\frac{98}{100}} = 0.2020 \text{ Kg}$$

$$Mg = \frac{33\text{Kg} \cdot \frac{0.045}{100}}{\frac{45}{100}} = 0.033 \text{ Kg}$$

$$P = \frac{33\text{Kg} \cdot \frac{0.5}{100}}{\frac{100}{100}} = 0.165 \text{ Kg}$$

$$S = \frac{33\text{Kg} \cdot \frac{0.015}{100}}{\frac{100}{100}} = 0.00495 \text{ Kg}$$

Cantidad de elementos aportados por 9.1 Kg de chatarras (ch1):

$$\text{Elemento} = 9.1 \text{ Kg} \cdot \frac{\text{Composición química promedio}}{100} = x \text{ Kg}$$

$$C = 9.1 \text{ Kg} \cdot \frac{0.0717}{100} = 0.00652 \text{ Kg}$$

$$Si = 9.1 \text{ Kg} \cdot \frac{0.02515}{100} = 0.00228 \text{ Kg}$$

$$Mn = 9.1 \text{ Kg} \cdot \frac{1.223}{100} = 0.11129 \text{ Kg}$$

$$P = 9.1 \text{ Kg} \cdot \frac{0.0172}{100} = 0.00156 \text{ Kg}$$

$$S = 9.1 \text{ Kg} \cdot \frac{0.0023}{100} = 0.0002093 \text{ Kg}$$

Balance en función del elemento crítico (S), considerando 9.1 Kg de chatarra acero tubo (ch1):

$$ch1 = 9.11 \text{ Kg}$$

$$ch2 + retornos = 23.9 \text{ Kg}$$

$$retornos = 23.9 \text{ Kg} - ch2$$

$$0.00495 \text{ Kg} = Ret. \cdot \frac{0.015}{100} + 0.002093 + ch2 \cdot \frac{0.0009}{100}$$

$$0.00495 \text{ Kg} = (23.9 \text{ Kg} - ch2) \cdot 0.00015 + 0.002093 + 0.000009ch2$$

$$0.002857 \text{ Kg} = (0.003585 \text{ Kg} - 0.00015ch2) + 0.000009ch2$$

$$-0.000728 \text{ Kg} = -0.000141ch2$$

$$ch2 = 5.16312 \text{ Kg}$$

$$retornos = 23.9 \text{ Kg} - 5.16312 \text{ Kg}$$

$$Retornos = 18.736 \text{ Kg}$$

Cantidad de elementos aportados por 15.163 Kg de ch2:

$$C = 15.163 \text{ Kg} \cdot \frac{0.0773}{100} = 0.01721 \text{ Kg}$$

$$Si = 15.163 \text{ Kg} \cdot \frac{0.027}{100} = 0.00409 \text{ Kg}$$

$$Mn = 15.163 \text{ Kg} \cdot \frac{0.2988}{100} = 0.04530 \text{ Kg}$$

$$P = 15.163 \text{ Kg} \cdot \frac{0.013}{100} = 0.00197 \text{ Kg}$$

$$S = 15.163 \text{ Kg} \cdot \frac{0.0009}{100} = 0.00013 \text{ Kg}$$

Cantidad de elementos aportados por 18.736 Kg de retornos:

$$C = 18.736 \text{ Kg} \cdot \frac{3.65}{100} = 0.68386 \text{ Kg}$$

$$Si = 18.736 \text{ Kg} \cdot \frac{2.45}{100} = 0.45903 \text{ Kg}$$

$$Mn = 18.736 \text{ Kg} \cdot \frac{0.6}{100} = 0.11241 \text{ KgKg}$$

$$P = 18.736 \text{ Kg} \cdot \frac{0.05}{100} = 0.009368 \text{ Kg}$$

$$S = 18.736 \text{ Kg} \cdot \frac{0.015}{100} = 0.00281 \text{ Kg}$$

Balance para cada elemento:

a) C:

$$\begin{array}{cccc} \text{Req.} & \text{Ch1} & \text{Ch2} & \text{Retorno} \\ 1.3894 \text{ Kg} = & 0.00652 \text{ Kg} + & 0.01721 \text{ Kg} + & 0.68386 \text{ Kg} + \text{Rec.} \frac{99.8}{100} \frac{95}{100} \end{array}$$

$$1.3894 \text{ Kg} = 0.70759 \text{ Kg} + \text{Rec.} \frac{99.8}{100} \frac{95}{100}$$

$$0.68181 \text{ Kg} = \text{Rec.} \frac{99.8}{100} \cdot \frac{95}{100}$$

$$\text{Recarburante} = 0.71913 \text{ Kg} = 719.13 \text{ g}$$

b) Si:

Cantidad de S en el metal líquido:

$$S = 33 \text{ Kg} \cdot \frac{0.015}{100} = 0.00495 \text{ Kg} = 4.95 \text{ g}$$

Cantidad de Mg en la reacción:

$$Mg_{\text{reacción}} = 0.76 \cdot 4.95 \text{ g} = 3.762 \text{ g}$$

Cantidad de Mg residual requerido:

$$Mg_{residual} = 33 \text{ Kg} \cdot \frac{0.06}{100} = \mathbf{0.0198 \text{ Kg} = 19.8 \text{ g}}$$

Cantidad de Mg total requerido:

$$Mg_{TOTAL} = Mg_{residual} + Mg_{reacción} = \mathbf{23.562 \text{ g}}$$

Cantidad de FeSiMg para el proceso de nodularización (método del sándwich) con una eficiencia del 45% con respecto al Mg residual:

$$FeSiMg = 23.562 \text{ g} \cdot \frac{100}{6.42} = \mathbf{367.009 \text{ g}}$$

Considerando la eficiencia del proceso se calcula la cantidad a agregar en la olla de tratamiento:

$$FeSiMg = 367.009 \text{ g} \cdot \frac{100}{45} = \mathbf{815.575 \text{ g}}$$

Cantidad de Si aportada en el FeSiMg:

$$Si = 0.815575 \text{ Kg} \cdot \frac{45.43}{100} = \mathbf{0.37051 \text{ Kg}}$$

Lo que porcentualmente equivale a:

$$\%Si = 0.37051 \text{ Kg} \cdot \frac{100}{80} = \mathbf{0.463 \%}$$

<i>Req.</i>	<i>Ch1</i>	<i>Ch2</i>	<i>Retorno</i>
$0.49396 \text{ Kg} = 0.00228 \text{ Kg} + 0.00409 \text{ Kg} + 0.45903 \text{ Kg} + Fe - Si \frac{75}{100} \cdot \frac{98}{100}$			
$0.02856 \text{ Kg} = Fe - 75Si \cdot \frac{75}{100} \cdot \frac{98}{100}$			
$0.556083 \text{ Kg} = Fe - 75Si \cdot \frac{75}{100} \cdot \frac{98}{100}$			
$Fe - 75Si = \mathbf{0.038857 \text{ Kg} = 38.85 \text{ g de Fe} - 75\%Si}$			

c) Mn:

<i>Req.</i>	<i>Ch1</i>	<i>Ch2</i>	<i>Retorno</i>
$0.2020 \text{ Kg} = 0.11129 \text{ Kg} + 0.0453 \text{ Kg} + 0.011241 + FeMn \cdot \frac{73}{100} \cdot \frac{98}{100}$			

$$0.2020 \text{ Kg} = 0.1678 \text{ Kg} + FeMn \cdot \frac{73}{100} \cdot \frac{98}{100}$$

$$0.03416 \text{ Kg} = FeMn \cdot \frac{73}{100} \cdot \frac{98}{100}$$

$$FeMn = 0.04776 \text{ Kg} = 47.76 \text{ g}$$

d) P:

<i>Req.</i>	<i>Ch1</i>	<i>Ch2</i>	<i>Retorno</i>
0.165 Kg	= 0.00156Kg	+ 0.00197 Kg	+ 0.009368 Kg

$$0.165 \text{ Kg} > 0.0128 \text{ Kg}$$

e) S:

<i>Req.</i>	<i>Ch1</i>	<i>Ch2</i>	<i>Retorno</i>
0.00495 Kg	= 0.0002093Kg	+ 0.00013 Kg	+ 0.00281 Kg

$$0.00495 \text{ Kg} > 0.003149 \text{ Kg}$$

La cantidad de inoculante, ya sea Fe-75%Si o Fe-64%Si-4.5%Ba para agregar en la inoculación temprana fue constante y se calculó en base a la cantidad de hierro en el horno de inducción de la siguiente manera:

$$33000 \text{ g} - 100\%$$

$$x - 0.1\%$$

$$x = 33 \text{ g de inoculación temprana (constante)}$$

Paralelamente la cantidad de inoculante en la postinoculación o inoculación tardía para cada uno de los cinco niveles se calculó en base al peso de la pieza automotriz fabricada (9 Kg) como se muestra:

- Nivel 0.05% de postinoculación:

$$9000 \text{ g} - 100\%$$

$$x - 0.05\%$$

$$x = 4.5 \text{ g de postinoculación}$$

- Nivel 0.15% de postinoculación:

$$9000 \text{ g} - 100\%$$

$$x - 0.15\%$$

$$x = 13.5 \text{ g de postinoculación}$$

- Nivel 0.25% de postinoculación:

$$9000 \text{ g} - 100\%$$

$$x - 0.25\%$$

$$x = 22.5 \text{ g de postinoculación}$$

- Nivel 0.35% de postinoculación:

$$9000 \text{ g} - 100\%$$

$$x - 0.35\%$$

$$x = 31.5 \text{ g de postinoculación}$$

- Nivel 0.45% de postinoculación:

$$9000 \text{ g} - 100\%$$

$$x - 0.45\%$$

$$x = 40.5 \text{ g de postinoculación}$$

4.3. Tiempo y temperatura de colada.

En el apéndice A se muestran los tiempos de colada para cada pieza fabricada y las temperaturas registradas en la olla (3A y 4A para fusión con Fe-75Si y Fe-Si-Ba respectivamente). Así mismo la temperatura de colada se consideró en un rango de 1400 a 1380°C (T_{c1}), 1360 a 1340°C (T_{c2}) y 1330 a 1310°C (T_{c3}) descrito en la figura 21 del procedimiento experimental.

En el apéndice A se muestra también la nomenclatura de las secciones de las piezas fabricadas (30, 40, 50 y 90 mm) dependiendo del tipo de inoculante y nivel de postinoculación utilizado. Por ejemplo, para la

muestra 1A, la primera cifra indica el número de fusión y la letra indica el tamaño de sección y la temperatura de colada correspondiente.

4.4. Análisis químicos.

En el apéndice B se presentan las composiciones químicas de las probetas obtenidas previas al vaciado (CX) y de las monedas producidas dentro del molde (MX), dónde X es el número respectivo de cada molde. No se cuenta con las probetas M1 del nivel 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, C2 y C3 de la fusión correspondiente usando un nivel de postinoculación de 0.05% Fe-75%Si y C1 usando Fe-75%Si con un nivel de postinoculación de 0.45%.

Al transcurrir un tiempo elevado después de iniciar la fusión, algunos elementos, como carbono sufrieron variaciones que tuvieron que ser consideradas antes de vaciar el metal líquido en la olla de tratamiento. Por ejemplo, durante la mayoría de las fusiones el carbono sufrió una disminución en la composición química del hierro en el horno de inducción, para contrarrestar este efecto fue necesario calcular la cantidad de carburante a añadir en el horno de inducción de tal manera que el C fuese cercano a 3.65% en la composición del metal líquido, promedio correspondiente a un hierro nodular grado 120-90-02. En la mayoría de las fusiones el porcentaje en peso de C fue de 3.6%.

El azufre (S), durante algunas fusiones, en el metal líquido, tendía a disminuir hasta un 0.015% en peso para considerarse un hierro dúctil 120-90-02; más concretamente, disminuyó hasta un 0.010% en peso en promedio.

Paralelamente, el fósforo (P) no excedió en ninguna pieza fabricada un porcentaje en peso mayor al 0.017% en promedio. Esto quiere decir que se mantuvo cerca de la cantidad típica para un hierro nodular (0.02% en

peso). En caso de que el fósforo excediera su presencia por arriba de un 0.08% se promovería la formación de perlita y carburos intercelulares en la estructura de las piezas fabricadas. Se comprobó en las metalografías que, generalmente, el efecto sobre la matriz fue nulo y finalmente el tipo de matriz quedó determinada por la cantidad de Si suministrada en el proceso de inoculación.

El magnesio fue un elemento crítico durante la fusión. Su papel fue determinante en la formación de nódulos de grafito en la fabricación de hierro nodular 120-90-02. El elemento mencionado tuvo un efecto directo sobre la formación de carburos en las piezas fabricadas. Fue el principal formador de carburos en los niveles más bajos de inoculación; se puede observar en los niveles de 0.05% de Fe-75Si, ya que en las piezas de este experimento se obtuvo un porcentaje en peso de magnesio por arriba del 0.05%, lo cual promovió la formación de carburos. En la tabla 5 se muestra la incorporación del Mg en porcentaje para cada probeta utilizando Fe-75%Si o Fe-64%-4.5%Ba como inoculantes. El cálculo se efectuó haciendo una regla de tres, de la siguiente manera:

$$0.045\% \text{ Mg } \text{ ó } 2.45\% \text{ Si } - 100\%$$

$$\text{Porcentaje de Mg ó Si en probeta} - x (\%)$$

$$x (\%) = \frac{\text{Porcentaje de Mg en probeta} \cdot 100\%}{0.045\%} \dots (4)$$

$$x (\%) = \frac{\text{Porcentaje de Si en probeta} \cdot 100\%}{2.45\%} \dots (5)$$

Nivel de postinoculación (%)	Probeta	Magnesio en análisis químicos (%)	
		Fe-75%Si	Fe-64%Si-4.5%Ba
0.05	M1	>100	65.56
	M2	>100	70.67
	M3	>100	63.33
0.15	M1	81.33	-
	M2	96.89	61.56
	M3	91.78	61.11
0.25	M1	86.89	76.00
	M2	83.56	75.56
	M3	81.78	74.44
0.35	M1	>100	>100
	M2	84.89	>100
	M3	83.78	>100
0.45	M1	73.78	81.33
	M2	75.56	>100
	M3	71.11	>100

Tabla 5. Incorporación de magnesio en las probetas de hierro nodular fabricado.

En este mismo sentido, otro de los elementos que sufrían variaciones en la composición química en el metal líquido dentro del horno de inducción fue el silicio (Si). Los inoculantes Fe-64%Si-4.5%Ba y Fe-75%Si contienen Si, por ende, tuvo que considerarse la inoculación temprana y postinoculación en el cálculo de la composición de silicio dentro del horno de inducción de tal forma que se mantuviera por debajo de 2.45% en peso; porcentaje que corresponde a la cantidad de silicio en un hierro nodular grado 120-90-02. Además, considerando también el nivel de postinoculación a efectuar (0.05, 0.15, 0.25, 0.35 o 0.45%) y con un valor constante de inoculación temprana de 0.1% en peso.

En la tabla 6 se muestra la incorporación del silicio mediante la adición del inoculante, en las probetas de hierro. Se calculó mediante la ecuación 5.

Nivel de postinoculación (%)	Probeta	Silicio en análisis químicos (%)	
		Fe-75%Si	Fe-64%Si-4.5%Ba
0.05	M1	95.184	100
	M2	91.429	100
	M3	91.918	100
0.15	M1	100	-
	M2	100	94.204
	M3	96.939	93.510
0.25	M1	100	96.816
	M2	100	97.020
	M3	100	98.041
0.35	M1	100	95.796
	M2	100	94.204
	M3	100	93.633
0.45	M1	99.143	100
	M2	94.694	100
	M3	94.082	98.776

Tabla 6. *Incorporación de silicio en las probetas de hierro nodular fabricado.*

4.5. Análisis térmico: curvas de enfriamiento.

En el apéndice C se observan las curvas de enfriamiento correspondientes a cada sección de las piezas fabricadas. Es conveniente mencionar que no todas las curvas se obtuvieron debido a distintos factores, algunos era el ruido excesivo que presentaban algunas curvas, desconexión del termopar, fuga en el molde de arena en verde. El uso de otros componentes eléctricos en el laboratorio generó ruido en el trazado de las curvas, además, se generó desplazamiento de

los termopares en los moldes y no hubo un contacto con el metal líquido y/o las fugas (molde M2 de la fusión 0.15% Fe-75%Si, M1 y M3 de la fusión 0.35% y en M2 en el nivel 0.45% Fe-75%Si).

Por ende fue necesario "limpiar" las curvas de enfriamiento mediante el uso de un software (Table Curve 2Dv.5.01). Desafortunadamente, en algunas curvas el ruido era excesivo y fueron eliminadas pues no representan con certeza la historia térmica de la sección correspondiente.

4.6. Caracterización metalográfica.

En el apéndice D se observan las fotografías de las microestructuras sin ataque capturadas en microscopio metalográfico con un aumento de 100x.

4.7. Análisis metalográfico.

Finalmente, en el apéndice E se muestran los resultados del análisis metalográfico. El análisis contempló el porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz, y presencia de carburos.

El gráfico 1 muestra la relación entre la densidad de nódulos y el nivel de postinoculación usando postinoculante Fe-75%Si. Para ello, se calculó un promedio de la densidad de nódulos por tamaño de sección y nivel de postinoculación.

En el gráfico 2, paralelamente, se muestra la relación entre la densidad de nódulos y el nivel de postinoculación usando postinoculante Fe-64%Si-4.5%Ba. También se calculó un promedio de la densidad de nódulos por tamaño de sección y nivel de postinoculación.

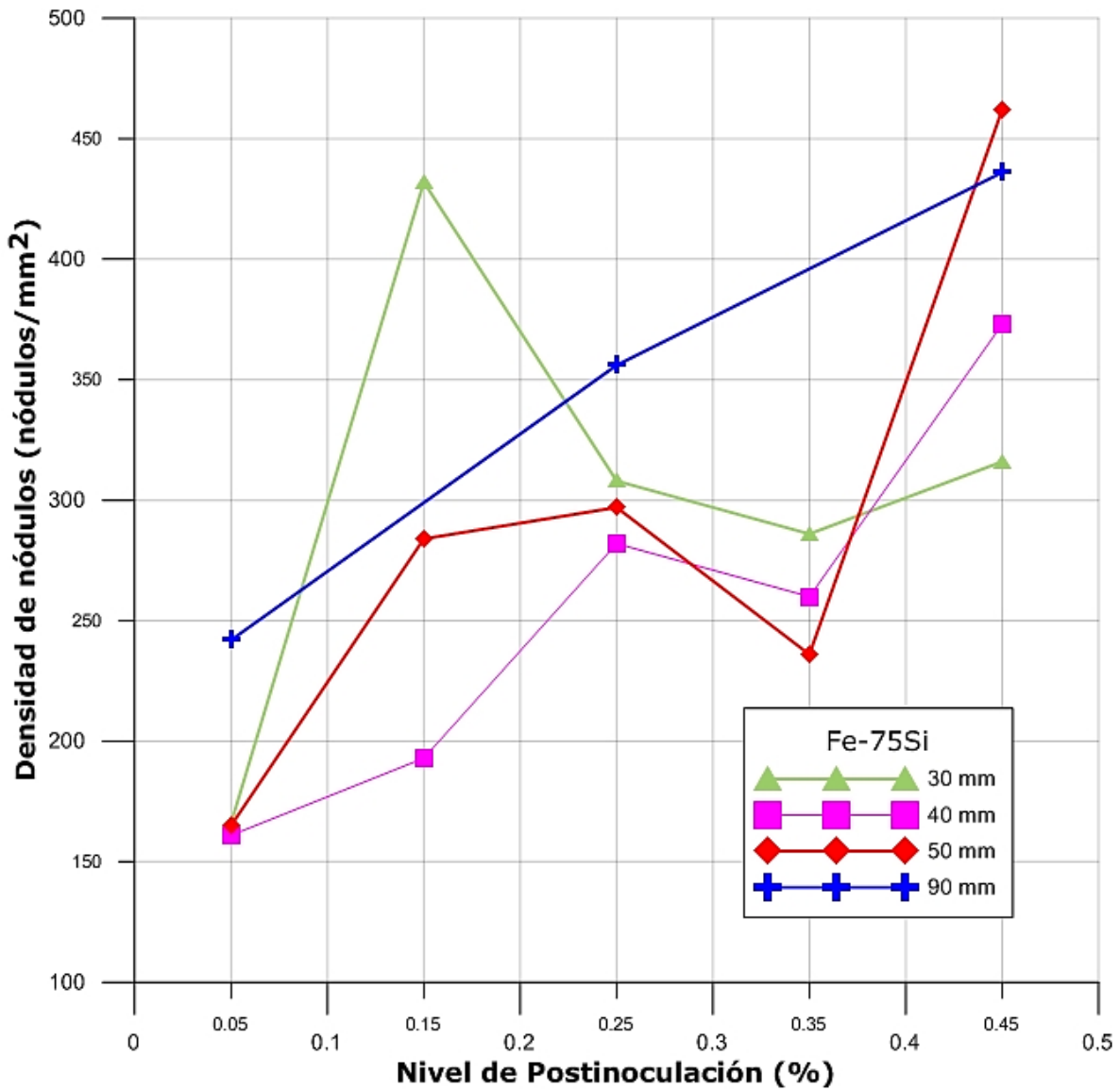


Gráfico 1. Relación entre la densidad de nódulos y el nivel de postinoculación para cada sección en las piezas automotrices fabricadas usando inoculante Fe-75%Si.

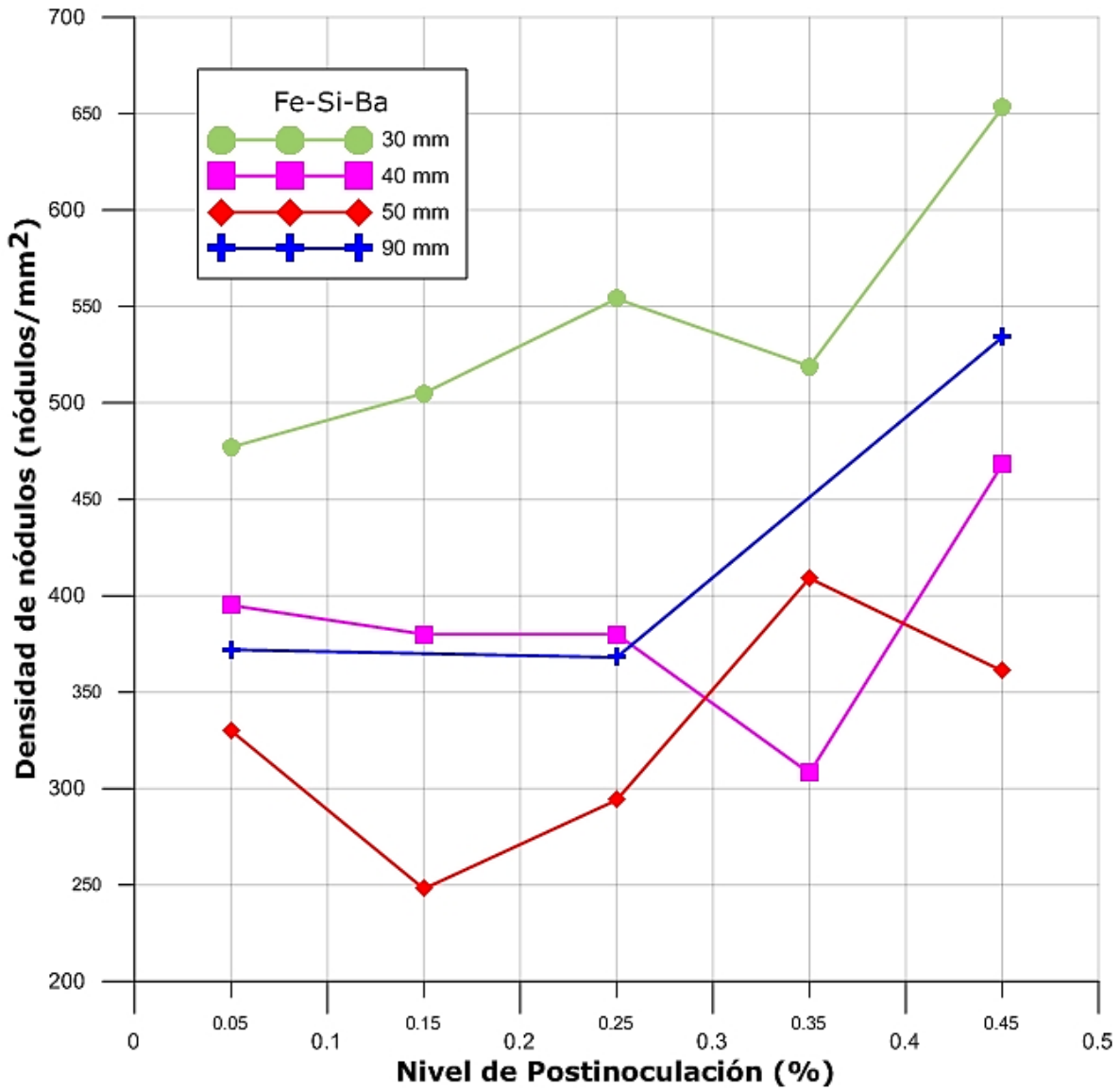


Gráfico 2. *Relación entre la densidad de nódulos y el nivel de postinoculación para cada sección en las piezas automotrices fabricadas usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.*

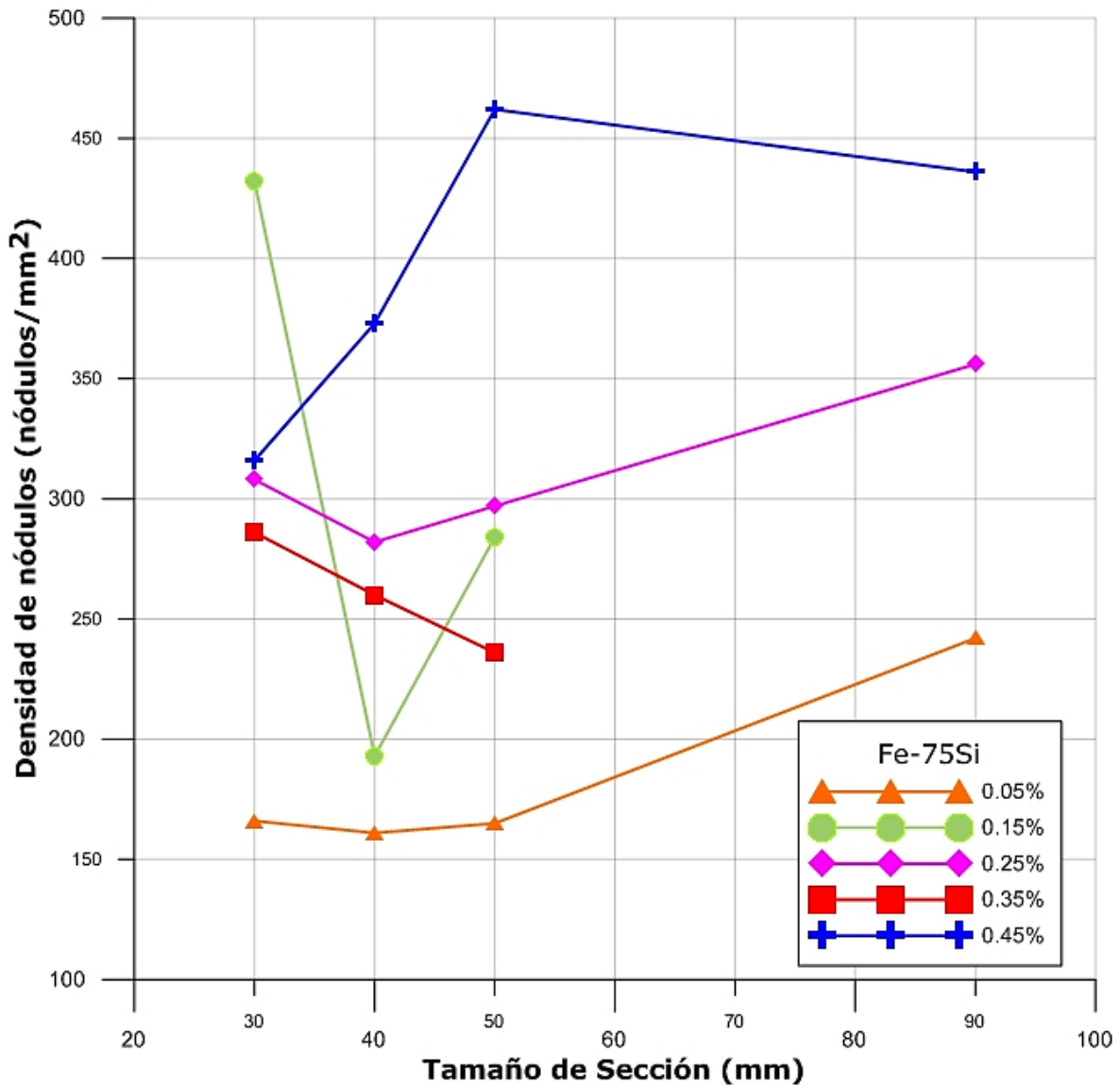


Gráfico 3. *Relación entre la densidad de nódulos y el tamaño de sección de las piezas automotrices fabricadas para cada nivel de postinoculación usando Fe-75%Si.*

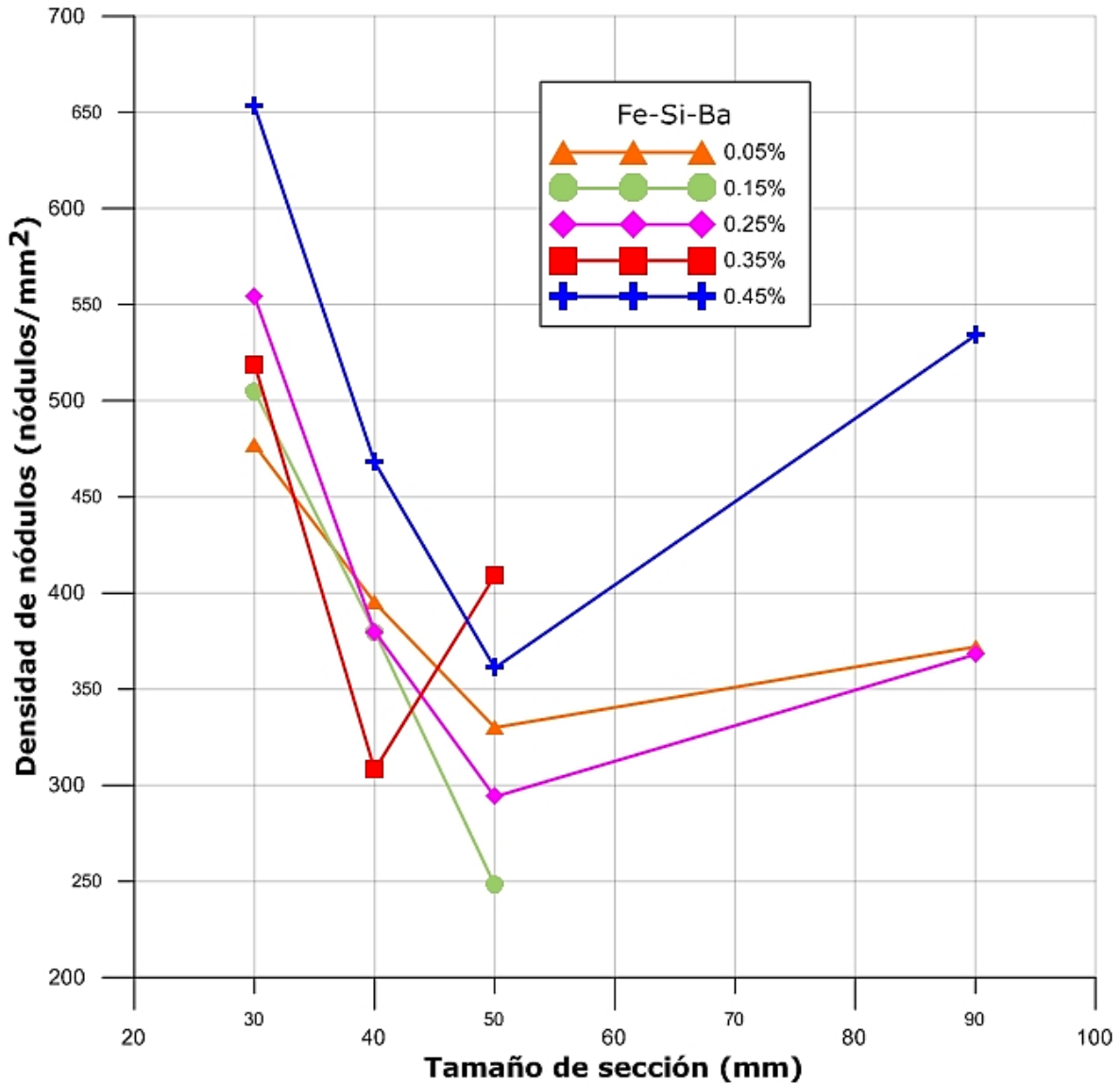


Gráfico 4. *Relación entre la densidad de nódulos y el tamaño de sección de las piezas automotrices fabricadas para cada nivel de postinoculación usando Fe-Si-Ba.*

En el gráfico 3, se observa la relación entre la densidad de nódulos y el tamaño de sección usando postinoculante Fe-75%Si. Se calculó un promedio de la densidad de nódulos por nivel de postinoculación y tamaño de sección.

En el gráfico 4, se muestra la relación entre la densidad de nódulos y el tamaño de sección usando postinoculante Fe-64%Si-4.5%Ba. También se calculó un promedio de la densidad de nódulos por nivel de postinoculación y tamaño de sección.

5. Análisis de Resultados

Las variables que se manejaron en los experimentos fueron: tipo de inoculante, nivel de inoculante, temperatura de colada y tamaño de sección.

5.1. Instrumentación.

La funcionalidad de los moldes permanentes de cobre fue eficiente, además de que soportaron el contacto con el hierro líquido a altas temperaturas sin que se registrara daño en ellos por lo cual se reutilizaron en todos los experimentos.

Como ya se había mencionado, hubo fallas en el módulo postinoculador. El vapor de agua expedido por la arena de moldeo producido por las altas temperaturas causó humedad en el canal de suministro del inoculante del módulo postinoculador y supuso su rediseño para evitar dicha falla. Se aumentó la altura del dispositivo para evitar el contacto directo con la radiación del metal líquido y en cada cambio de molde se inyectó aire a presión para liberar los conductos del módulo postinoculador.

5.2. Composición química del hierro nodular 120-90-02.

La composición del carbono en la mayoría de los casos está dentro de composición. Comparando el análisis químico del metal líquido en el horno de inducción y el metal líquido en la olla de tratamiento, en algunas fusiones la concentración de carbono disminuyó con el tiempo, esto se debió a la reacción exotérmica del Fe-Si-Mg (nodularizante), provocando la oxidación del carbono.

La cantidad agregada de Mg en el proceso del sándwich fue calculado de acuerdo a una eficiencia del 45% en todos los casos, y el magnesio

recuperado indica que la adición de este elemento, generalmente, fue eficiente, como se observa en la tabla 5. La incorporación del Mg fue en promedio de 92% y 87% usando Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba, respectivamente. Esto quiere decir que el Mg cumplió su papel de formador de grafito esferoidal.

En las piezas fabricadas utilizando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba se puede observar que el valor de carbono equivalente es relativamente inferior a la transformación eutéctica (4.3% C), en otras palabras, hierro hipoeutéctico, con un 4.1% y 4.15% en C.E. Dichas fusiones con un nivel de postinoculación de 0.35% y 0.15%, respectivamente, presentan una densidad de nódulos relativamente baja ya que presentan el nivel más bajo de incorporación de inoculante, como se observa en la tabla 2. Por otro lado, las fusiones con un nivel de postinoculación de 0.05%, 0.25% y 0.45% con inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba presentan una mayor densidad de nódulos; el carbono equivalente de estas pruebas es mayor o igual a 4.3%, es decir, se trata de hierro hipereutéctico. Paralelamente, en el caso de los experimentos utilizando Fe-75%Si como inoculante se promovió una mayor densidad de nódulos en las fusiones correspondientes al nivel de postinoculación de 0.35 y 0.45%, que presentan una transformación hipereutéctica. Sin embargo, el nivel de postinoculación más bajo (0.05%) también sufrió una transformación hipereutéctica y muestra una densidad de nódulos inferior a 200 nódulos/mm², esto se debe a la baja eficiencia de silicio (inoculación) en estos experimentos.

5.3. Análisis estadístico.

Se llevó a cabo un análisis estadístico de diseños factoriales [26] en el cual se pueden considerar n variables, que requiere un número de replicaciones igual a 2^n . En este proyecto se consideraron cuatro

variables A, B, C y D. El número de posibles combinaciones es 16 ($2^4 = 16$). Estas variables son:

- A. Temperatura de colada.
- B. Nivel de postinoculación.
- C. Tamaño de sección.
- D. Tipo de inoculante.

El objetivo del análisis estadístico fue reconocer el efecto de cada variable identificada sobre una respuesta, en otras palabras, hacer uso de un valor alto y un valor bajo para cada una de las variables y obtener un resultado sobre el efecto de la densidad de nódulos. Para conocer la influencia de las principales variables en los experimentos se usó la siguiente tabla o matriz de diseño estadístico.

Experimento	Combinación de Factores				Valor del Factor
	A	B	C	D	
1	-	-	-	-	X_1
2	+	-	-	-	X_2
3	-	+	-	-	X_3
4	+	+	-	-	X_4
5	-	-	+	-	X_5
6	+	-	+	-	X_6
7	-	+	+	-	X_7
8	+	+	+	-	X_8
9	-	-	-	+	X_9
10	+	-	-	+	X_{10}
11	-	+	-	+	X_{11}
12	+	+	-	+	X_{12}
13	-	-	+	+	X_{13}
14	+	-	+	+	X_{14}
15	-	+	+	+	X_{15}
16	+	+	+	+	X_{16}

Tabla 7. Matriz de diseño estadístico para conocer el efecto de las variables de experimentación.

En la tabla 8 se muestran las condiciones de los experimentos para el análisis estadístico y su respectiva densidad de nódulos.

Experi mento No.	Temperatur a de colada (°C)	Nivel Postinocul ación (%)	Tamaño de sección (mm)	Tipo de Inocula nte	Densidad de nódulos (nódulos/mm²)
1	1324	0.05	30	Fe-75Si	158
2	1400	0.05	30	Fe-75Si	142
3	1304	0.45	30	Fe-75Si	316
4	1377	0.45	30	Fe-75Si	392
5	1324	0.05	50	Fe-75Si	165
6	1384	0.05	50	Fe-75Si	136
7	1304	0.45	50	Fe-75Si	455
8	1377	0.45	50	Fe-75Si	434
9	1320	0.05	30	Fe-Si-Ba	479
10	1375	0.05	30	Fe-Si-Ba	428
11	1326	0.45	30	Fe-Si-Ba	736
12	1383	0.45	30	Fe-Si-Ba	568
13	1320	0.05	50	Fe-Si-Ba	344
14	1375	0.05	50	Fe-Si-Ba	316
15	1326	0.45	50	Fe-Si-Ba	332
16	1383	0.45	50	Fe-Si-Ba	384

Tabla 8. *Condiciones de los experimentos para análisis estadístico.*

El método de análisis estadístico relaciona el valor de la densidad de nódulos con el valor negativo o positivo de cada experimento, hace una suma considerando las dieciséis pruebas y un promedio final. El valor obtenido es el efecto sobre la densidad de nódulos de cada variable.

El efecto de cada variable sobre la densidad de nódulos puede verificarse en la tabla 9. La interpretación de la tabla sugiere que al incrementar cada variable se reduce (números negativos) o aumenta (números positivos) la densidad de nódulos.

Variable(s)	Efecto sobre densidad de nódulos (nódulos/mm²)
T _{colada}	-23.125
Nivel de Postinoculación	181.125
Tamaño de sección	-81.625
Tipo de inoculante	173.625
T _{colada} y Nivel de postinoculación	7.875
T _{colada} y tamaño de sección	16.625
T _{colada} y tipo de inoculante	-25.625
Nivel de Postinoculación y Tamaño de sección	-20.125
Nivel de postinoculación y Tipo de inoculante	-67.875
Tamaño de sección y tipo de inoculante	-127.125

Tabla 9. Efecto de las variables de experimentación sobre la densidad de nódulos.

Las variables que más impacto tienen sobre la densidad de nódulos son el nivel de postinoculación seguido del tipo de inoculante. Al aumentar el nivel de postinoculación (0.45%) se incrementan aproximadamente 181 nódulos por milímetro cuadrado; mientras tanto al utilizar Fe-64%Si-4.5%Ba como inoculante se incrementan 173 nódulos/mm² de grafito en el hierro dúctil.

Es valioso mencionar que se produce el efecto contrario al aumentar el diámetro de la sección. Cuando se incrementa el tamaño de la sección hasta 50mm decrece la densidad de nódulos sobre el hierro dúctil en 81 nódulos/mm².

Por otro lado, la temperatura de colada no influye en gran medida sobre la densidad de nódulos; incrementar la temperatura de colada, sólo disminuye 23 nódulos/mm².

El efecto combinado del tamaño de sección y el tipo de inoculante indica que cuanto más grande sea el diámetro de la sección del hierro nodular, usando Fe-64%Si-4.5%Ba, se reducen 127 nódulos/mm².

5.4. Inoculación y postinoculación.

El espectrómetro de emisión atómica no cuenta con el canal de bario para registrar la cantidad de bario en el hierro fabricado, por lo tanto, la verificación de la incorporación del inoculante mediante análisis químico se determinó por la cantidad de silicio incorporado en los piñones.

Se pudo observar una diferencia de composición principalmente en el silicio, ya que durante el tratamiento con Fe-Si-Mg en la olla este aportó una gran cantidad de Si, existiendo una diferencia de composición a lo alto de la olla de tratamiento, debido a este efecto la composición de cada probeta varía del molde T_{c1} al T_{c3} (la temperatura más alta a la más baja) en la misma fusión. Determinar esta variación reveló la necesidad de obtener una probeta en la olla de tratamiento antes de vaciar en el molde de arena y de esta manera cuantificar correctamente la incorporación del inoculante durante la postinoculación y la composición química en general. En la tabla 6 se puede observar la alta eficiencia del Si en ambos tipos de inoculantes. La eficiencia promedio

es mayor al 100% usando Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba, respectivamente. Esto significa que el Si sufrió una segregación en la olla de tratamiento, pero se promovió la grafitización durante la solidificación correctamente, es decir, se produjo el aumento en la densidad de nódulos.

El nivel de postinoculación de 0.45%, en ambos inoculantes, presenta la mayor densidad de nódulos con 736 nódulos/mm² con un diámetro de 30mm en el caso del inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba; se presentó una densidad de nódulos de 496 nódulos/mm² en un diámetro de 50mm usando Fe-75%Si. La producción más baja de nódulos de grafito se presenta en las piezas fabricadas con los niveles 0.15% y 0.05% para Fe-64%Si-4.5%Ba y Fe-75%Si respectivamente, con 232 nódulos/m² y 104 nódulos/mm² para Fe-64%Si-4.5%Ba y Fe-75%Si correspondientemente. Se manifiesta, por ende, una mayor producción de grafito esferoidal con los niveles altos de postinoculación (véase gráficos 1 y 2). Los puntos altos en la densidad de nódulos con bajo nivel de inoculación tardía corresponden a eficiencia de inoculación (eficiencia de Si) relativamente altos.

Esto quiere decir que la densidad de nódulos en el hierro nodular crece proporcionalmente con la cantidad de postinoculante utilizando Fe-75%Si y Fe-64%Si-4.5%Ba.

Asimismo el tamaño de nódulo es pequeño, del orden de entre 6 y 7, por lo tanto se esperaría que las propiedades mecánicas de los piñones fueran homogéneas (ya que no se realizaron pruebas mecánicas), pues no existe una variación grande en el tamaño del esferoide de grafito.

5.5. Tamaño de sección.

Evidentemente, el enfriamiento en las secciones delgadas (30mm y 40mm) se llevó a cabo más rápido respecto a las secciones gruesas (50mm y 90mm). Esto puede observarse en las curvas de enfriamiento. En los gráficos 3 y 4 se muestra que la solidificación en un menor tiempo produce una mayor densidad de nódulos. Este efecto es consistente con las teorías de nucleación y crecimiento. Los fundamentos de estas teorías indican que cuando aumenta el tiempo de solidificación, la cantidad de núcleos estables que crecerán disminuye.

El tamaño de sección influye en menor proporción la producción final de nódulos de grafito en el hierro y se puede apreciar en la tabla 9 junto con los gráficos 3 y 4 en donde los puntos altos de densidad de nódulos con un bajo nivel de inoculación tardía se debe a la alta eficiencia del silicio y probablemente bario en la inoculación. Los diámetros pequeños de la pieza fabricada poseen un tiempo de solidificación más corto lo que produce una mayor densidad de nódulos. Ésta tendencia es visible en los experimentos usando Fe-64%Si-4.5%Ba, en el gráfico 4. La alta densidad de nódulos que se presenta en las secciones gruesas se debe a la alta incorporación de silicio y posiblemente bario en la inoculación.

5.6. Defectos microestructurales.

Al comparar el carbono equivalente (C.E.) en la tabla 2, se observa que para las secciones gruesas la temperatura de colada tiene que ser mayor a 1320°C para evitar deficiencias en la microestructura del hierro, más específicamente, evitar la presencia de flotación de grafito. La máxima temperatura de colada experimental para ésta fusión fue de 1400°C, lo cual es una temperatura inferior a la especificada y por lo tanto, la presencia de flotación de grafito es inminente.

La sección 1G tiene un valor de C.E igual a 4.43%, es un hierro hipereutético. Comúnmente, valores excesivos de C.E. producen flotación en el hierro nodular; además, la temperatura de colada es muy alta (1400°C) y debido a ello se originó la flotación de grafito. Se puede determinar que la temperatura óptima de colada está en un rango de entre 1320 y 1370°C de acuerdo tabla 2, considerando las secciones gruesas (50-90mm).

La microestructura correspondiente usando nivel de postinoculación de 0.45% con Fe-75%Si, figura 30, presentó flotación de grafito en la sección de 50mm con la temperatura de colada más alta (1384°C).

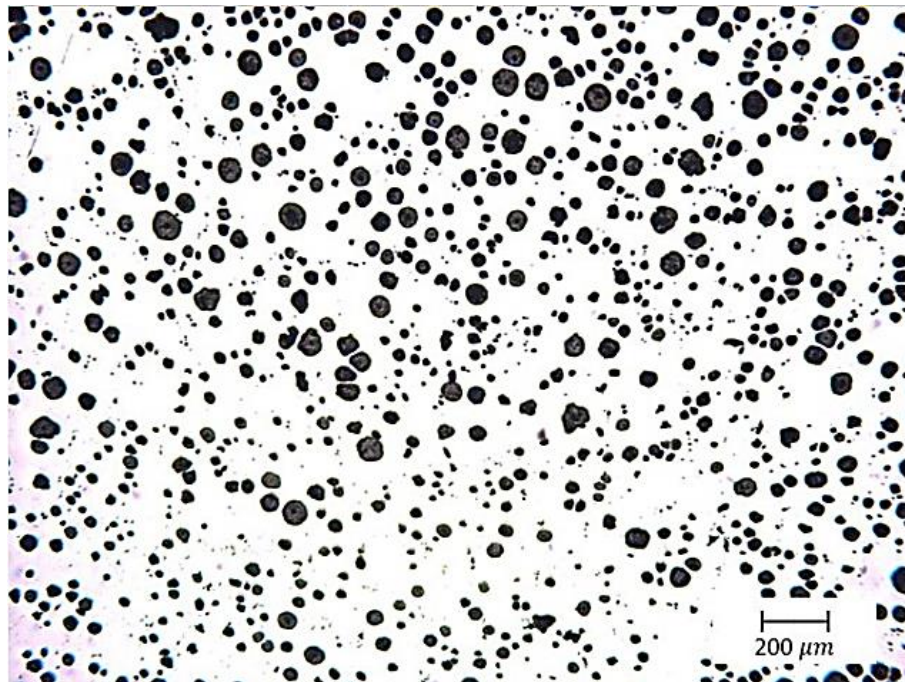


Figura 30. Flotación de grafito presente la parte superior de la pieza 5G: diámetro 50mm, temperatura de colada 1384°C y nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si. 100x.

En el intervalo de composición hipereutética, la primera fase formada durante la solidificación es grafito primario comenzando cerca de la

temperatura de liquidus y con crecimiento continuo hacia abajo para el comienzo de la temperatura de solidificación eutéctica. Al alcanzar un tamaño crítico, los esferoides de grafito flotaron en el hierro fundido en las regiones superiores de las piezas automotrices fabricadas.

El grafito *chunky* se produjo en los centros de la sección gruesa con diámetros superiores a 50mm (fig. 31). El exceso de silicio y probablemente la alta concentración de bario, produjo este defecto. El resultado de esta forma de grafito es que las propiedades en estas áreas defectuosas se reducen drásticamente.

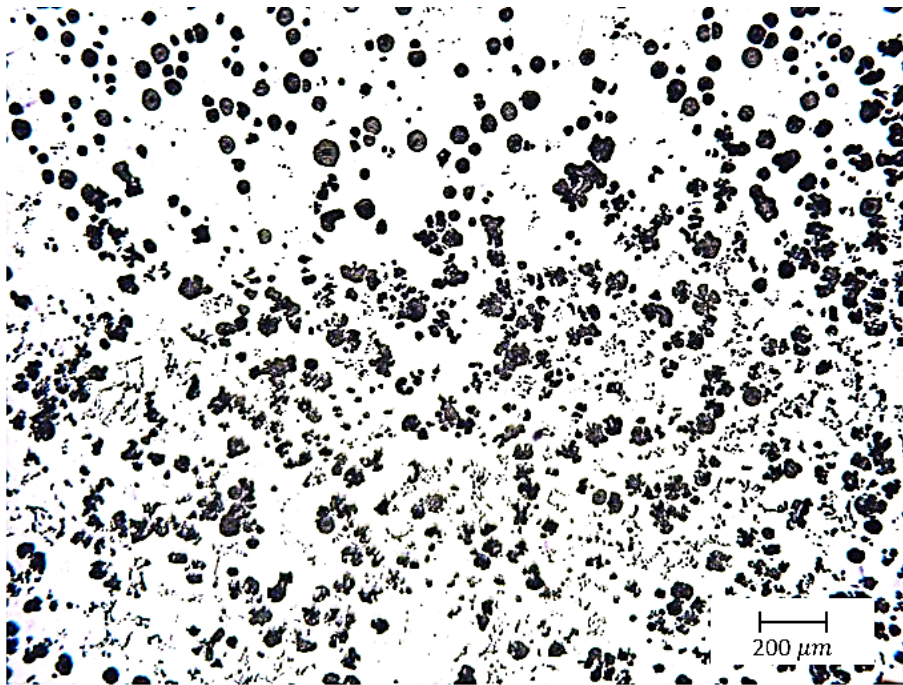


Figura 31. Grafito chunky presente en sección 50mm, temperatura de colada 1359°C y nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba. 100x.

Otro defecto encontrado en el hierro dúctil fue la formación de grafito explotado en las secciones 3A y 4F, como se muestra en la figura 33. Ambas secciones fueron inoculadas con Fe-75%Si y poseen una

temperatura de colada de 1390°C y 1304°C respectivamente. Asimismo tienen un valor de C.E. de 4.39% y 4.4% correspondientemente; lo que se traduce en un valor alto de carbono equivalente. Usualmente, C.E. excesivos provocan la presencia de carbono explotado. [27]

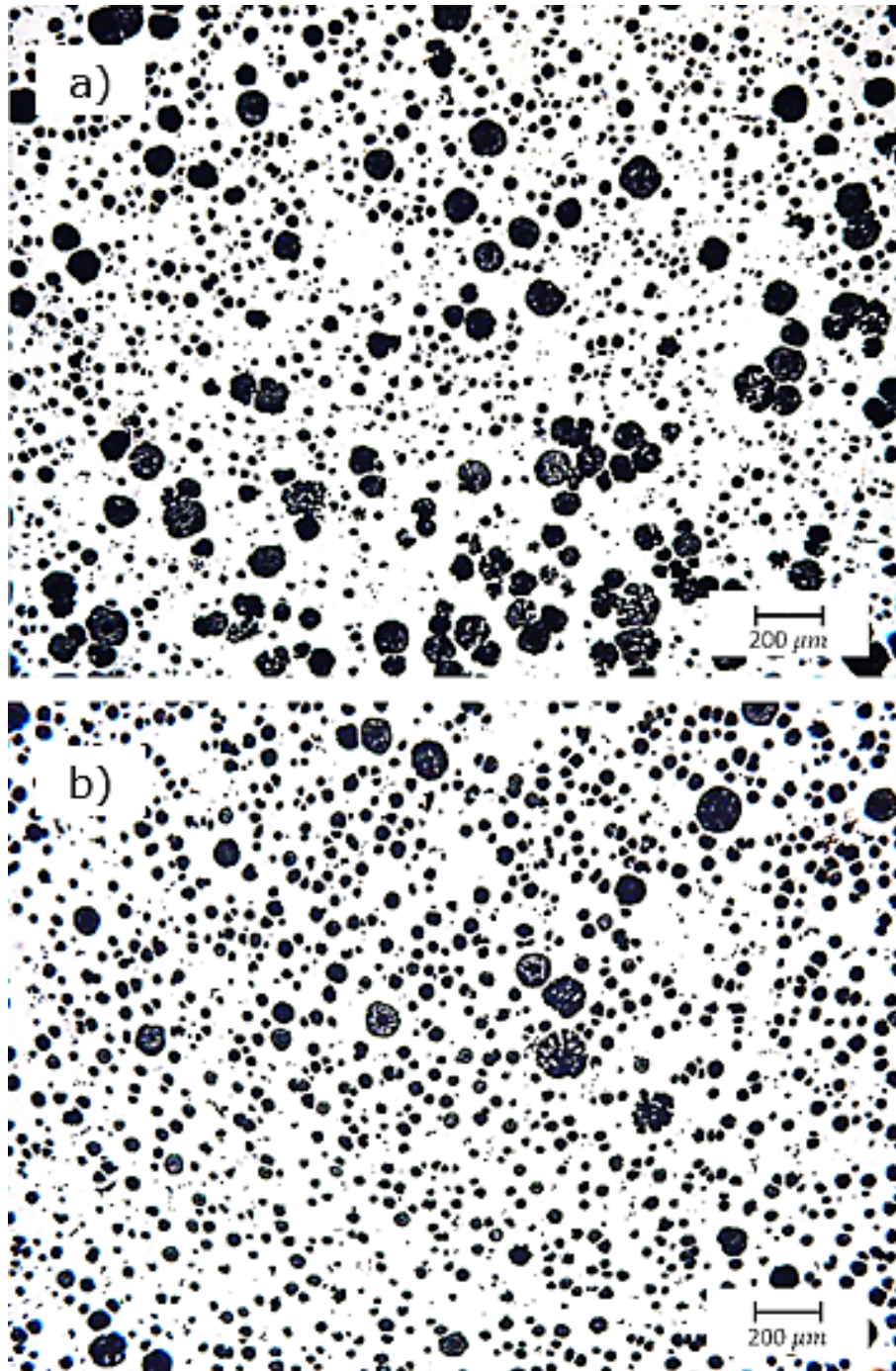


Figura 32. Grafito explotado presente en las secciones a) 1B: 30mm, $T_c=1390^\circ\text{C}$ y de postinoculación 0.25% Fe-75%Si y b) 1F: 40mm, $T_c= 1304^\circ\text{C}$ y nivel de postinoculación 0.35% Fe-75%Si. 100x.

El ataque con Nital 3 reveló la presencia de carburos en las secciones 1B y 1F, figura 33 y 34, respectivamente. En el caso de la sección 1B la curva de enfriamiento (apéndice C, gráfico 2C) muestra que la temperatura final de solidificación (TIS) se encuentra por debajo de la temperatura metaestable ($T_{Metaestable}$). En la sección 1F, cuya curva de enfriamiento se observa en el apéndice C, gráfico 5C; los puntos críticos TR (Temperatura de Recalescencia) y TFS (Temperatura Final de Solidificación) se encuentran debajo de la $T_{Metaestable}$.

Teóricamente, se establece que si alguna de las temperaturas características está por debajo de la temperatura metaestable el hierro presentará carburos.

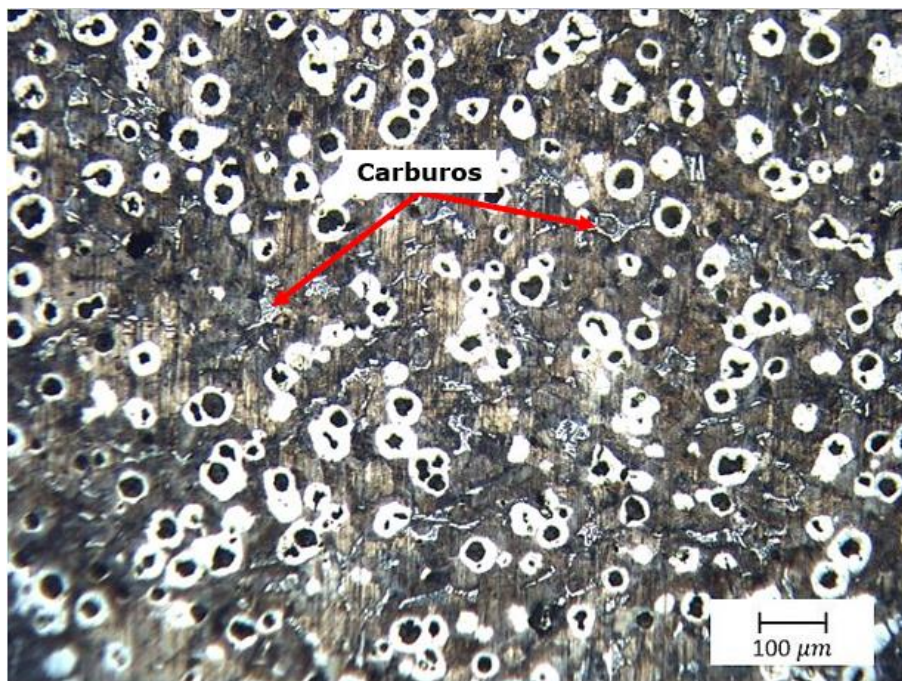


Figura 33. *Presencia de carburos en hierro dúctil fabricado. Sección 1B: Postinoculación de 0.05% Fe-75%Si, $T_c = 1352^\circ\text{C}$, diámetro 30mm. 200x. Ataque Nital 3.*

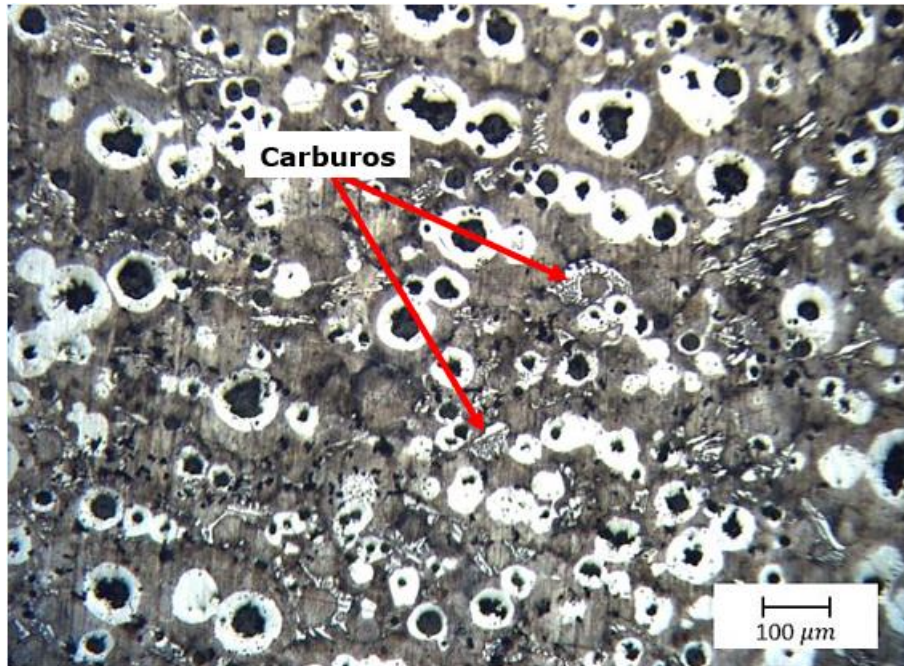


Figura 34. *Presencia de carburos en hierro dúctil fabricado. Sección 1F: Postinoculación de 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c = 1324^\circ\text{C}$, diámetro 40mm. 200x. Ataque Nital 3.*

Una metalografía con ataque representativa de piñon fabricado con hierro nodular 120-90-02 se observa en la figura 35 con su respectiva curva de enfriamiento en el gráfico 20C del apéndice C.

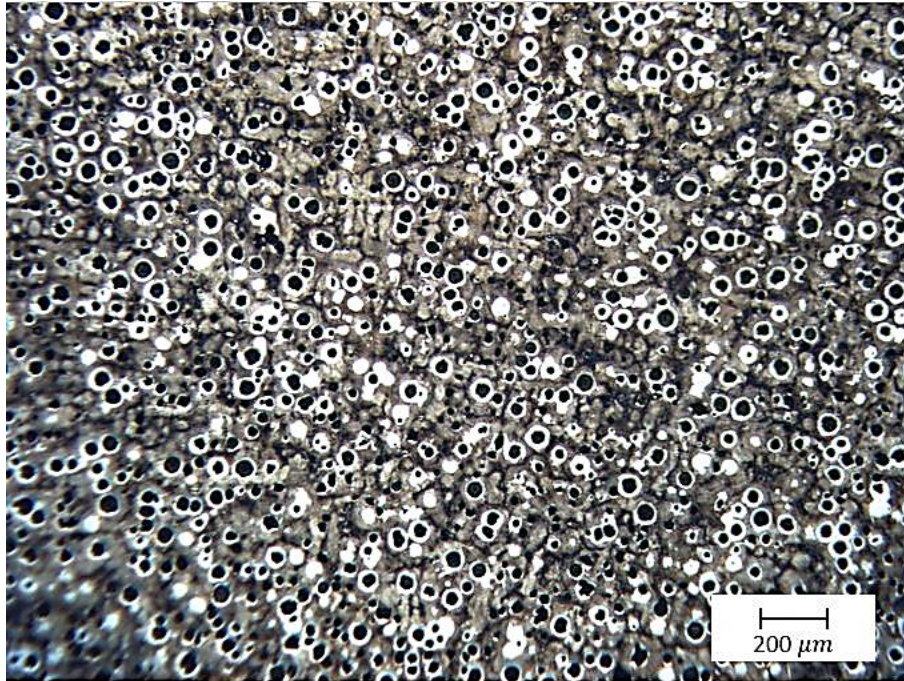


Figura 35. Metalografía con ataque. Sección 4A: Postinoculación de 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c = 1377^\circ\text{C}$, diámetro 30mm. 100x. Ataque Nital 3.

6. Conclusiones.

- a) Al usar Fe-64%Si-4.5%Ba con un nivel de postinoculación de 0.45% la densidad de nódulos es de más de 736 nódulos/mm². La mayor densidad de nódulos usando Fe-75%Si se produce con un nivel de postinoculación de 0.45%, con más de 496 nódulos/mm². Por lo tanto, el principal promotor de aumento en la densidad de nódulos es el nivel de inoculación.
- b) El análisis estadístico reveló que el principal promotor de densidad de nódulos es el nivel de inoculación. El aumento en el nivel de inoculación incrementa 181 nódulos/mm².
- c) Al usar el inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba, la densidad de nódulos crece en mayor magnitud respecto a la densidad de nódulos producida por el inoculante convencional Fe-75%Si. El inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba produjo 174 nódulos/mm² más que el Fe-75%Si.
- d) El análisis estadístico mostró que el inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba produce mayor densidad de nódulos que el inoculante Fe-75%Si.
- e) El bario produce una mayor cantidad de densidad de nódulos al estabilizar los centros de nucleación en tiempos de solidificación altos, es decir, en secciones gruesas.
- f) Los tamaños delgados de sección (30mm y 40mm) produjeron mayor densidad de nódulos por el corto tiempo de solidificación que se produjo respecto a las secciones gruesas (50mm y 90mm).
- g) El análisis estadístico indicó que el aumento de diámetro en la sección de los piñones reduce 82 nódulos/mm².
- h) Cuando la temperatura de colada se incrementa, la densidad de nódulos de grafito disminuye. Esto viene asociado al menor tiempo de solidificación que permite crear más centros de nucleación.

- i) El análisis estadístico mostró que un aumento en la temperatura de colada disminuye escasamente la densidad de nódulos (23 nódulos/mm²).
- j) La transformación hipereutéctica permitió que la primera fase en solidificarse fuera el grafito, lo que, evidentemente, produjo una mayor densidad de nódulos, independientemente del tamaño de sección. Por lo tanto, valores de C.E. superiores a 4.3% promovieron una mayor densidad de nódulos. Sin embargo, altos valores C.E. propiciaron la formación de defectos en el hierro nodular; particularmente en las secciones de gruesas (50 y 90mm).

APÉNDICE A

- **Nomenclatura asignada a cada sección de los piñones fabricados.
Tablas 1A y 2A.**
- **Tiempos y temperaturas de colada en experimentación.
Tablas 3A y 4A.**

APÉNDICE A. Nomenclatura, temperatura y tiempo de colada.

Tabla 1A. Nomenclatura asignada a cada curva y sección de acuerdo al nivel de postinoculación y temperatura de colada (T_cX), para inoculante Fe-75%Si.

Inoculante	Porcentaje de postinoculación	Fusión No.	Temperatura de colada	Sección 30mm	Sección 40mm	Sección 50mm	Sección 90mm
Fe-75%Si	0.05%	1	T_{c1}	1A	1D*	1G	1J*
			T_{c2}	1B	1E	1H	1K*
			T_{c3}	1C	1F	1I	1L
	0.15%	2	T_{c1}	2A	2D	2G	2J
			T_{c2}	2B	2E	2H*	2K
			T_{c3}	2C	2F*	2I	2L
	0.25%	3	T_{c1}	3A*	3D*	3G*	3J*
			T_{c2}	3B*	3E*	3H*	3K*
			T_{c3}	3C*	3F*	3I*	3L*
	0.35%	4	T_{c1}	4A	4D	4G	4J*
			T_{c2}	4B*	4E	4H	4K
			T_{c3}	4C	4F	4I	4L*
	0.45%	5	T_{c1}	5A	5D	5G	5J*
			T_{c2}	5B	5E	5H	5K*
			T_{c3}	5C*	5F	5I	5L

*La curva de enfriamiento respectiva no se reporta.

APÉNDICE A. Nomenclatura, temperatura y tiempo de colada.

Tabla 2A. Nomenclatura asignada a cada curva y sección de acuerdo al nivel de postinoculación y temperatura de colada (T_cX), para inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

Inoculante	Porcentaje de postinoculación	Fusión No.	Temperatura de colada	Sección 30mm	Sección 40mm	Sección 50mm	Sección 90mm
Fe-64%Si-4.5%Ba	0.05%	6	T _c 1	6A*	6D	6G	6J
			T _c 2	6B*	6E	6H	6K*
			T _c 3	6C*	6F*	6I*	6L
	0.15%	7	T _c 1	7A*	7D*	7G*	7J*
			T _c 2	7B*	7E*	7H*	7K
			T _c 3	7C	7F	7I	7L
	0.25%	8	T _c 1	8A*	8D*	8G*	8J*
			T _c 2	8B*	8E*	8H*	8K*
			T _c 3	8C*	8F*	8I*	8L*
	0.35%	9	T _c 1	9A	9D	9G	9J*
			T _c 2	9B	9E	9H	9K
			T _c 3	9C	9F*	9I	9L*
	0.45%	10	T _c 1	10A	10D	10G	10J*
			T _c 2	10B	10E*	10H	10K*
			T _c 3	10C	10F	10I	10L

*La curva de enfriamiento respectiva no se reporta.

APÉNDICE A. Nomenclatura, temperatura y tiempo de colada.

Tabla 3A. Tiempos y temperaturas de colada para los experimentos usando inoculante Fe-75%Si.

Fe-75%Si			
Temperatura (T_{cX})	Nivel de postinoculación (Fe-75Si)	Tiempo de colada (s)	Temperatura de colada (°C)
T _{c1}	0.05%(w/o)	-	1400
T _{c2}		12.13	1352
T _{c3}		13	1324
T _{c1}	0.15%(w/o)	17.78	1384
T _{c2}		10.49	1369
T _{c3}		14.95	1345
T _{c1}	0.25%(w/o)	22.12	1390
T _{c2}		13.5	1365
T _{c3}		14.87	1352
T _{c1}	0.35%(w/o)	19.43	1377
T _{c2}		10.53	1321
T _{c3}		14.73	1304
T _{c1}	0.45%(w/o)	13.54	1384
T _{c2}		10.78	1378
T _{c3}		12.8	1360

APÉNDICE A. Nomenclatura, temperatura y tiempo de colada.

Tabla 4A. Tiempos y temperaturas de colada para los experimentos usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

Fe-64%Si-4.5%Ba			
Temperatura de colada (T_{cX})	Nivel de postinoculación (Fe-Si-Ba)	Tiempo de colada (s)	Temperatura de colada (°C)
T _{c1}	0.05%(w/o)	19.3	1375
T _{c2}		11.86	1356
T _{c3}		14.97	1320
T _{c1}	0.15%(w/o)	10.49	1387
T _{c2}		11.85	1364
T _{c3}		13.53	1324
T _{c1}	0.25%(w/o)	12.73	1385
T _{c2}		10.3	1367
T _{c3}		12.96	1353
T _{c1}	0.35%(w/o)	12.47	1383
T _{c2}		10.76	1355
T _{c3}		11.31	1326
T _{c1}	0.45%(w/o)	15.39	1388
T _{c2}		14.24	1359
T _{c3}		15.49	1330

APÉNDICE B

- **Análisis químicos de probetas en olla de tratamiento (CX) y en probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) usando inoculante Fe-75%Si.
Tablas 1B a 5B.**
- **Análisis químicos de probetas en olla de tratamiento (CX) y en probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.
Tablas 6B a 10B.**

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 1B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-75%Si.

0.05% Fe-75%Si						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	4.158	3.647	-	3.699	-	3.72
Si%	2.171	2.332	-	2.24	-	2.252
Mn%	0.4099	0.4468	-	0.446	-	0.4466
P%	0.0123	0.0117	-	0.0124	-	0.0128
S%	0.015	0.0103	-	0.0092	-	0.0097
Cr%	0.0489	0.0504	-	0.0507	-	0.0507
Mo%	0.05	0.05	-	0.05	-	0.05
Ni%	0.0198	0.0308	-	0.0302	-	0.0308
Al%	0.005	0.0095	-	0.0089	-	0.0082
Co%	0.005	0.005	-	0.005	-	0.005
Cu%	0.0469	0.0634	-	0.0621	-	0.0635
Nb%	0.0027	0.0054	-	0.0056	-	0.0057
Ti%	0.0063	0.0057	-	0.0056	-	0.0057
V%	0.0058	0.0055	-	0.0056	-	0.0055
Pb%	0.001	0.0019	-	0.002	-	0.0019
Mg%	0.0664	0.0514	-	0.056	-	0.056
Fe%	93	93.3	-	93.3	-	93.3
Temperatura Estable	-	1162.0834	-	1161.696	-	1161.7308
Temperatura Metaestable	-	1113.9275	-	1115.2792	-	1115.0862
Carbón Equivalente	4.89	4.43	-	4.45	-	4.47

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 2B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-75%Si.

0.15% Fe-75%Si						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.632	3.411	3.549	3.418	3.573	3.288
Si%	2.717	2.633	2.509	2.708	2.504	2.375
Mn%	0.536	0.526	0.519	0.529	0.528	0.52
P%	0.0164	0.0164	0.0154	0.0137	0.0144	0.0139
S%	0.0114	0.0117	0.0141	0.0094	0.0104	0.009
Cr%	0.0937	0.0904	0.088	0.092	0.0894	0.0913
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0549	0.0489	0.0465	0.0504	0.0469	0.0466
Al%	0.0108	0.0104	0.0111	0.0102	0.01	0.0102
Co%	0.006	0.005	0.005	0.0056	0.005	0.005
Cu%	0.3544	0.339	0.3244	0.3351	0.3316	0.3255
Nb%	0.0069	0.0059	0.0058	0.0063	0.0059	0.0056
Ti%	0.005	0.0053	0.0051	0.0051	0.005	0.0052
V%	0.0071	0.0075	0.0076	0.0063	0.0067	0.0059
Pb%	0.0022	0.0018	0.0019	0.0023	0.0017	0.002
Mg%	0.066	0.0366	0.0394	0.0436	0.0408	0.0413
Fe%	92.5	92.8	92.8	92.7	92.8	92.9
Temperatura Estable	-	1162.988	-	1163.363	-	1162.043
Temperatura Metaestable	-	1109.4762	-	1108.4601	-	1113.4207
Carbón Equivalente	4.54	4.29	4.39	4.33	4.41	4.08

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 3B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-75%Si.

0.25% Fe-75%Si						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.548	3.317	3.756	3.259	3.654	3.443
Si%	2.383	2.681	2.325	2.641	2.311	2.513
Mn%	0.528	0.525	0.544	0.523	0.534	0.523
P%	0.0128	0.0129	0.0149	0.0132	0.015	0.0134
S%	0.0086	0.0093	0.0091	0.0091	0.009	0.0092
Cr%	0.1153	0.1211	0.1162	0.1168	0.1158	0.1157
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0642	0.0638	0.0682	0.0617	0.0657	0.0616
Al%	0.0104	0.0119	0.0108	0.0114	0.0096	0.0105
Co%	0.006	0.0062	0.0061	0.0053	0.0053	0.005
Cu%	0.3173	0.3142	0.3301	0.3092	0.3254	0.3139
Nb%	0.0057	0.0058	0.0065	0.0055	0.0061	0.0057
Ti%	0.0047	0.005	0.0048	0.0052	0.0049	0.0051
V%	0.0053	0.0055	0.0062	0.0059	0.0061	0.0057
Pb%	0.0026	0.0028	0.0027	0.0023	0.0025	0.0024
Mg%	0.0384	0.0391	0.0387	0.0376	0.0355	0.0368
Fe%	92.9	92.9	92.7	93	92.9	92.9
Temperatura Estable	-	1163.287	-	1163.122	-	1162.604
Temperatura Metaestable	-	1108.8827	-	1109.4656	-	1111.3782
Carbón equivalente	4.35	4.21	4.54	4.14	4.43	4.29

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 4B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-75%Si.

0.35% Fe-75%Si						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.617	3.415	3.597	3.495	3.59	3.27
Si%	2.404	2.912	2.361	2.513	2.343	2.572
Mn%	0.543	0.536	0.541	0.537	0.54	0.533
P%	0.014	0.0137	0.0149	0.0144	0.0147	0.013
S%	0.0091	0.0087	0.0096	0.009	0.0094	0.0084
Cr%	0.0641	0.0654	0.0638	0.0641	0.0639	0.0646
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0386	0.0388	0.0383	0.0374	0.0377	0.0363
Al%	0.013	0.0153	0.0122	0.0121	0.0108	0.0122
Co%	0.0055	0.0059	0.0052	0.005	0.005	0.0051
Cu%	0.3388	0.3368	0.3411	0.3347	0.3402	0.3297
Nb%	0.0054	0.0053	0.0054	0.0052	0.0053	0.0046
Ti%	0.0048	0.0052	0.0049	0.0051	0.005	0.0052
V%	0.006	0.0059	0.0064	0.0061	0.0064	0.0058
Pb%	0.0024	0.0023	0.0021	0.0021	0.0022	0.0021
Mg%	0.0541	0.0483	0.0521	0.0382	0.0399	0.0377
Fe%	92.9	92.6	92.9	92.9	93	93.1
Temperatura Estable	-	1164.165	-	1162.546	-	1162.832
Temperatura Metaestable	-	1105.4211	-	1111.3832	-	1110.538
Carbón Equivalente	4.42	4.39	4.39	4.34	4.38	4.13

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 5B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-75%Si.

0.45% Fe-75%Si						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	-	3.614	3.759	3.622	3.699	3.652
Si%	-	2.429	2.185	2.32	2.135	2.305
Mn%	-	0.552	0.566	0.553	0.558	0.553
P%	-	0.0139	0.0145	0.0125	0.0139	0.0138
S%	-	0.0107	0.0102	0.0084	0.0092	0.0085
Cr%	-	0.0455	0.0459	0.0455	0.0456	0.046
Mo%	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	-	0.03	0.0319	0.0295	0.0293	0.0304
Al%	-	0.0116	0.0096	0.0098	0.0089	0.0093
Co%	-	0.0053	0.0057	0.0052	0.005	0.0052
Cu%	-	0.3275	0.3372	0.3279	0.3324	0.3323
Nb%	-	0.0059	0.0067	0.0057	0.006	0.006
Ti%	-	0.005	0.0048	0.0048	0.0048	0.005
V%	-	0.0065	0.0071	0.0061	0.0064	0.0062
Pb%	-	0.0018	0.0023	0.0023	0.002	0.0022
Mg%	-	0.0332	0.0367	0.034	0.034	0.032
Fe%	-	92.9	93	93	93.1	93
Temperatura Estable	-	1162.195	-	1161.799	-	1161.7
Temperatura Metaestable	-	1112.7067	-	1114.3965	-	1114.5734
Carbón Equivalente	-	4.43	4.49	4.40	4.42	4.42

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 6B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

0.05% Fe-64%Si-4.5%Ba						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.512	3.332	3.356	3.386	3.461	3.345
Si%	2.77	2.657	2.655	2.708	2.727	2.73
Mn%	0.568	0.56	0.569	0.564	0.574	0.565
P%	0.0126	0.0128	0.0149	0.0128	0.015	0.0126
S%	0.0098	0.0111	0.0124	0.0105	0.0137	0.01
Cr%	0.0821	0.08	0.082	0.0804	0.0828	0.0814
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0443	0.0394	0.0435	0.0404	0.0456	0.0419
Al%	0.0122	0.0126	0.0129	0.0131	0.0137	0.0119
Co%	0.0062	0.005	0.005	0.005	0.0059	0.0054
Cu%	0.0636	0.0585	0.063	0.0597	0.0652	0.0611
Nb%	0.0062	0.0053	0.0063	0.0056	0.0067	0.0059
Ti%	0.0045	0.0047	0.0049	0.0048	0.0051	0.0049
V%	0.0065	0.007	0.0072	0.0065	0.0074	0.0065
Pb%	0.0021	0.0016	0.002	0.0017	0.0019	0.0019
Mg%	0.0332	0.0295	0.0343	0.0318	0.0326	0.0285
Fe%	92.8	93.2	93.1	93.1	92.9	93.1
Temperatura Estable	-	1163.124	-	1163.32	-	1163.412
Temperatura Metaestable	-	1109.3514	-	1108.5984	-	1108.2788
Carbón Equivalente	4.44	4.22	4.25	4.29	4.38	4.26

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 7B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

0.15% Fe-64%Si-4.5%Ba						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.642	-	3.584	3.39	3.558	3.358
Si%	2.192	-	2.191	2.308	2.172	2.291
Mn%	0.554	-	0.533	0.564	0.556	0.558
P%	0.0152	-	0.0145	0.015	0.0147	0.015
S%	0.0094	-	0.0096	0.0093	0.0094	0.0097
Cr%	0.0495	-	0.0495	0.0496	0.0497	0.0495
Mo%	0.05	-	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0338	-	0.0329	0.0317	0.0332	0.0315
Al%	0.0109	-	0.0101	0.0111	0.0095	0.0106
Co%	0.0057	-	0.0055	0.005	0.0054	0.005
Cu%	0.3819	-	0.3785	0.376	0.3833	0.3756
Nb%	0.0072	-	0.0067	0.0065	0.007	0.0067
Ti%	0.0043	-	0.0044	0.0047	0.0045	0.0047
V%	0.0053	-	0.0052	0.0053	0.0053	0.0053
Pb%	0.0027	-	0.0027	0.0024	0.0029	0.0025
Mg%	0.0302	-	0.0268	0.0277	0.026	0.0275
Fe%	93	-	93.1	93.2	93.1	93.2
Temperatura Estable	-	-	-	1161.654	-	1161.598
Temperatura Metaestable	-	-	-	1114.517	-	1114.754
Carbón Equivalente	4.38	-	4.32	4.16	4.29	4.13

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 8B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

0.25% Fe-64%Si-4.5%Ba						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.66	3.593	3.633	3.569	3.666	3.658
Si%	2.259	2.372	2.24	2.377	2.261	2.402
Mn%	0.579	0.596	0.581	0.594	0.582	0.59
P%	0.0153	0.016	0.014	0.0152	0.0131	0.0123
S%	0.0116	0.0136	0.0101	0.0114	0.0091	0.0082
Cr%	0.0438	0.044	0.0439	0.0441	0.0442	0.0438
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0248	0.0296	0.0275	0.0295	0.0274	0.0279
Al%	0.0103	0.011	0.0103	0.0108	0.0103	0.0109
Co%	0.005	0.005	0.005	0.0052	0.005	0.0053
Cu%	0.3394	0.3396	0.3343	0.3354	0.3324	0.325
Nb%	0.0064	0.0069	0.0064	0.0069	0.0062	0.0062
Ti%	0.0048	0.0052	0.0048	0.0052	0.0048	0.005
V%	0.0072	0.0078	0.0065	0.0072	0.0062	0.0058
Pb%	0.0019	0.0023	0.0018	0.0023	0.002	0.0021
Mg%	0.0351	0.0342	0.036	0.034	0.0338	0.0335
Fe%	93	92.9	93	92.9	93	92.8
Temperatura Estable	-	1161.816	-	1161.864	-	1162.059
Temperatura Metaestable	-	1113.616	-	1113.5646	-	1113.2849
Carbón Equivalente	4.42	4.39	4.38	4.37	4.42	4.46

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 9B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

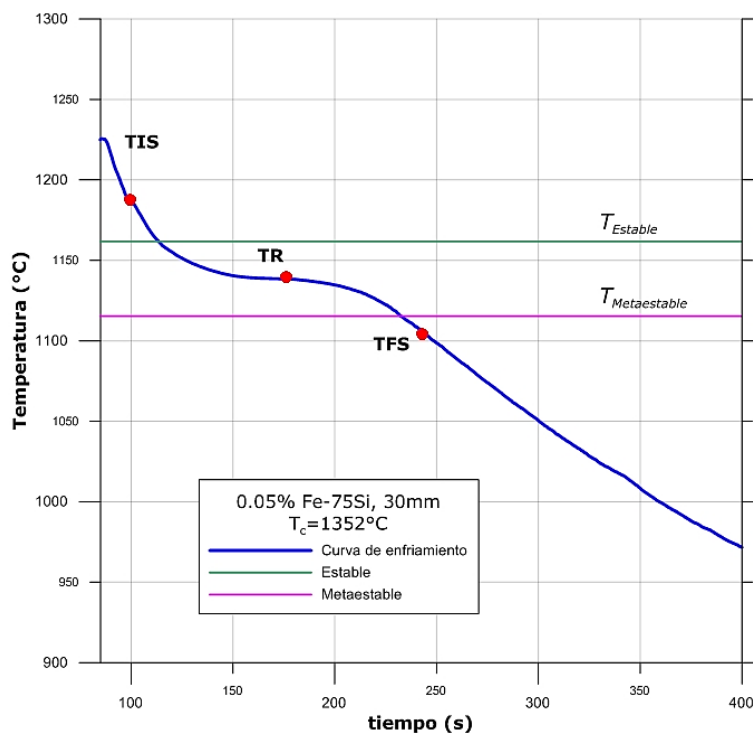
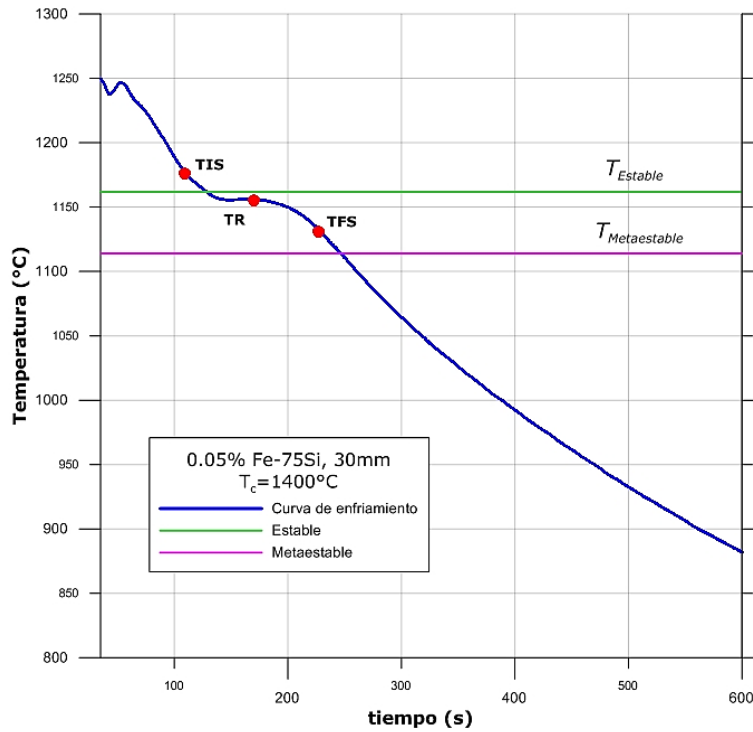
0.35% Fe-64%Si-4.5%Ba						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.684	3.338	3.658	3.422	3.568	3.228
Si%	2.182	2.347	2.21	2.308	2.209	2.294
Mn%	0.56	0.565	0.558	0.563	0.554	0.561
P%	0.0161	0.0139	0.0149	0.0134	0.0137	0.014
S%	0.0119	0.0086	0.009	0.0076	0.0077	0.0089
Cr%	0.0334	0.0331	0.0334	0.0329	0.0332	0.0333
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.0261	0.0239	0.0263	0.024	0.0249	0.0231
Al%	0.0118	0.0114	0.0114	0.0113	0.011	0.0112
Co%	0.005	0.005	0.0052	0.005	0.005	0.005
Cu%	0.3326	0.3177	0.3309	0.3177	0.3212	0.3142
Nb%	0.0064	0.0058	0.0065	0.0057	0.0058	0.0057
Ti%	0.0047	0.0049	0.0047	0.0049	0.0047	0.0052
V%	0.0057	0.005	0.0056	0.005	0.005	0.005
Pb%	0.0027	0.0024	0.0025	0.0024	0.0025	0.0023
Mg%	0.0689	0.0538	0.0611	0.0509	0.0539	0.0561
Fe%	93	93.2	93	93.2	93.2	93.4
Temperatura Estable	-	1161.841	-	1161.704	-	1161.634
Temperatura Metaestable	-	1113.9757	-	1114.5732	-	1114.755
Carbón Equivalente	4.42	4.12	4.40	4.20	4.31	4.00

APÉNDICE B. Análisis químicos.

Tabla 10B. Análisis químicos de probetas de piezas automotrices fabricadas en el molde (MX) y muestras de olla de tratamiento (CX), usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

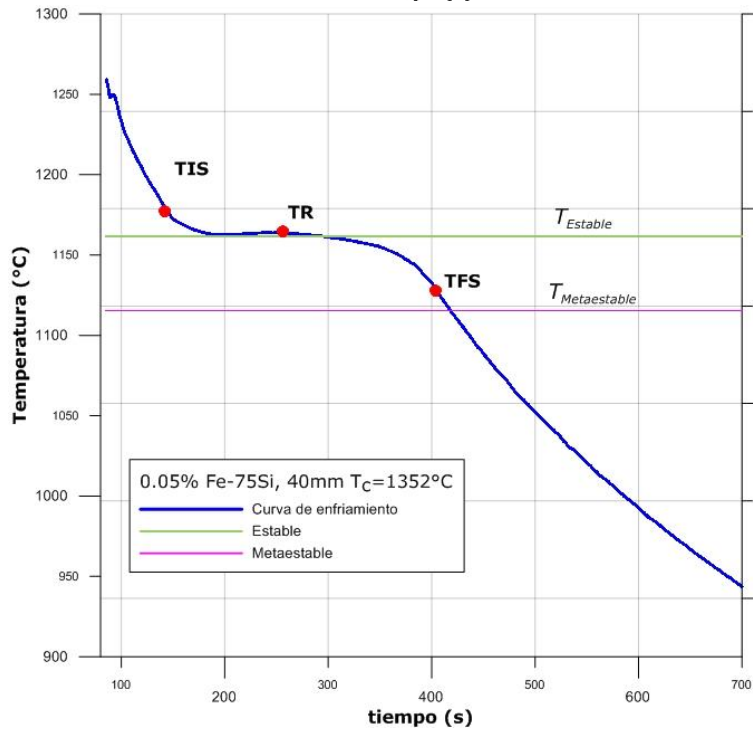
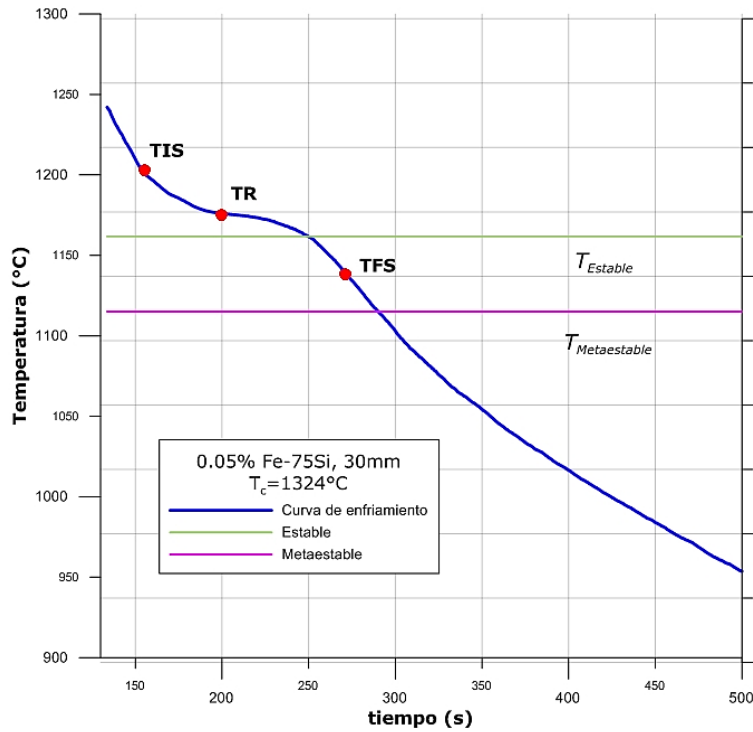
0.45% Fe-64%Si-4.5%Ba						
Elemento	C1	M1	C2	M2	C3	M3
C%	3.78	3.448	3.718	3.507	3.47	3.551
Si%	2.152	2.548	2.193	2.612	2.234	2.42
Mn%	0.582	0.585	0.575	0.59	0.565	0.578
P%	0.0133	0.0141	0.0124	0.0133	0.013	0.013
S%	0.0108	0.0127	0.0084	0.01	0.0086	0.0094
Cr%	0.0398	0.0401	0.0396	0.0399	0.0401	0.04
Mo%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ni%	0.027	0.0255	0.026	0.0255	0.0261	0.0254
Al%	0.012	0.012	0.0116	0.0128	0.0105	0.0114
Co%	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Cu%	0.3424	0.3293	0.3346	0.3297	0.3331	0.3292
Nb%	0.0062	0.0057	0.0057	0.0056	0.0058	0.0055
Ti%	0.0048	0.0054	0.0048	0.0054	0.0051	0.0053
V%	0.006	0.006	0.0056	0.0059	0.0059	0.0057
Pb%	0.0018	0.0017	0.0021	0.0018	0.0018	0.002
Mg%	0.0499	0.0775	0.0414	0.0628	0.0373	0.0499
Fe%	93	92.9	93	92.8	93.2	92.9
Temperatura Estable	-	1162.599	-	1162.869	-	1162.134
Temperatura Metaestable	-	1111.0133	-	1110.0979	-	1112.953
Carbón Equivalente	4.50	4.30	4.45	4.38	4.22	4.36

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



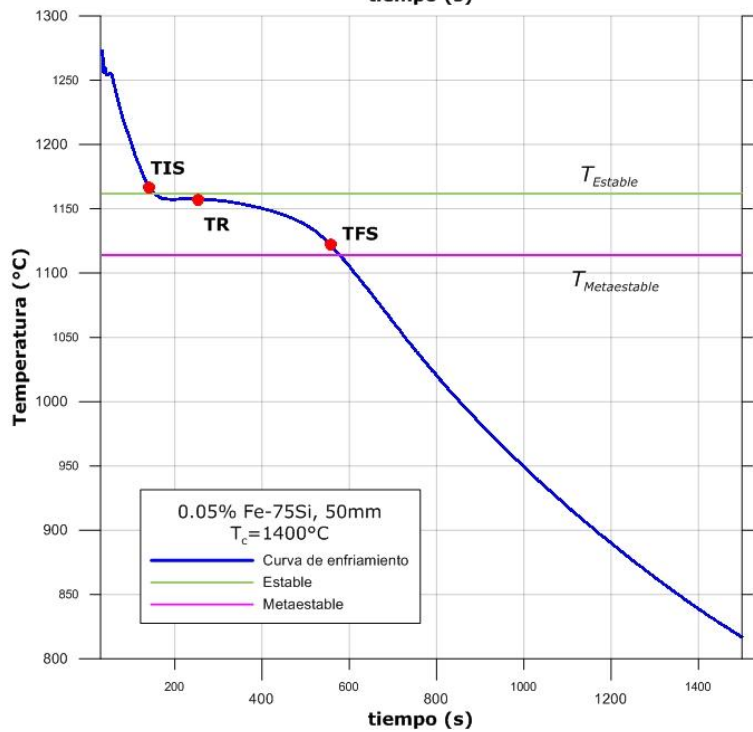
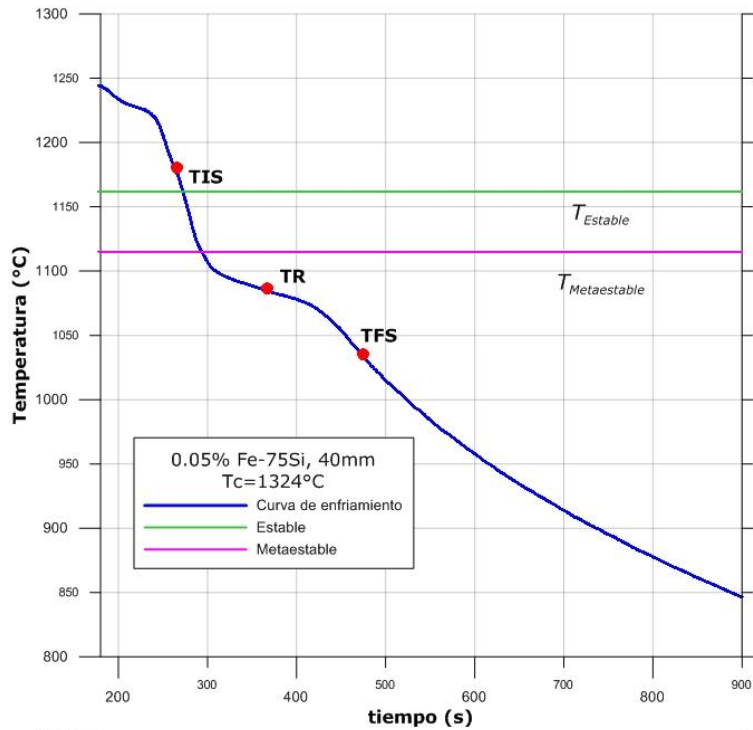
Gráficos 1C y 2C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 1A, (Arriba) y 1B (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



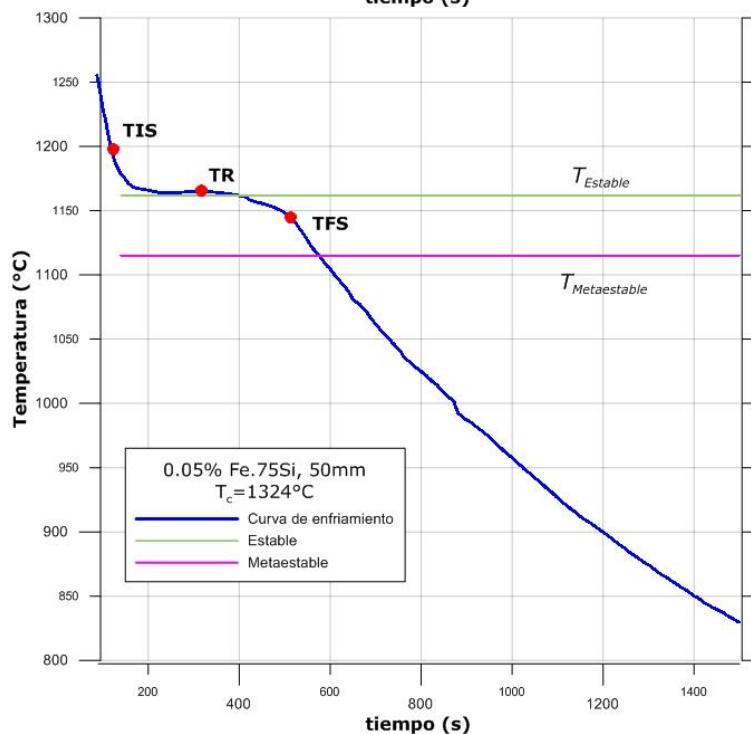
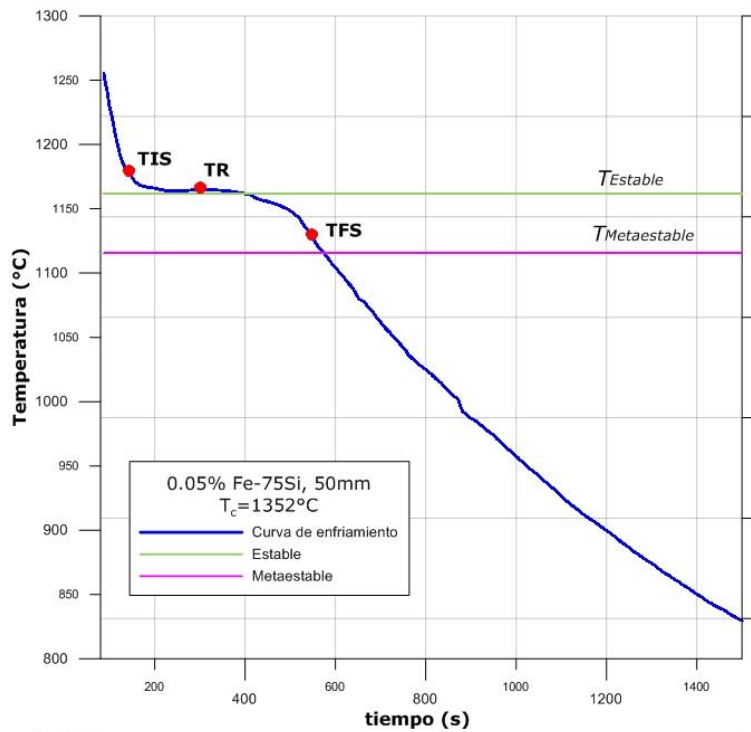
Gráficos 3C y 4C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 1C, (Arriba) y 1E (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalentamiento (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



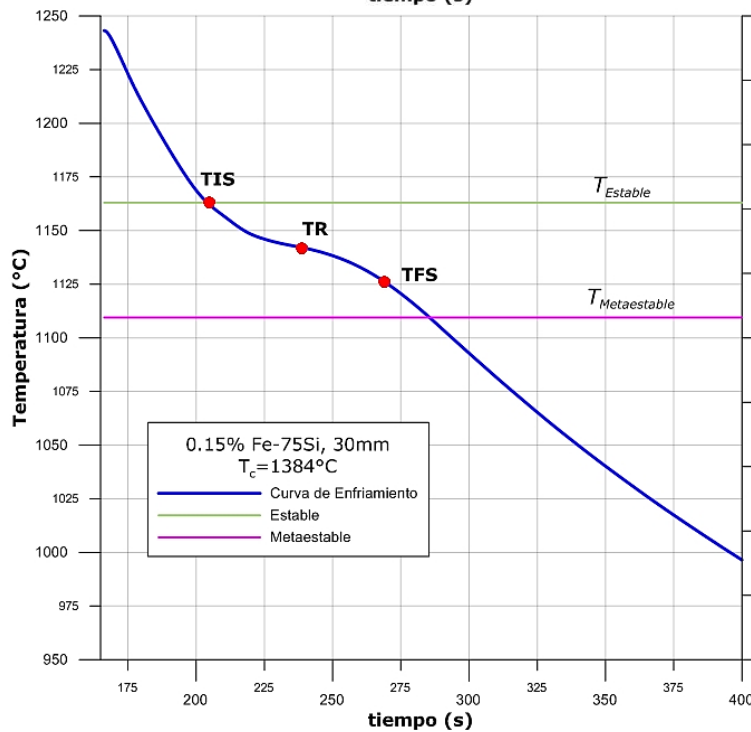
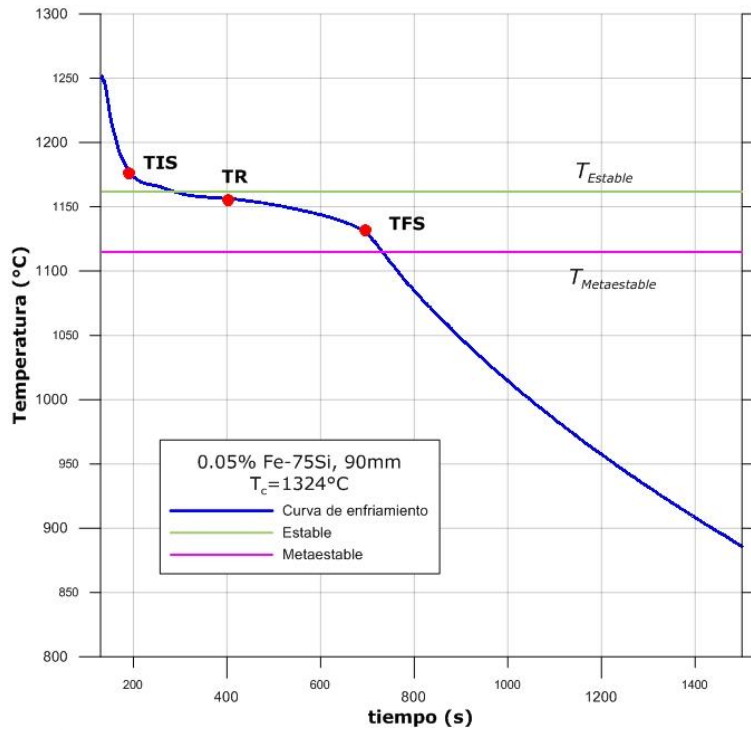
Gráficos 5C y 6C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 1F, (Arriba) y 1G (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalentamiento (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



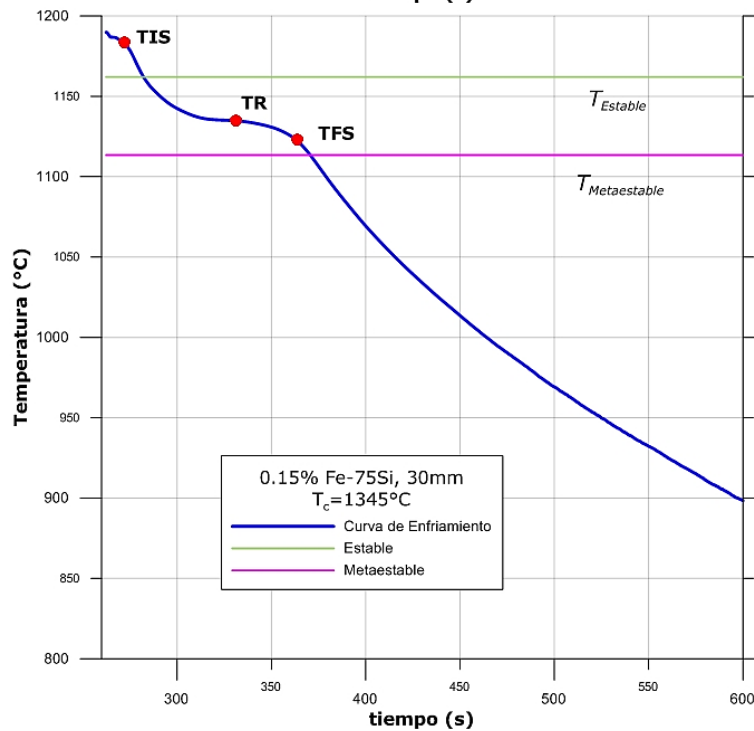
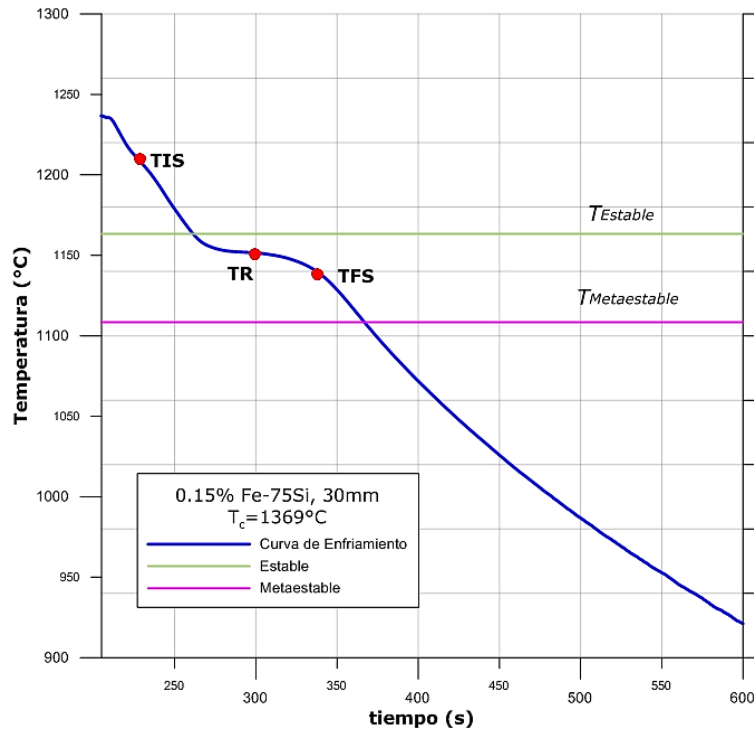
Gráficos 7C y 8C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 1H, (Arriba) y 1I (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



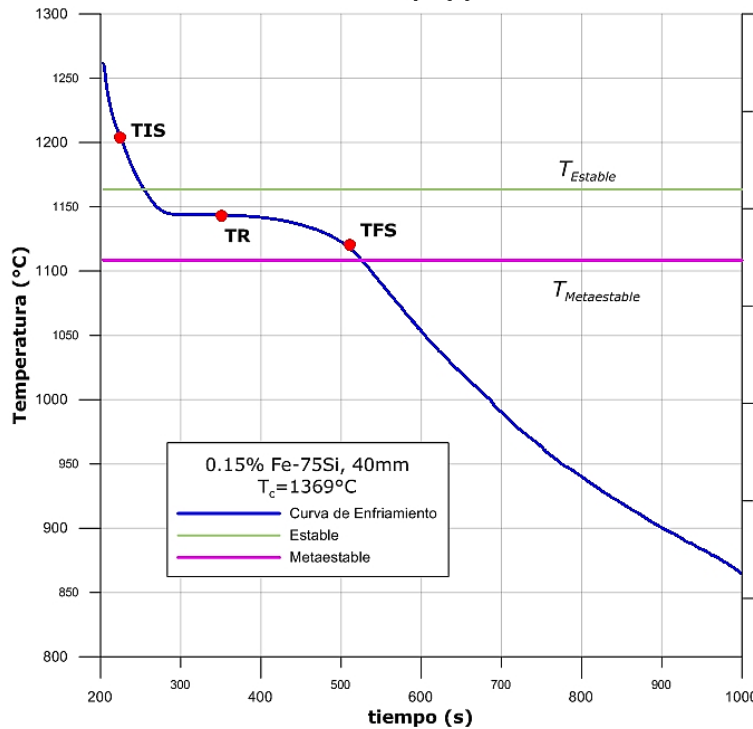
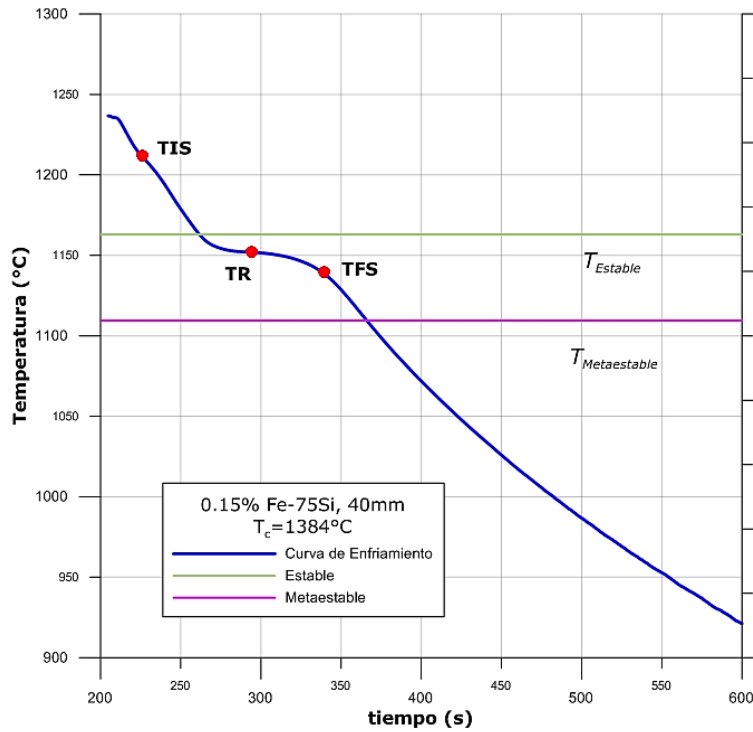
Gráficos 9C y 10C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 1L, (Arriba) y 2A (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



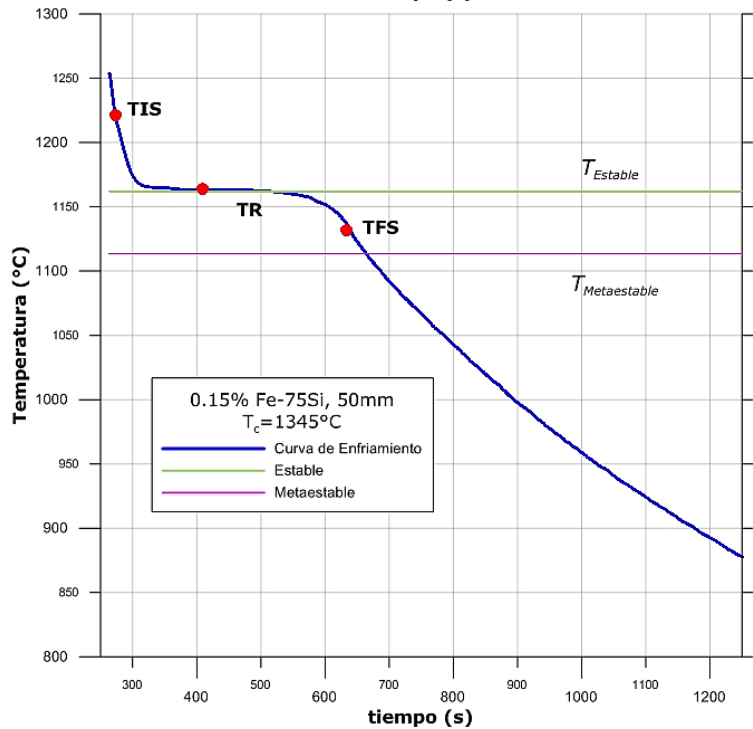
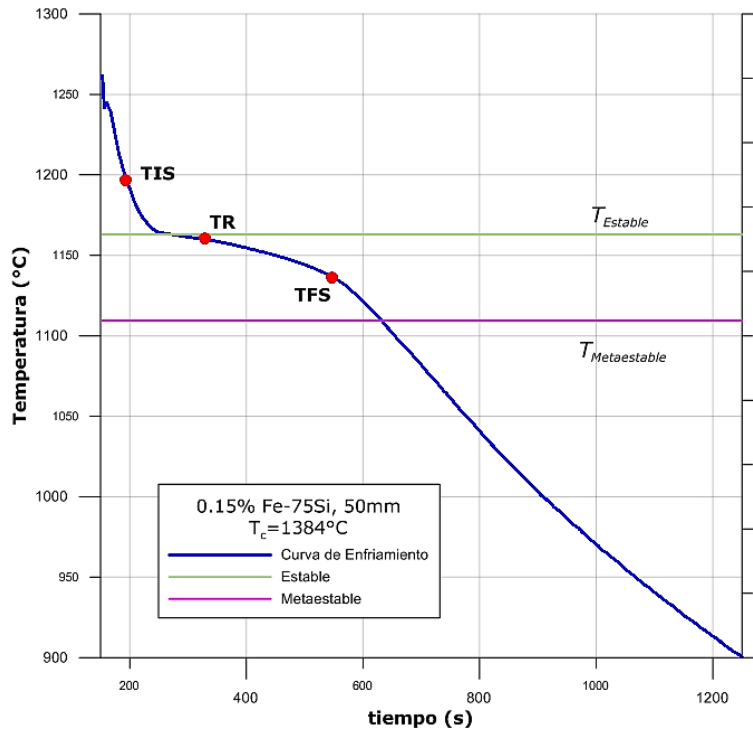
Gráficos 11C y 12C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 2B, (Arriba) y 2C (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



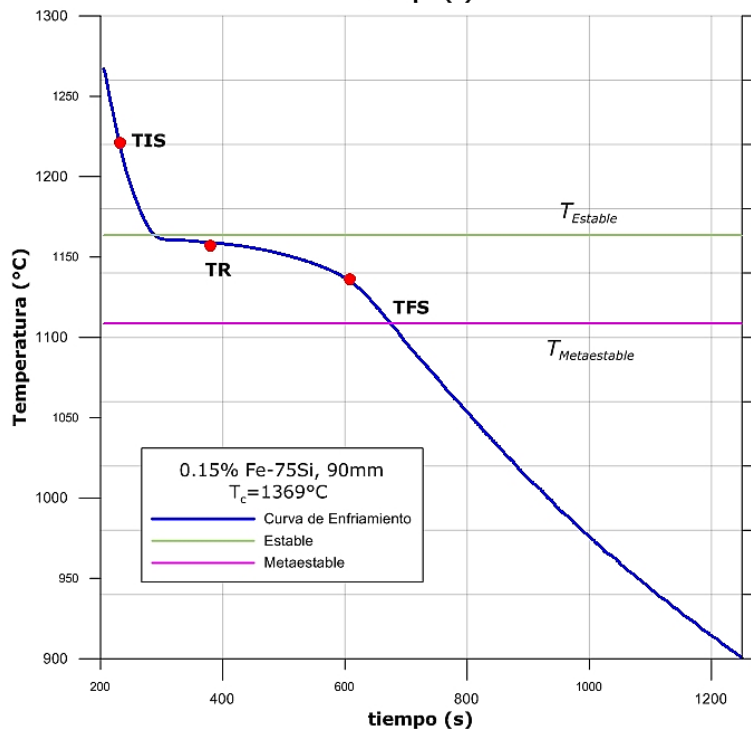
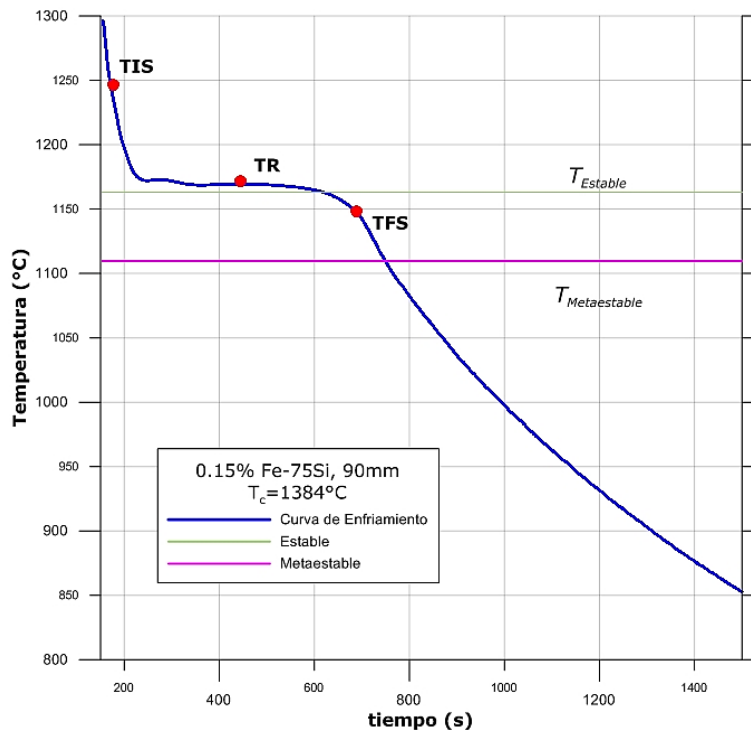
Gráficos 13C y 14C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 2D, (Arriba) y 2E (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



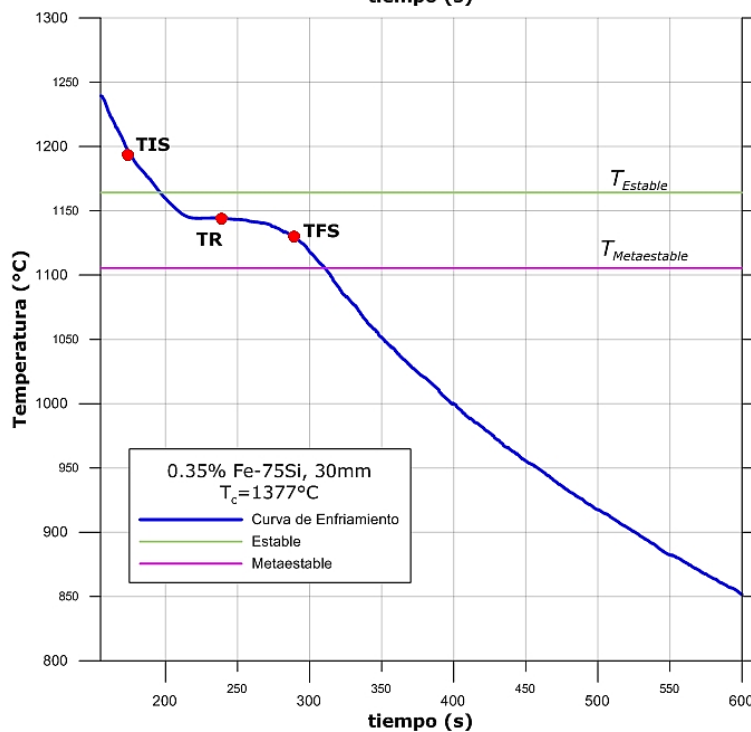
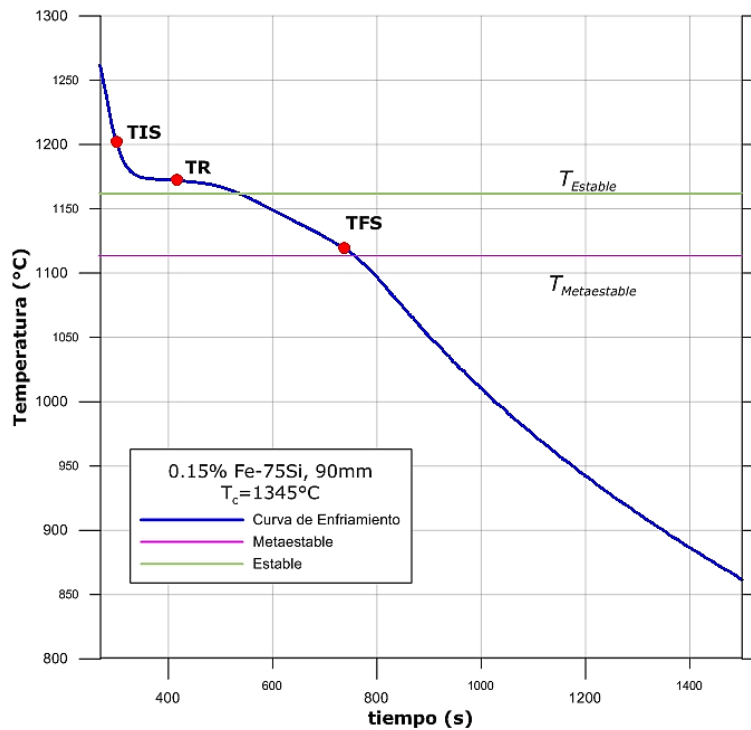
Gráficos 15C y 16C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 2G, (Arriba) y 2I (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



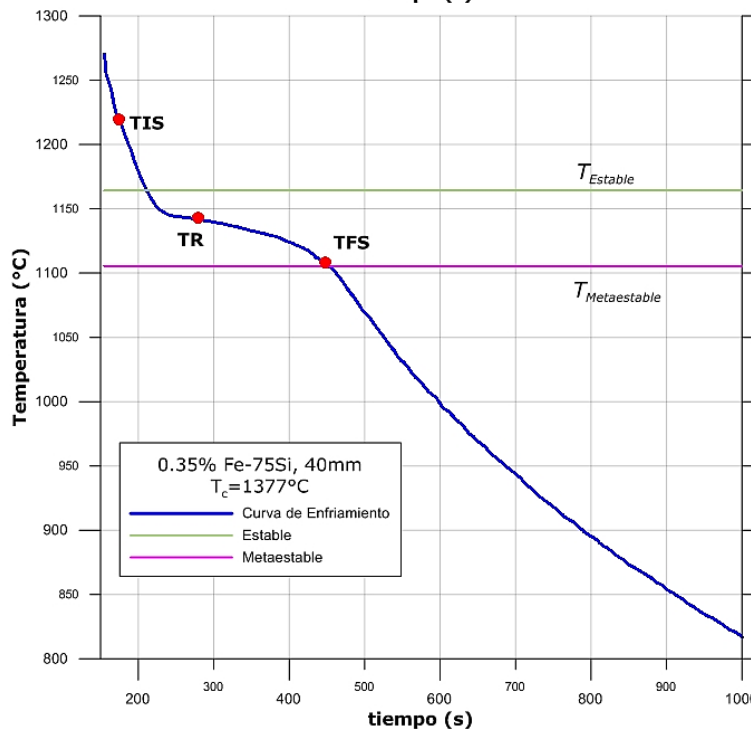
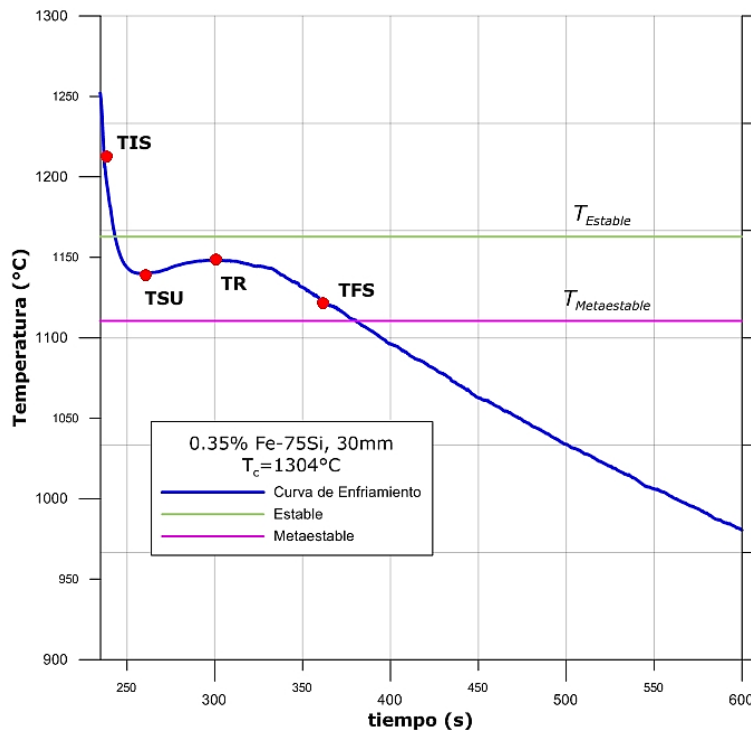
Gráficos 17C y 18C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 2J, (Arriba) y 2K (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



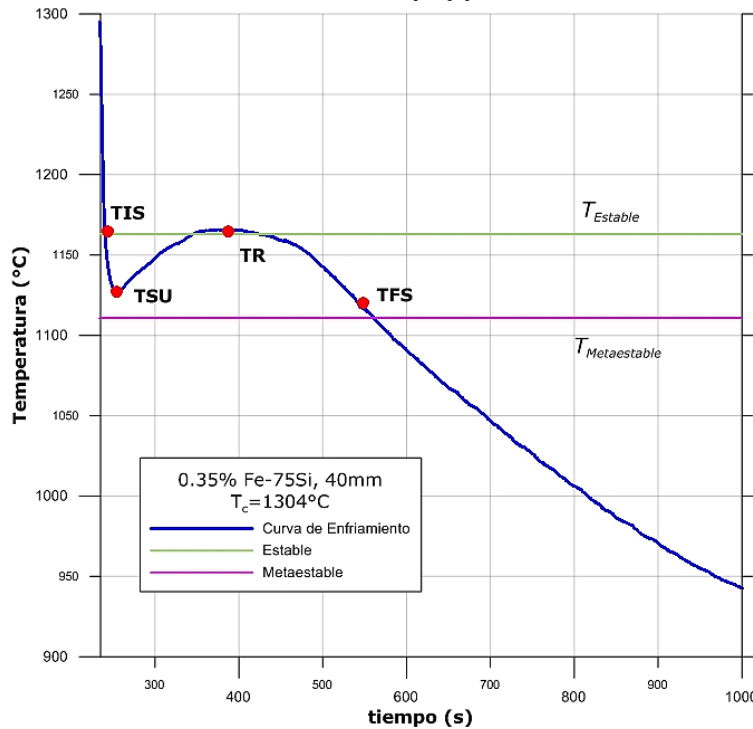
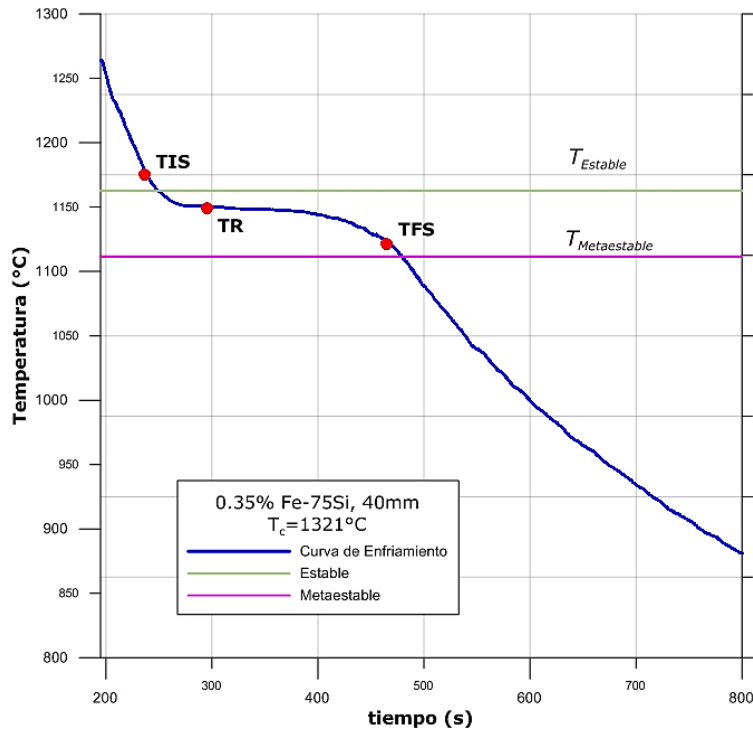
Gráficos 19C y 20C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 2L, (Arriba) y 4A (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalcancia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



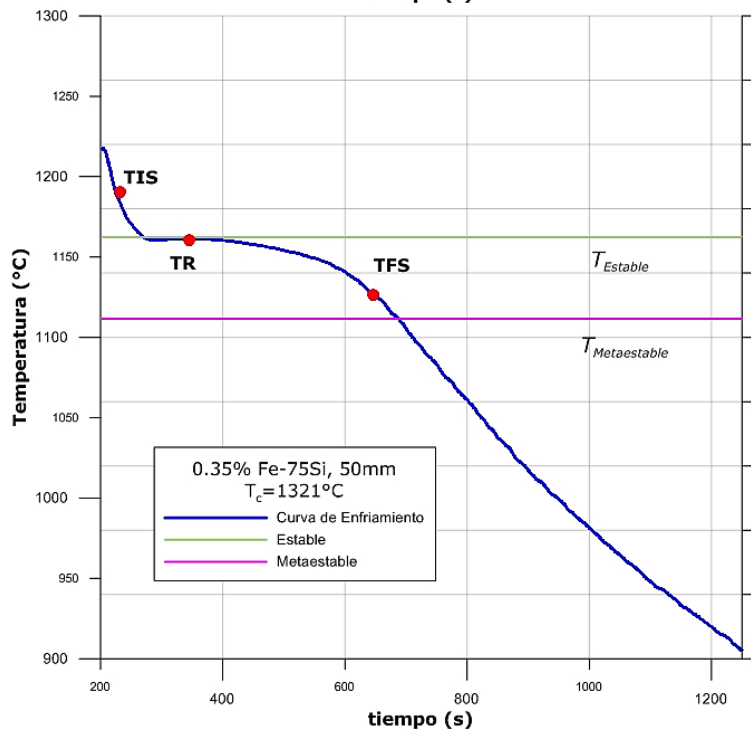
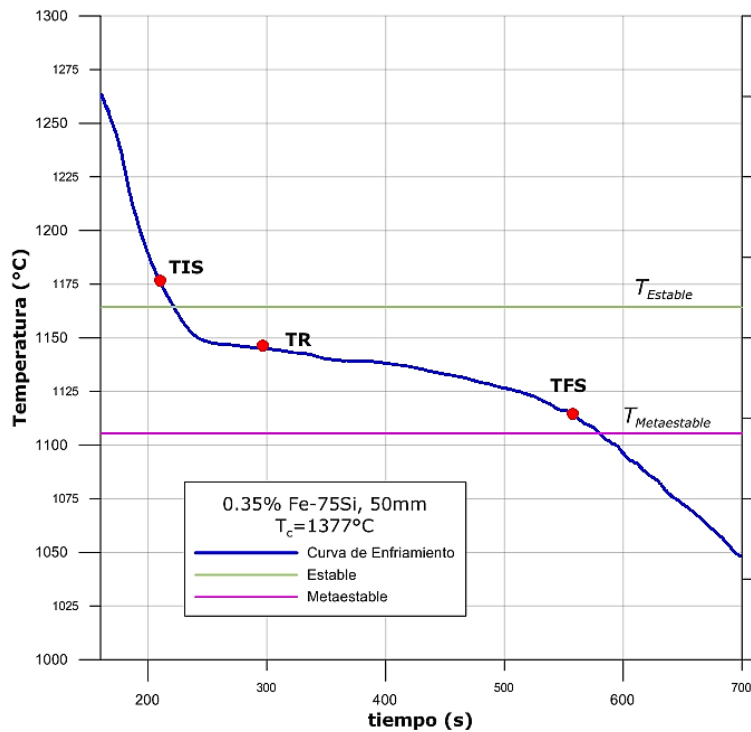
Gráficos 21C y 22C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 4C, (Arriba) y 4D (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalcescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



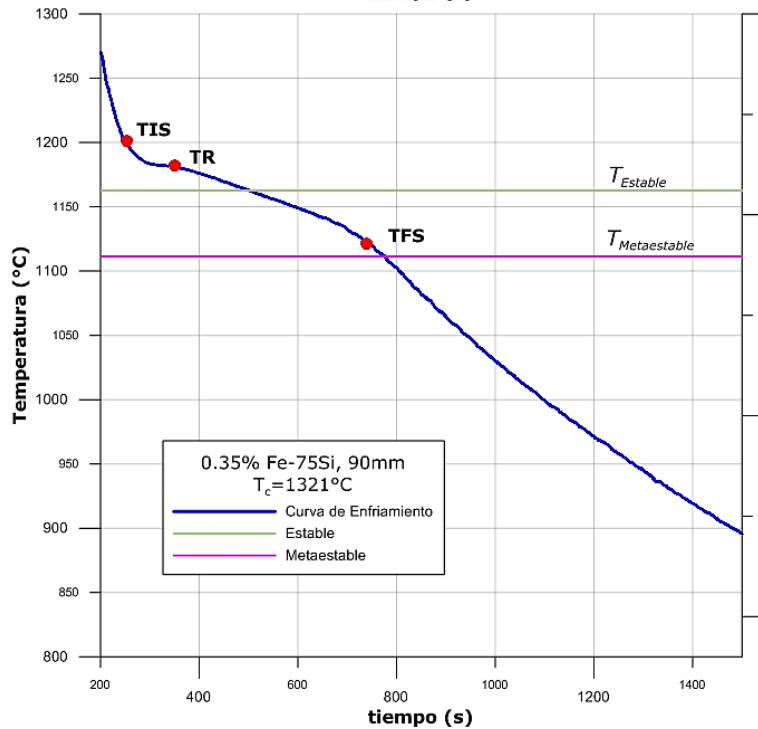
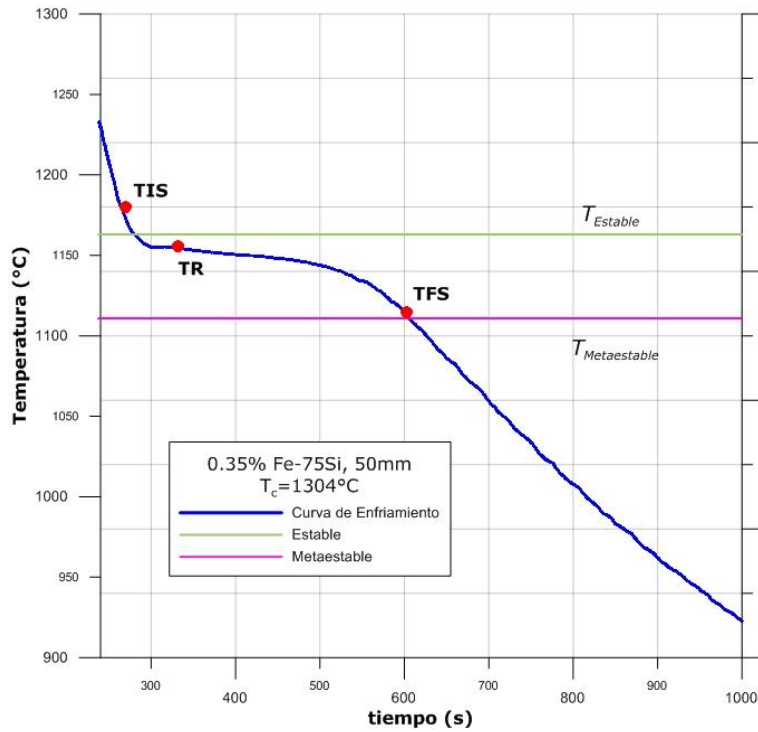
Gráficos 23C y 24C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 4E, (Arriba) y 4F (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Subenfriamiento (TSU), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



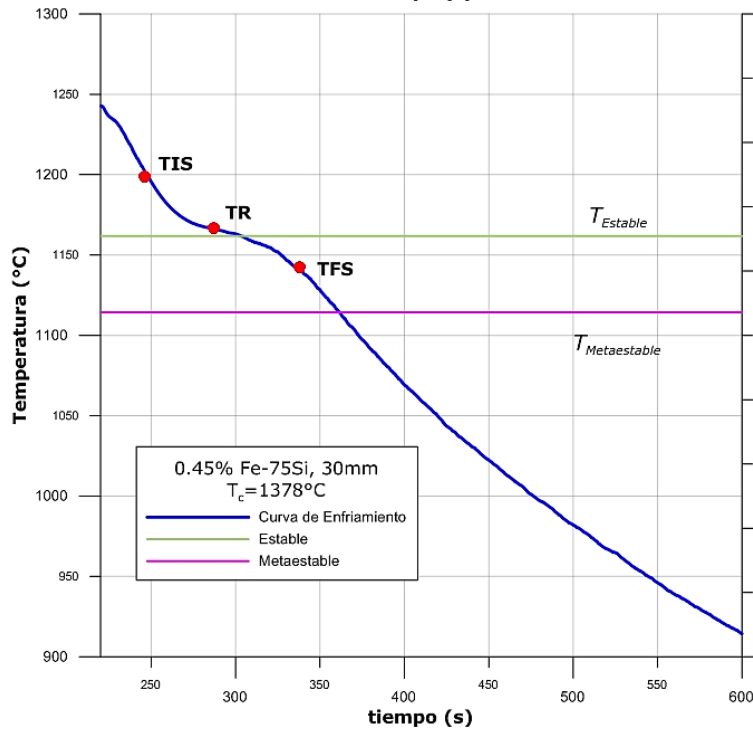
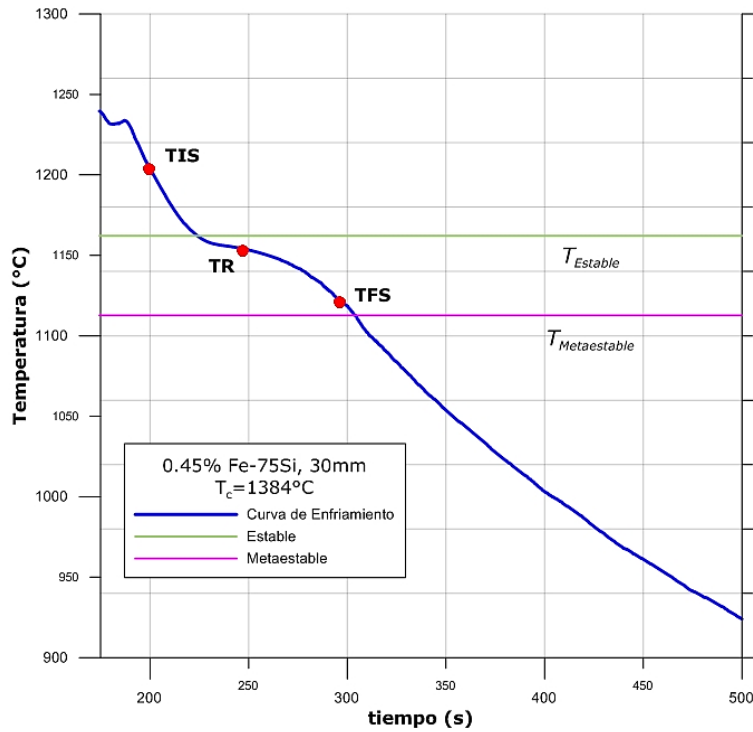
Gráficos 25C y 26C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 4G, (Arriba) y 4H (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalentamiento (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



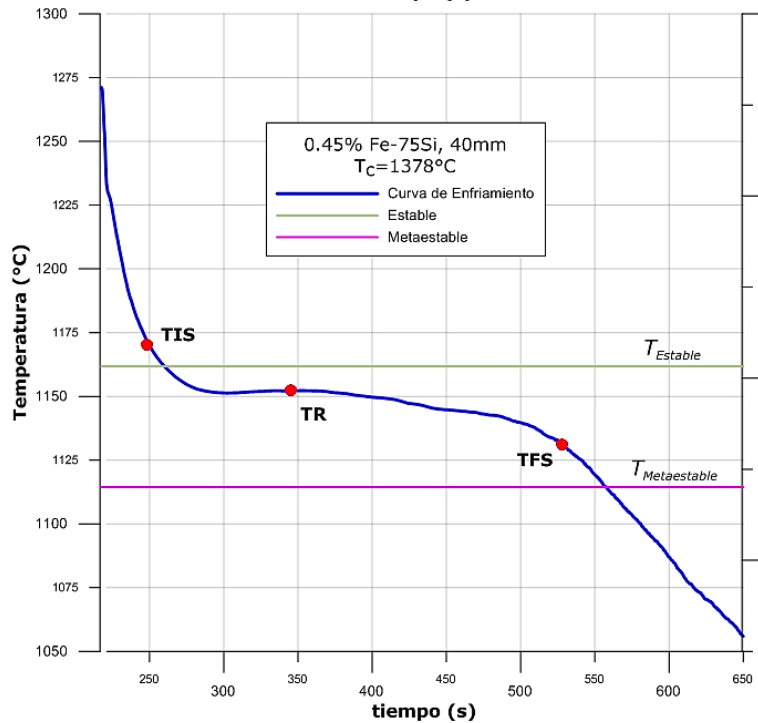
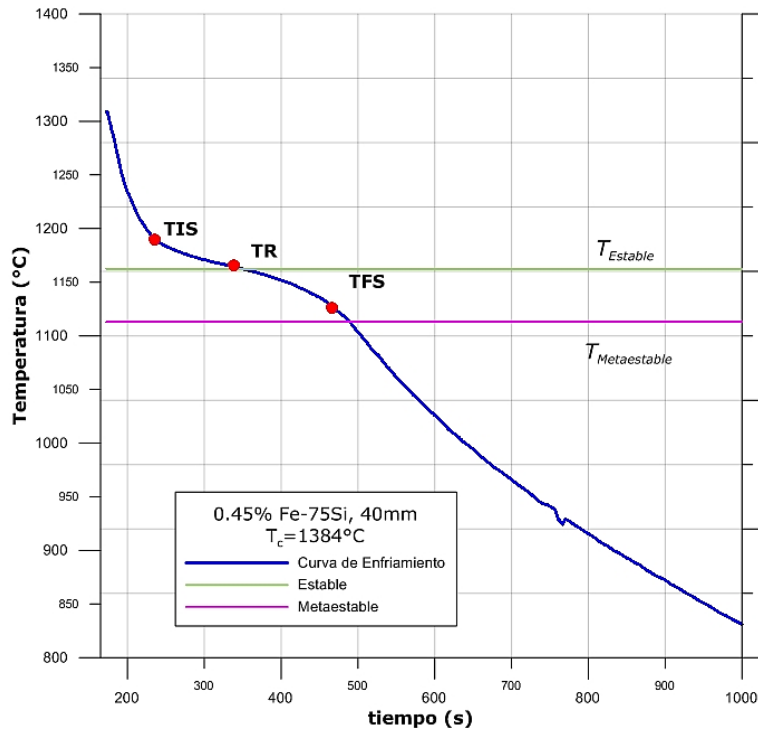
Gráficos 27C y 28C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 4I, (Arriba) y 4K (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalcencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



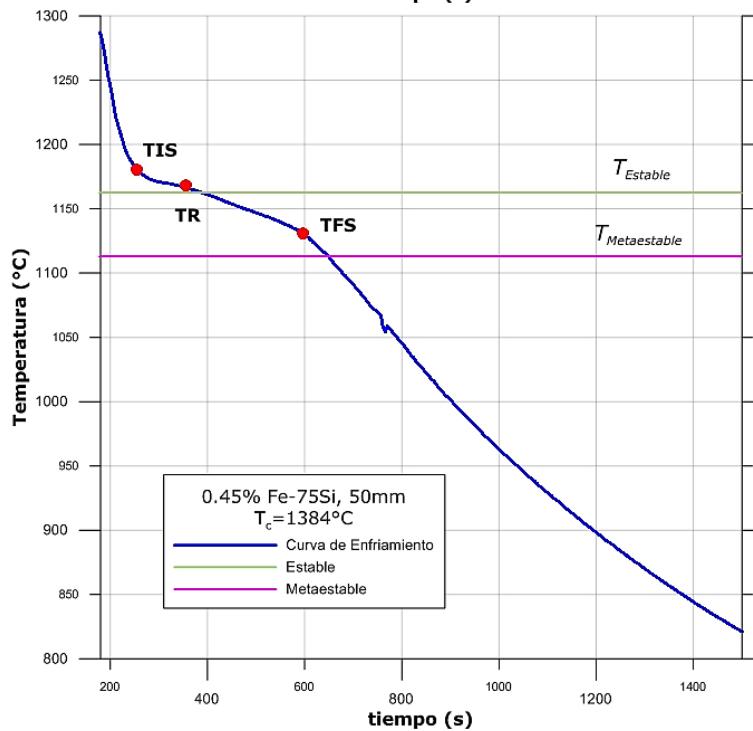
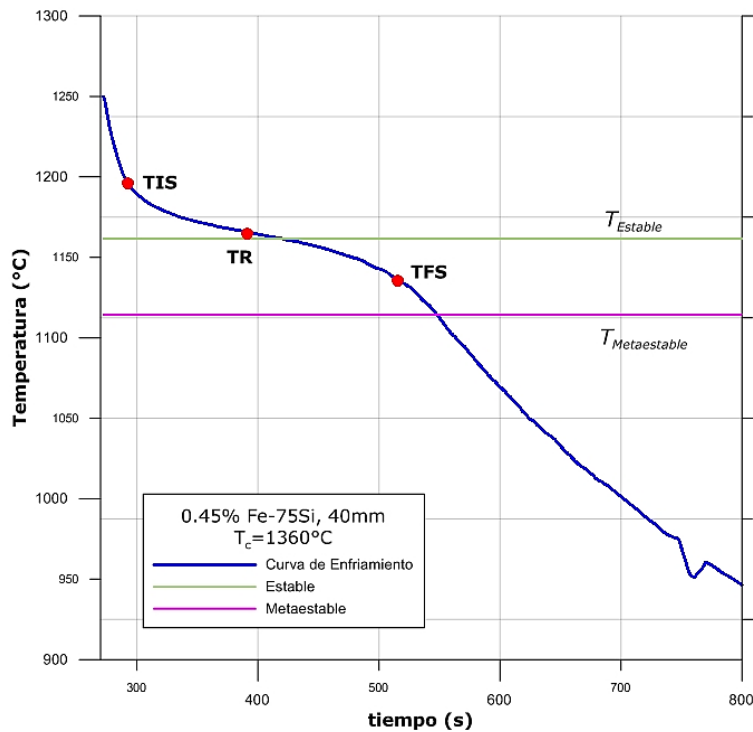
Gráficos 29C y 30C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 5A, (Arriba) y 5B (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalecencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



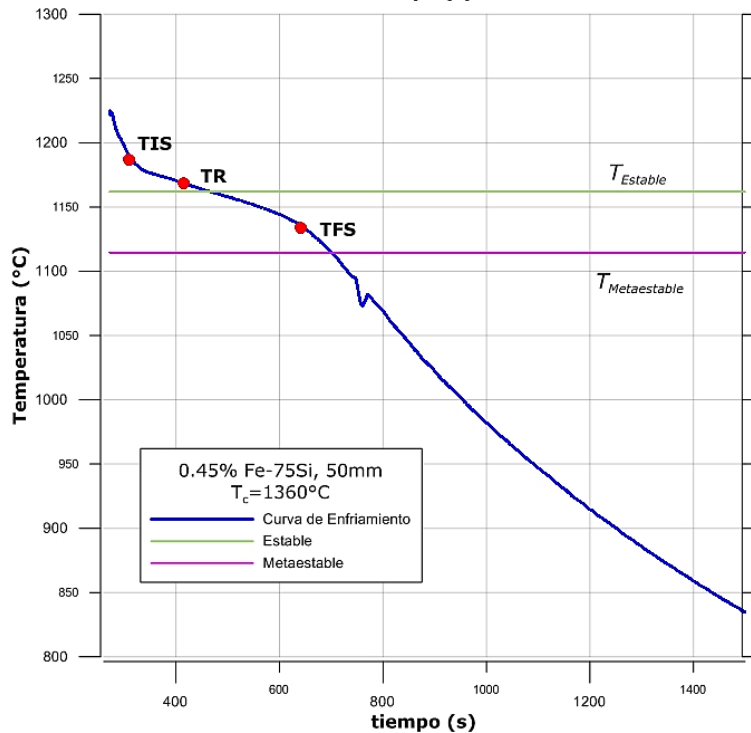
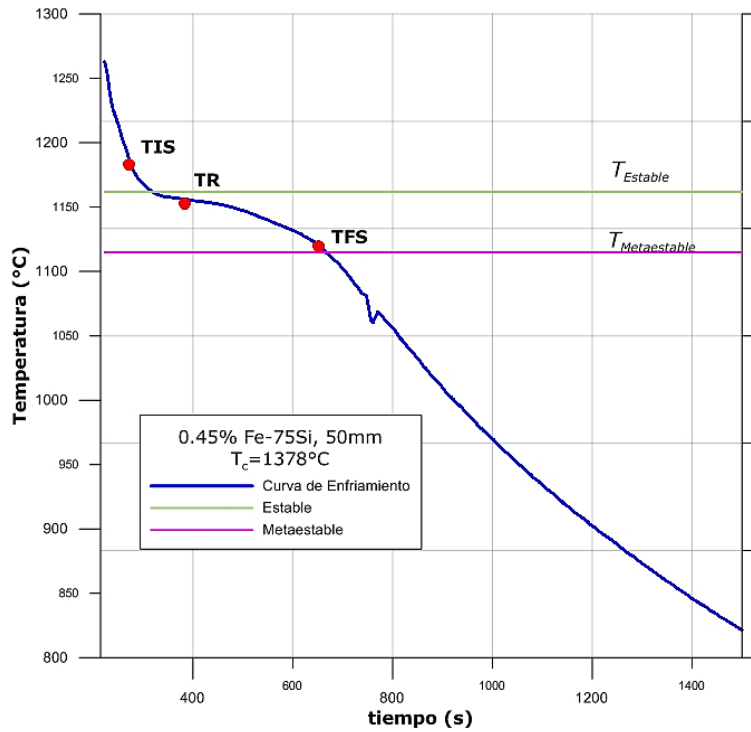
Gráficos 31C y 32C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 5D, (Arriba) y 5E (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



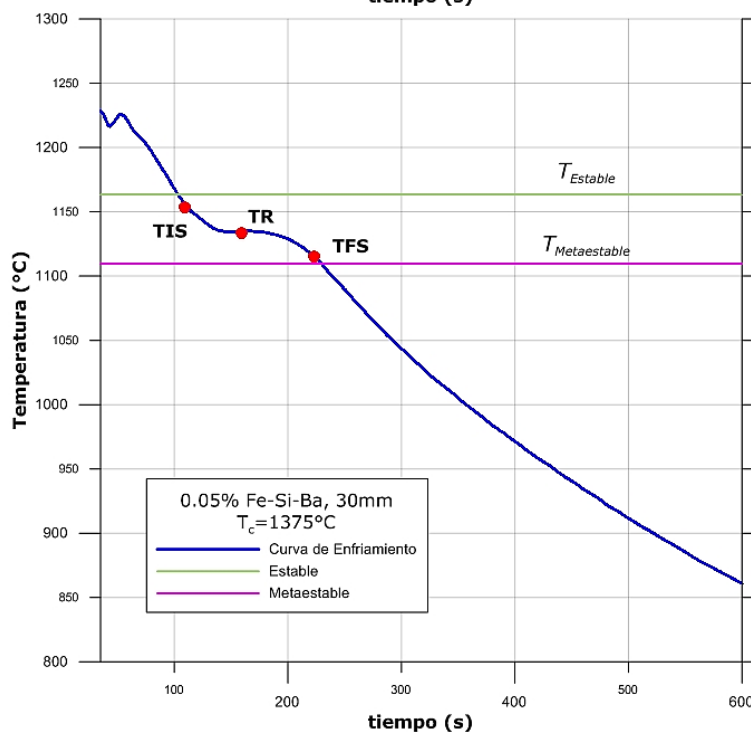
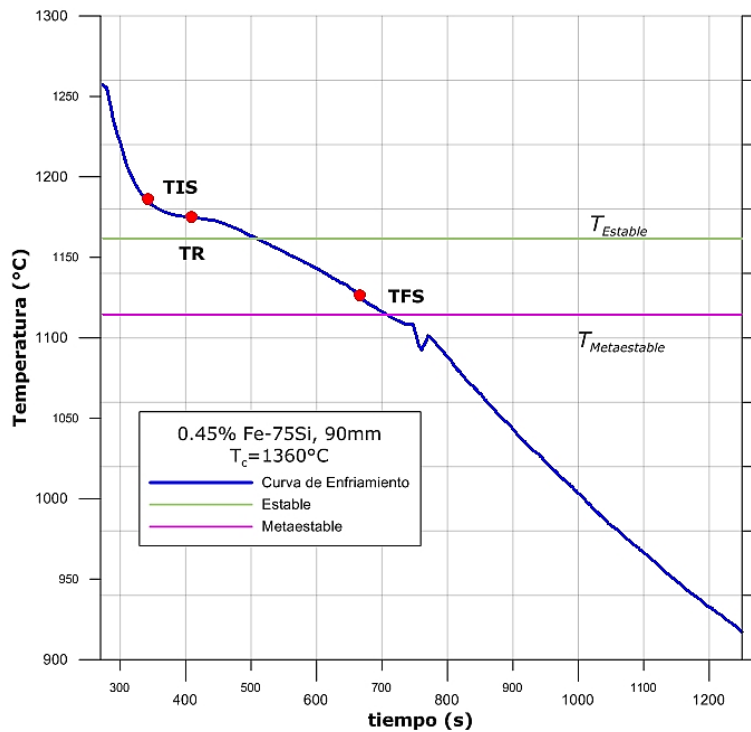
Gráficos 33C y 34C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 5F, (Arriba) y 5G (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalentamiento (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



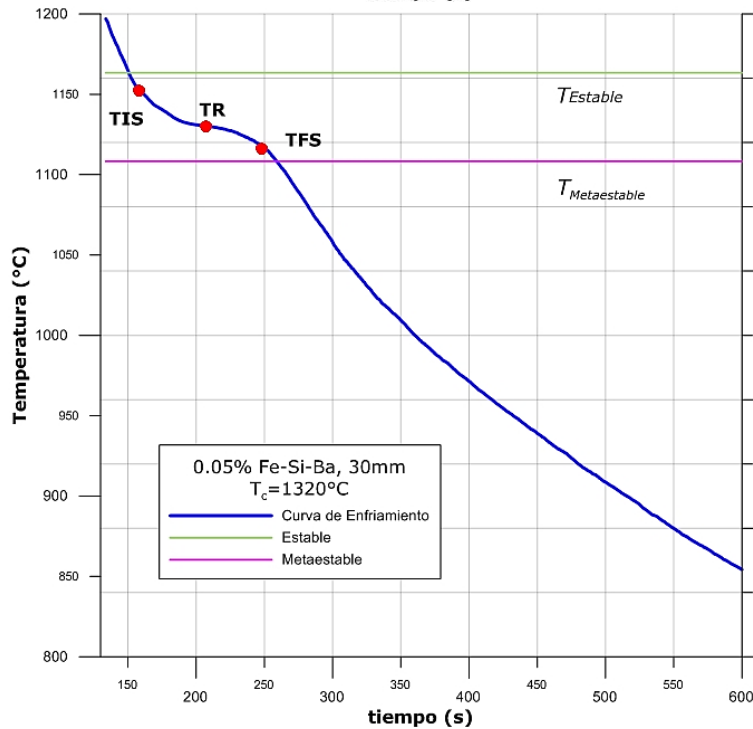
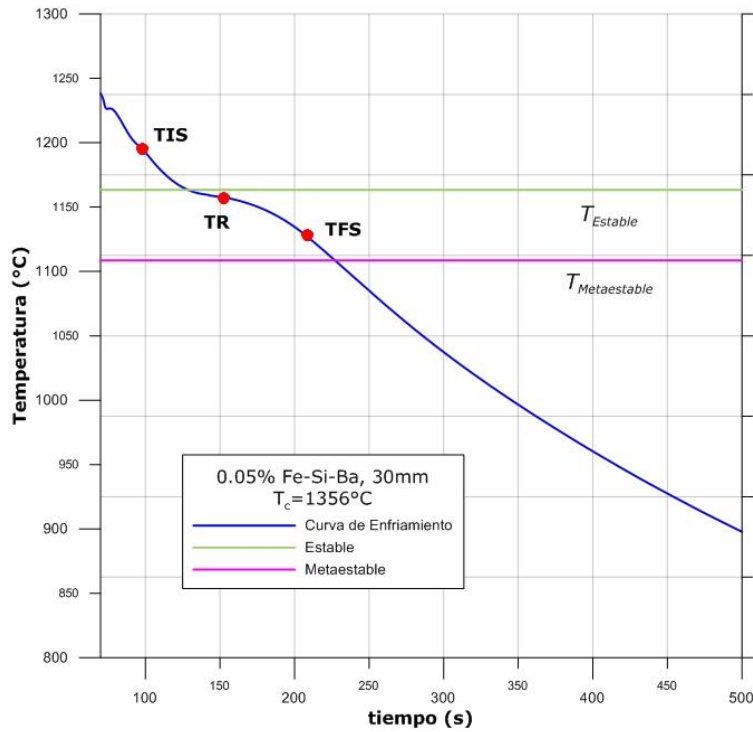
Gráficos 35C y 36C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 5H, (Arriba) y 5I (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



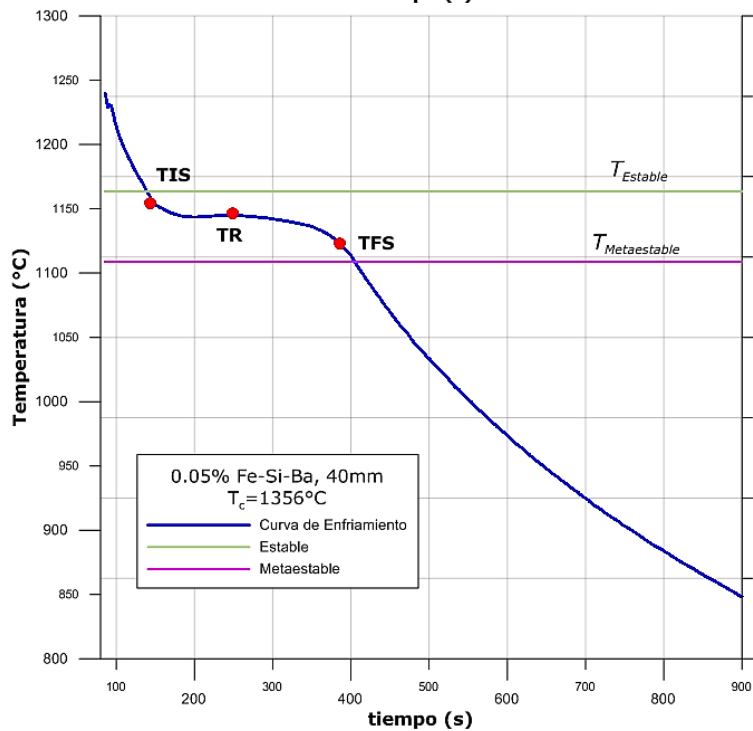
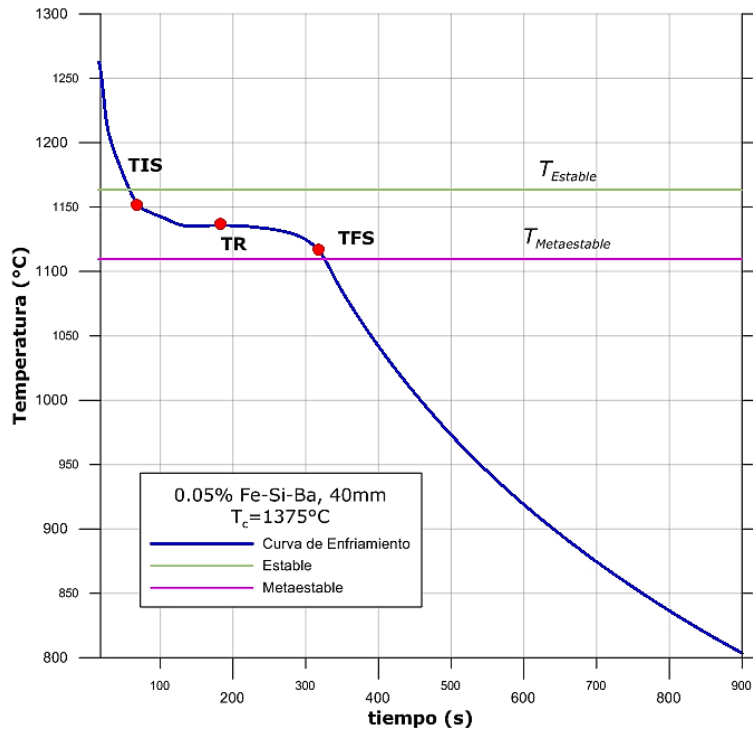
Gráficos 37C y 38C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 5L, (Arriba) y 6A (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalcancia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



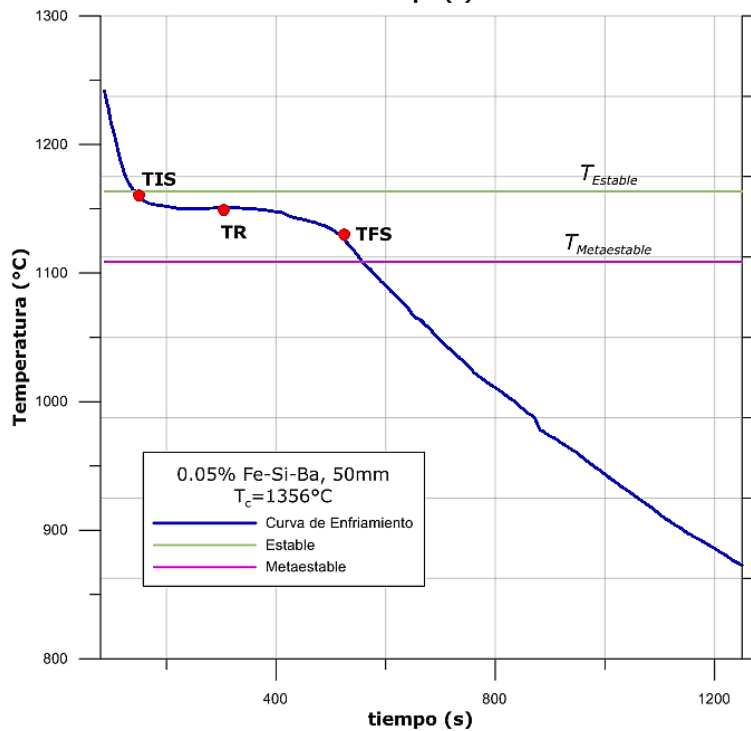
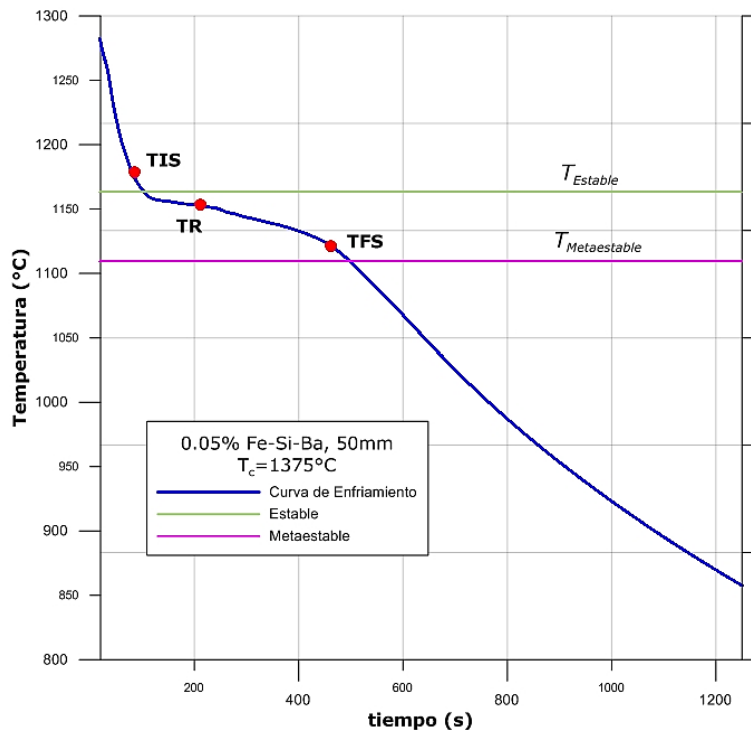
Gráficos 39C y 40C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 6B, (Arriba) y 6C (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalentamiento (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



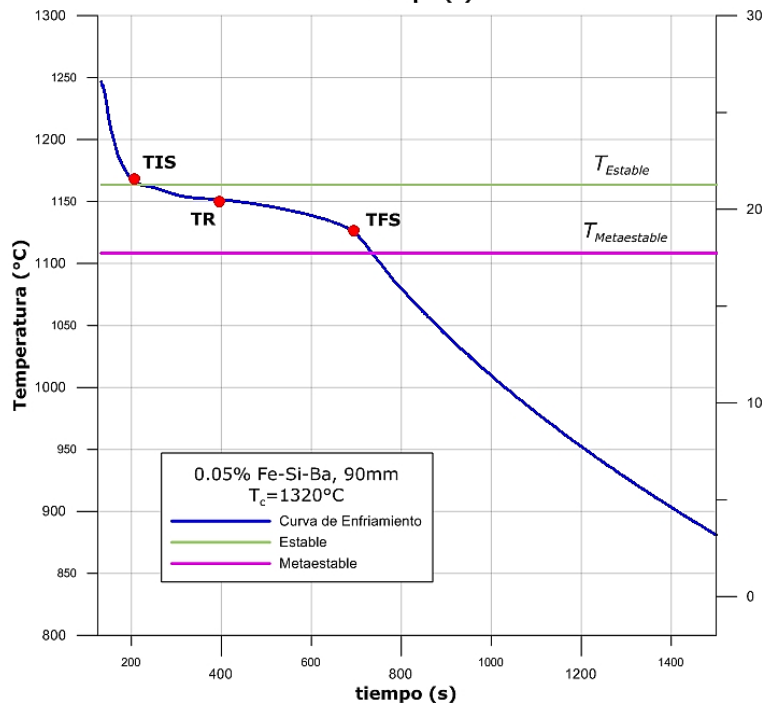
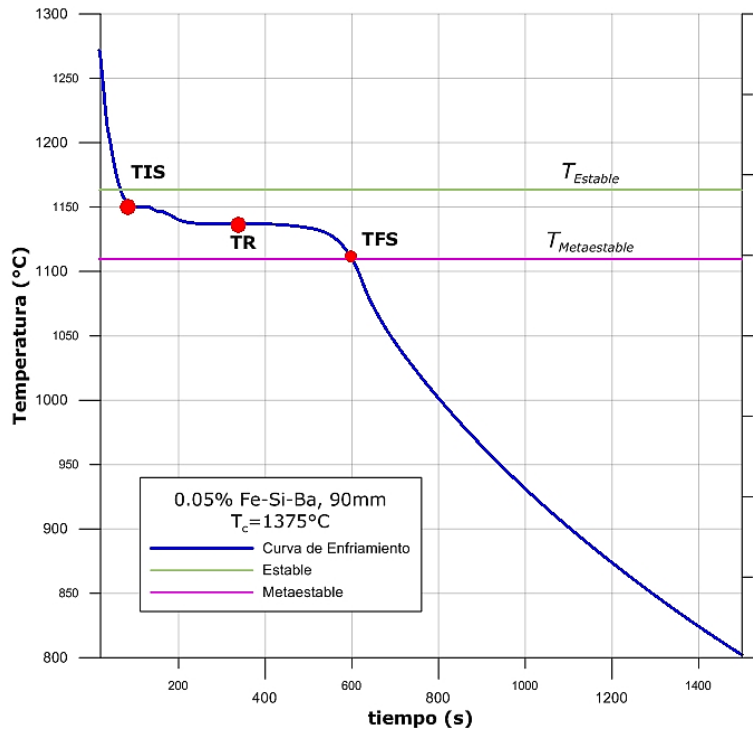
Gráficos 41C y 42C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 6D, (Arriba) y 6E (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



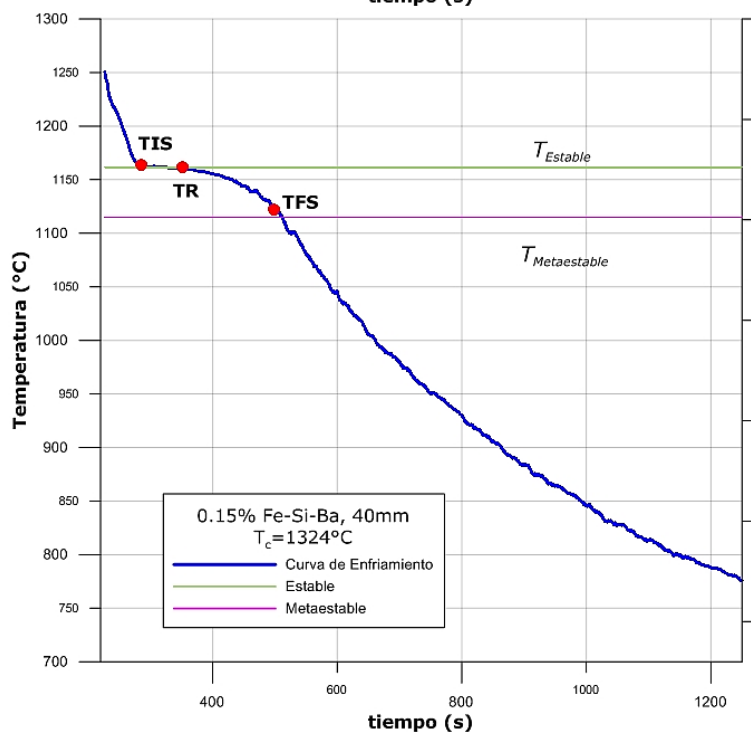
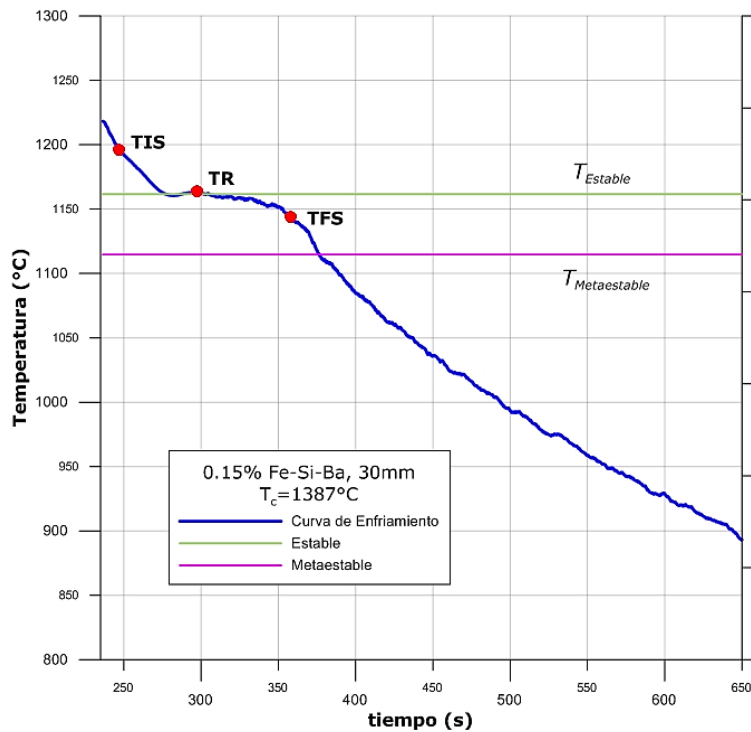
Gráficos 43C y 44C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 6G, (Arriba) y 6H (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalecencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



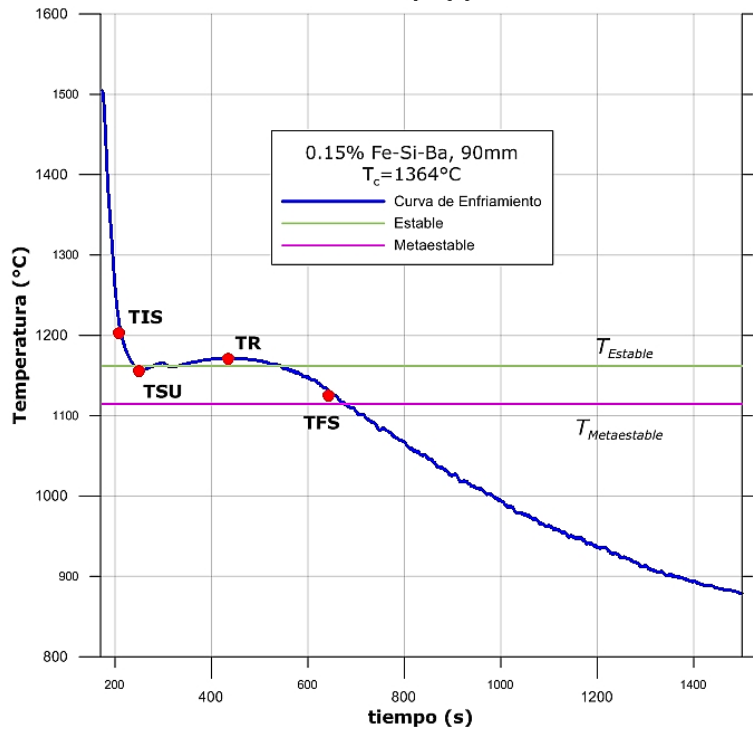
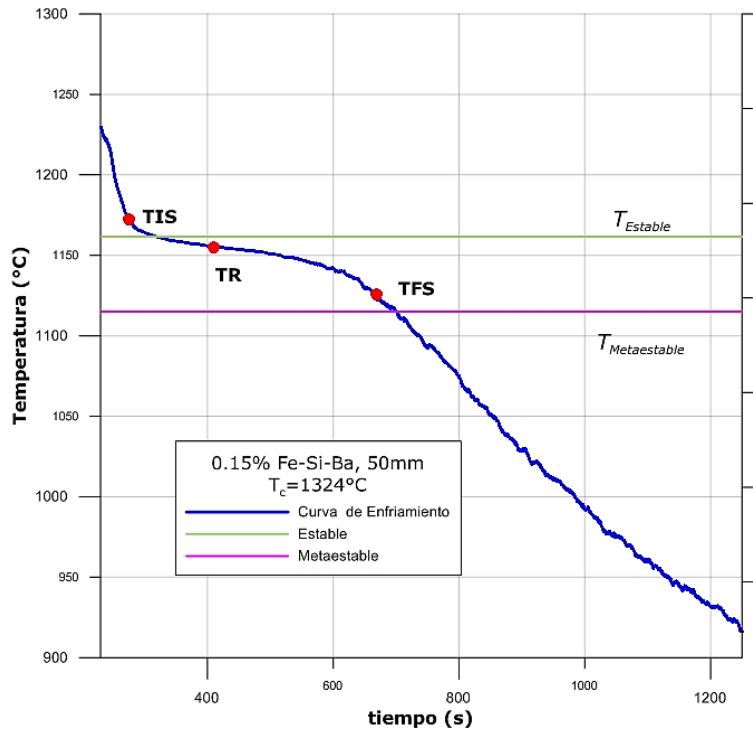
Gráficos 45C y 46C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 6J, (Arriba) y 6L (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalescencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



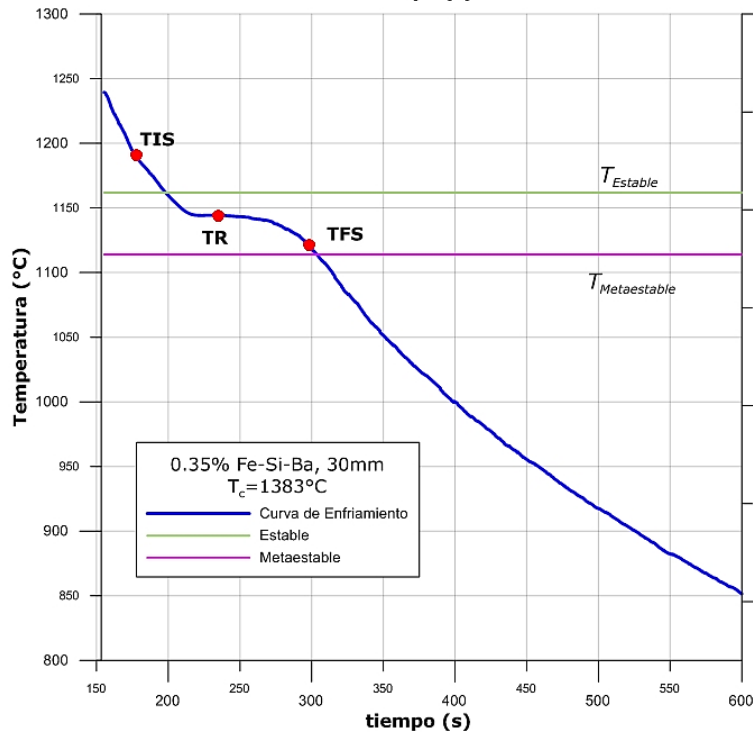
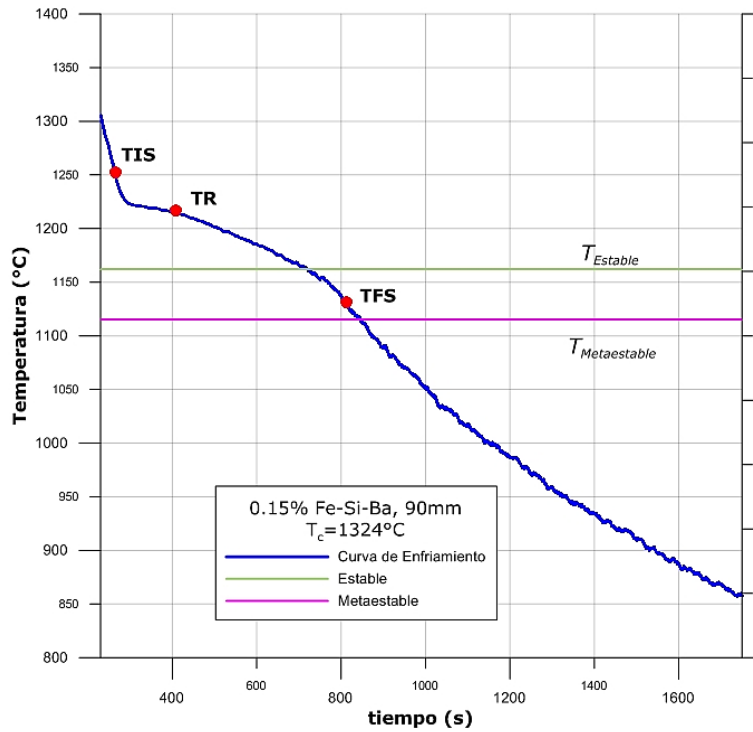
Gráficos 47C y 48C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 7C, (Arriba) y 7F (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Recalcancia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



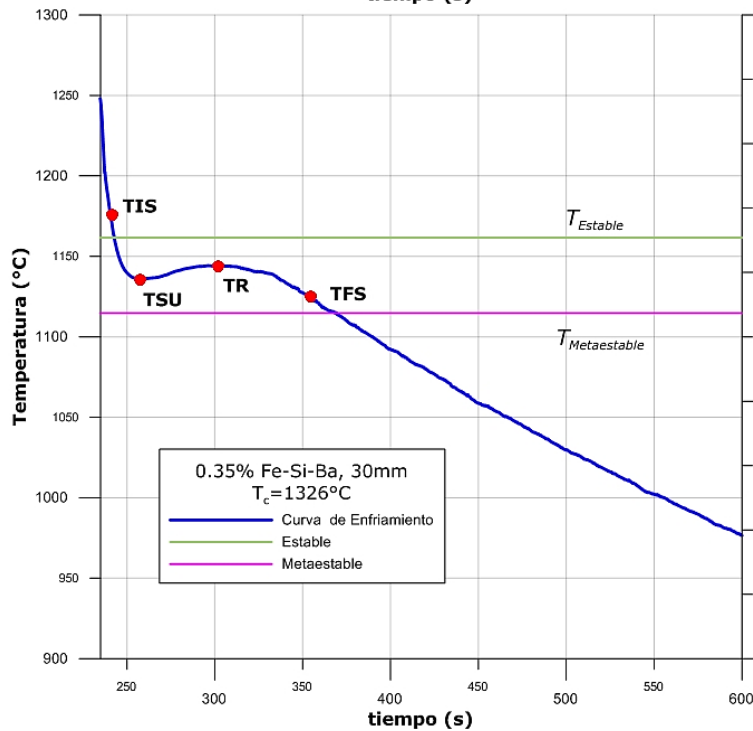
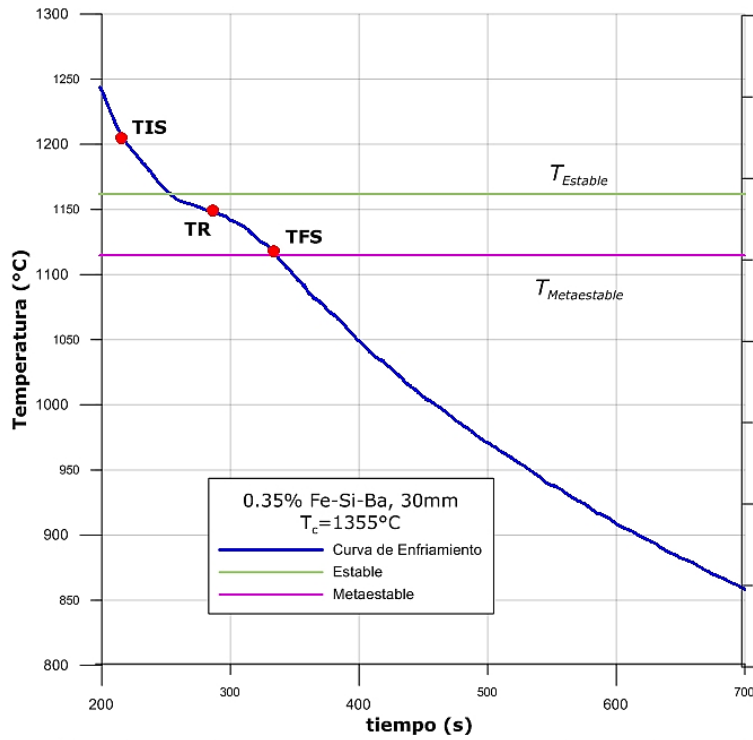
Gráficos 49C y 50C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 7I, (Arriba) y 7K (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Subenfriamiento (TSU), Temperatura de Recalcencia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



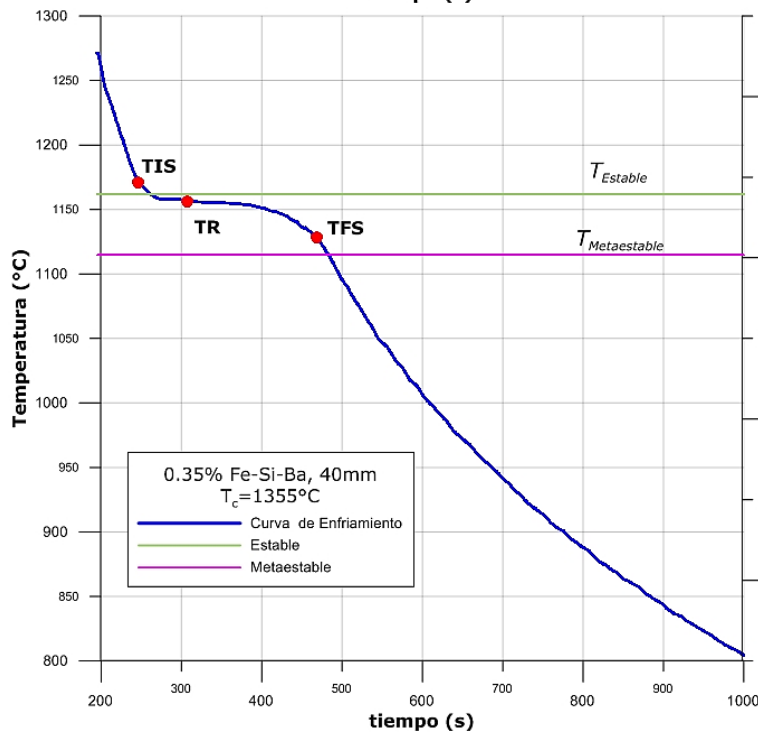
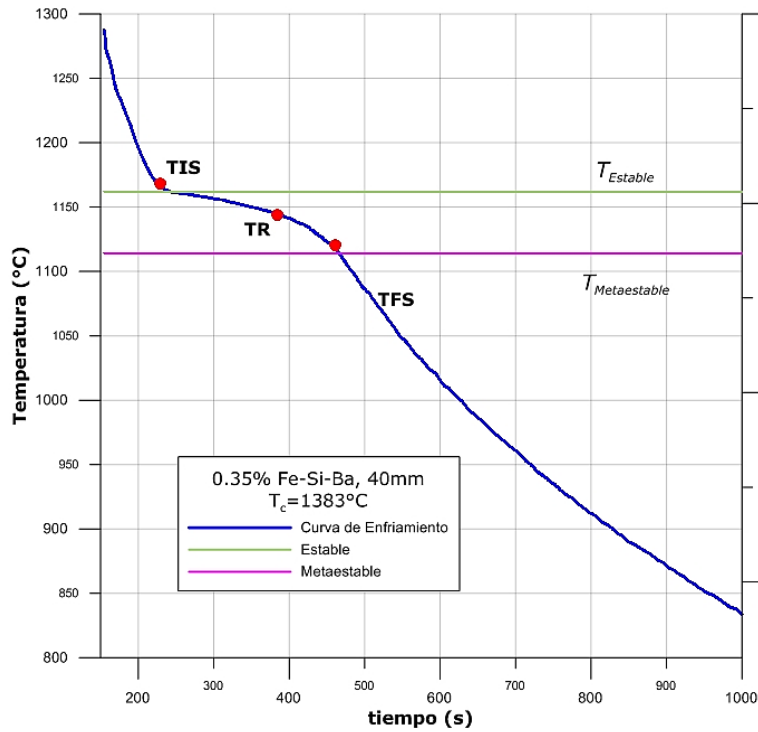
Gráficos 51C y 52C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 7L, (Arriba) y 9A (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



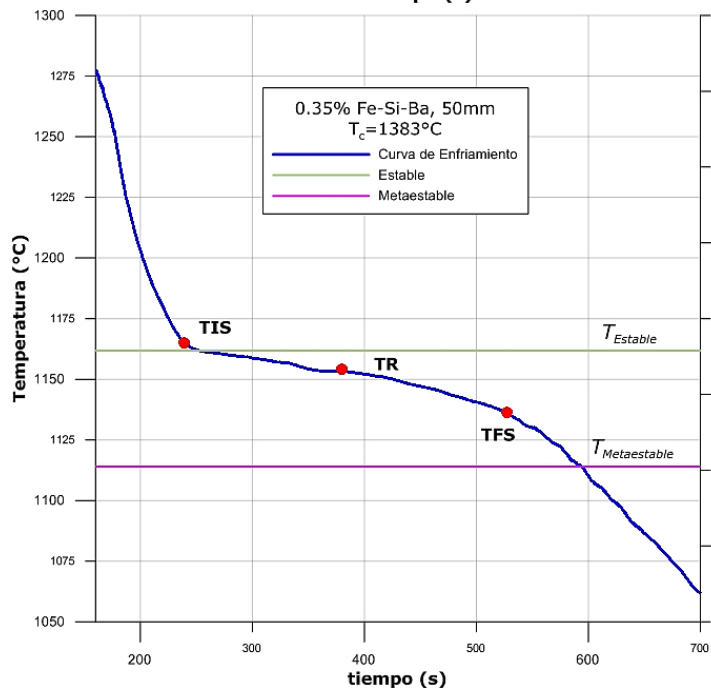
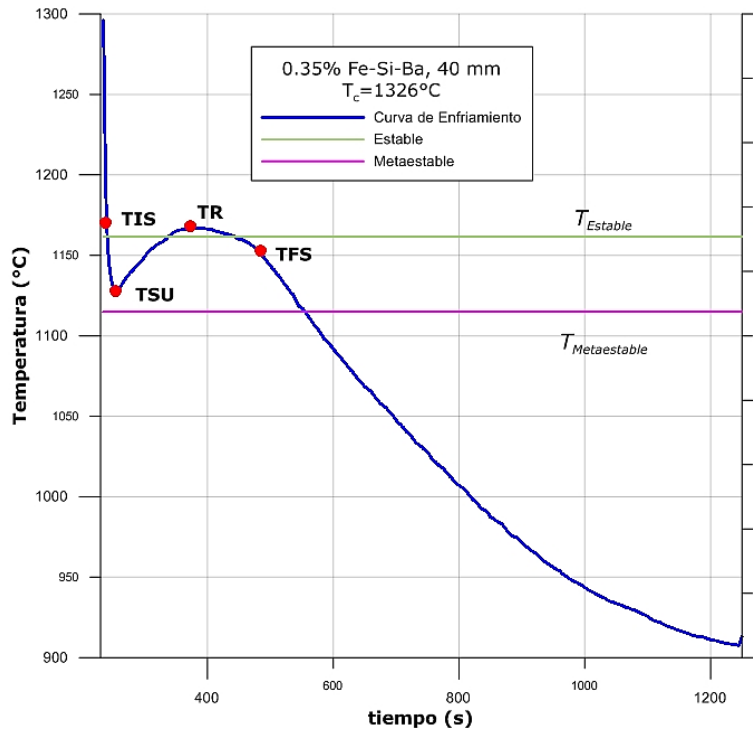
Gráficos 53C y 54C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 9B, (Arriba) y 9C (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



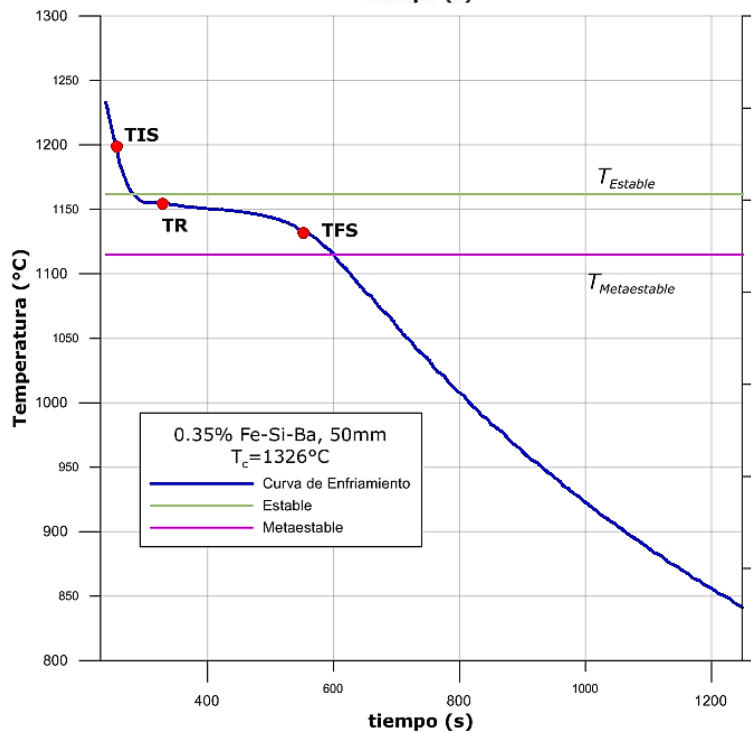
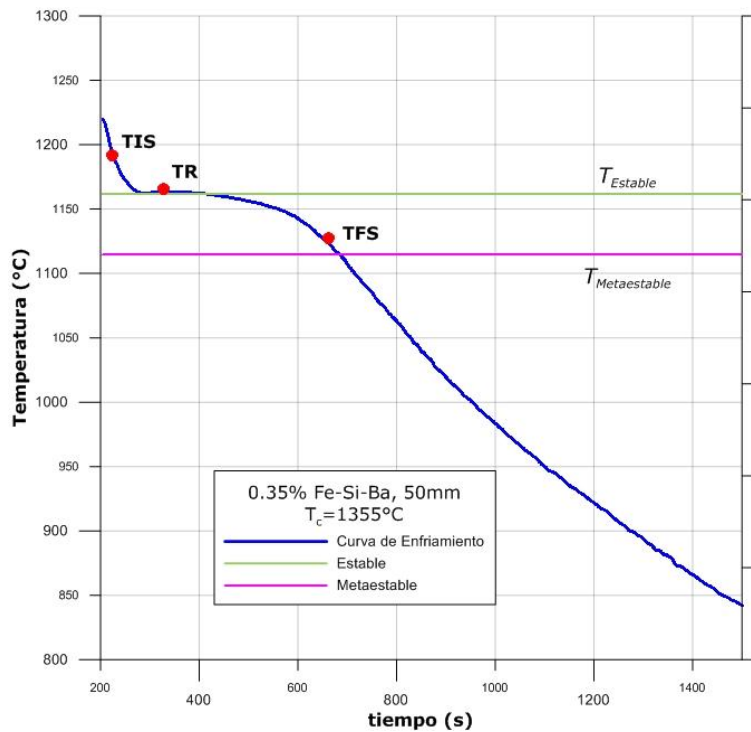
Gráficos 55C y 56C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 9D, (Arriba) y 9E (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



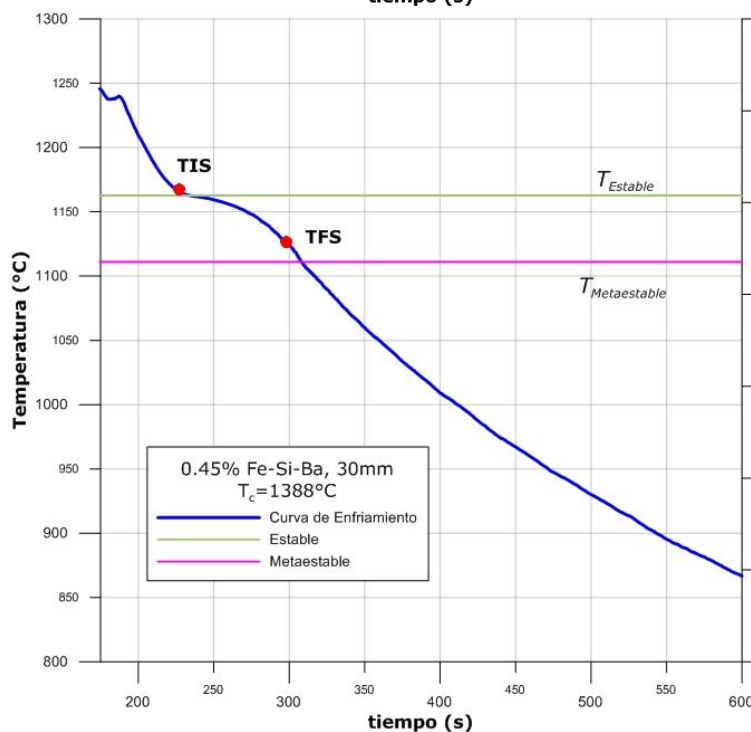
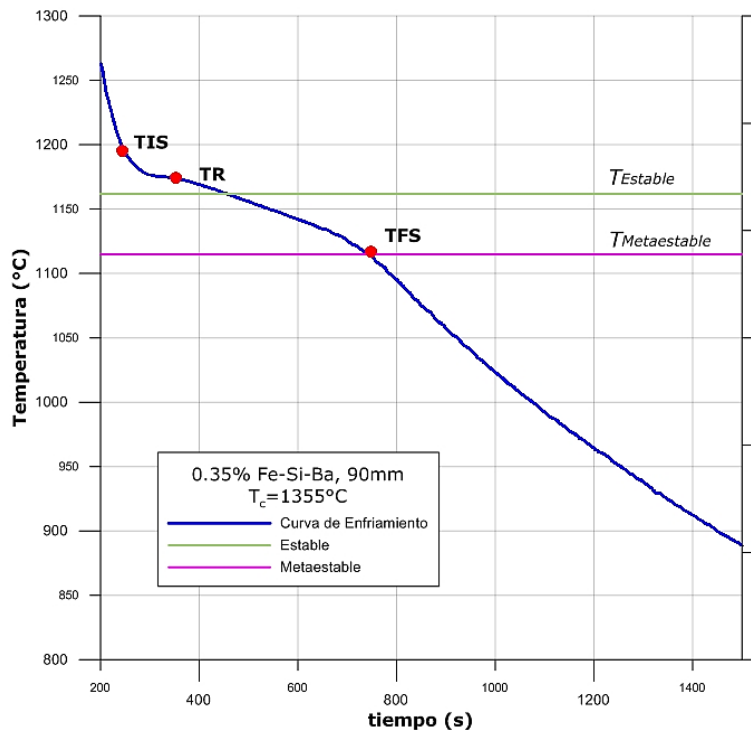
Gráficos 57C y 58C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 9F, (Arriba) y 9G (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), Temperatura de Subenfriamiento (TSU), Temperatura de Recalcancia (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



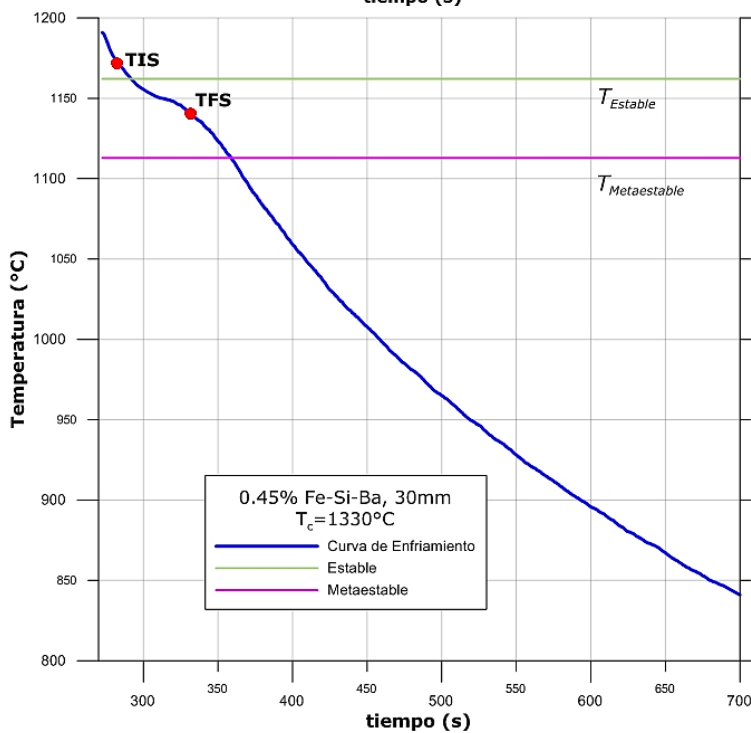
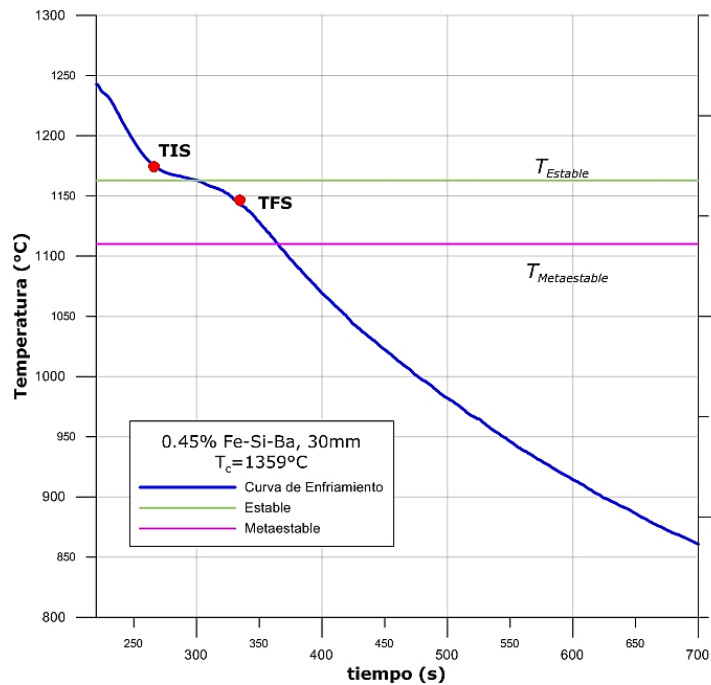
Gráficos 59C y 60C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 9H, (Arriba) y 9I (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



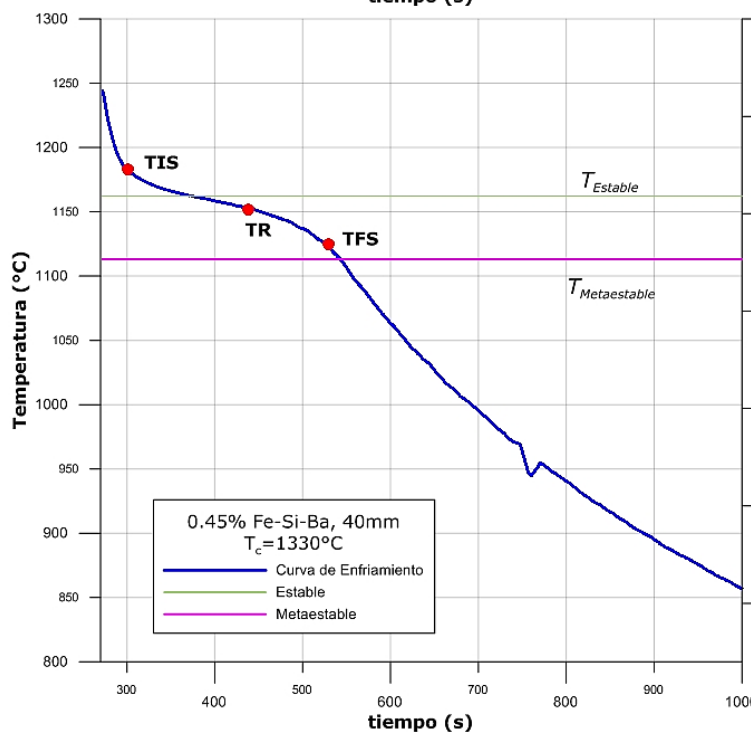
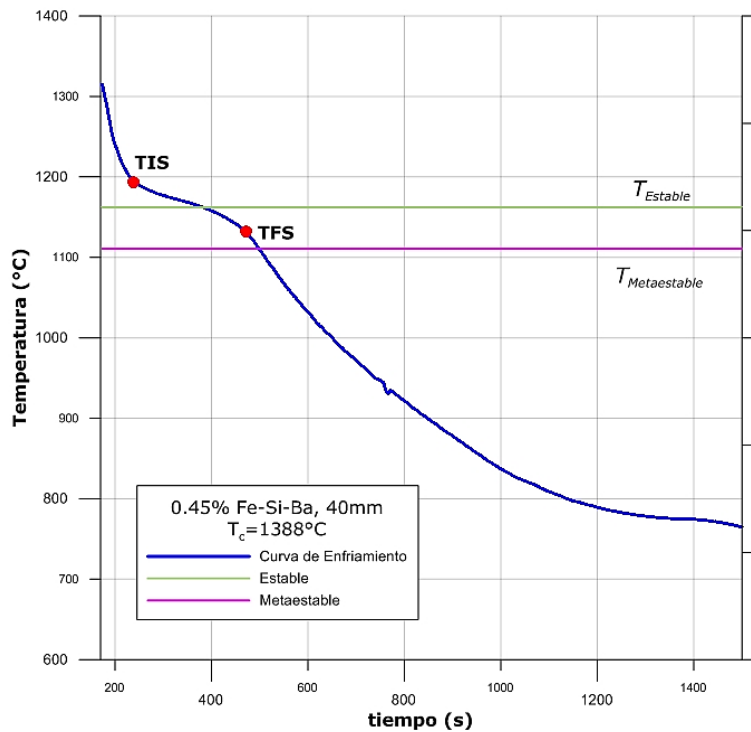
Gráficos 61C y 62C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 9K, (Arriba) y 10A (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



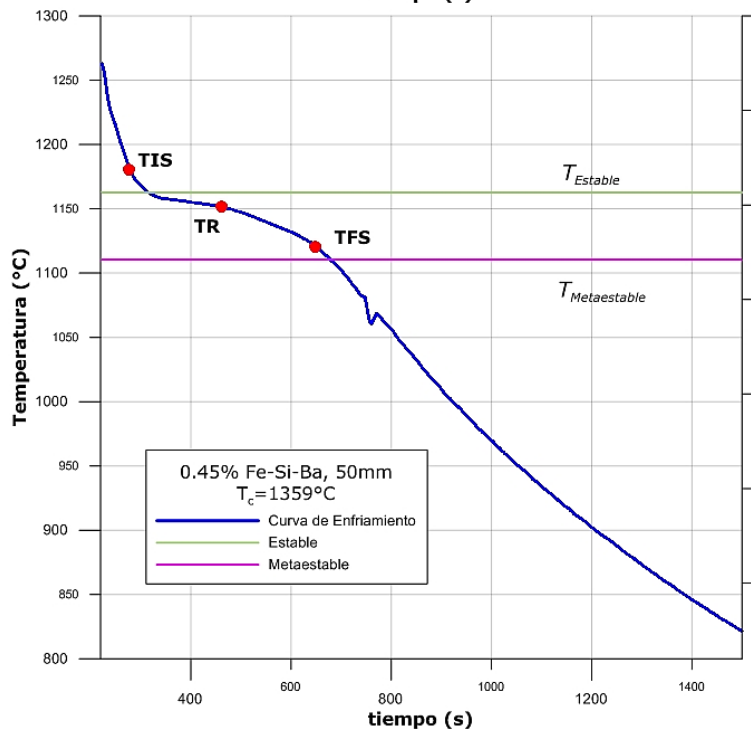
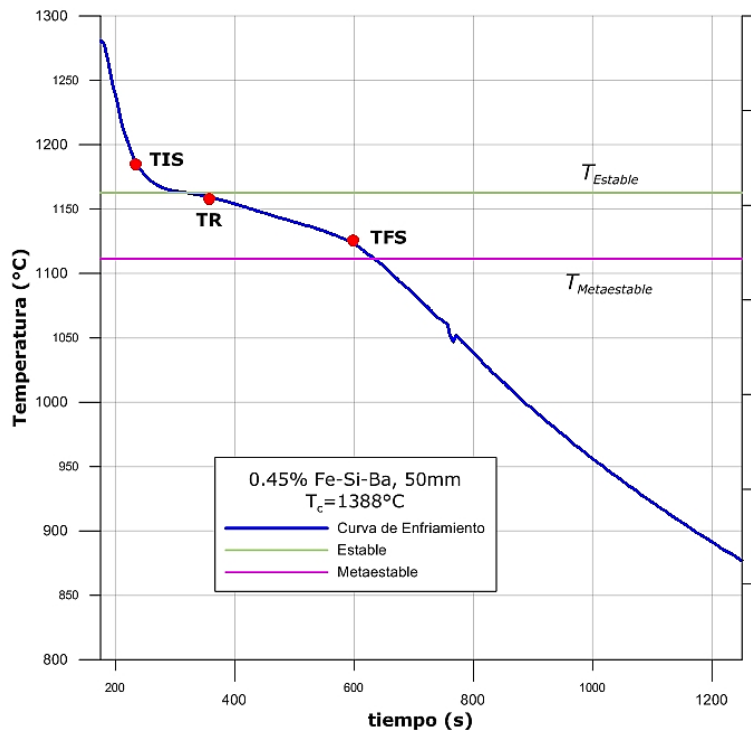
Gráficos 63C y 64C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 10B, (Arriba) y 10C (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



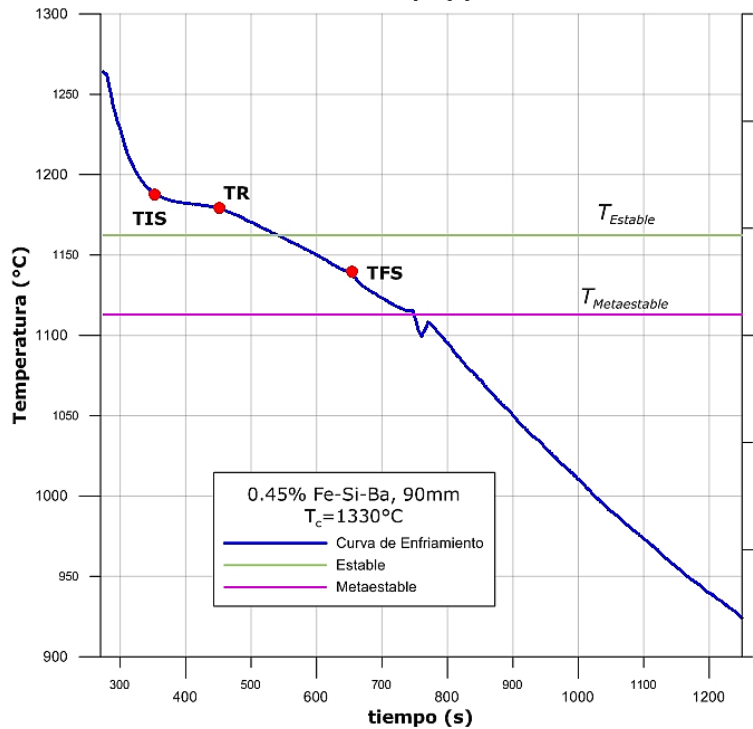
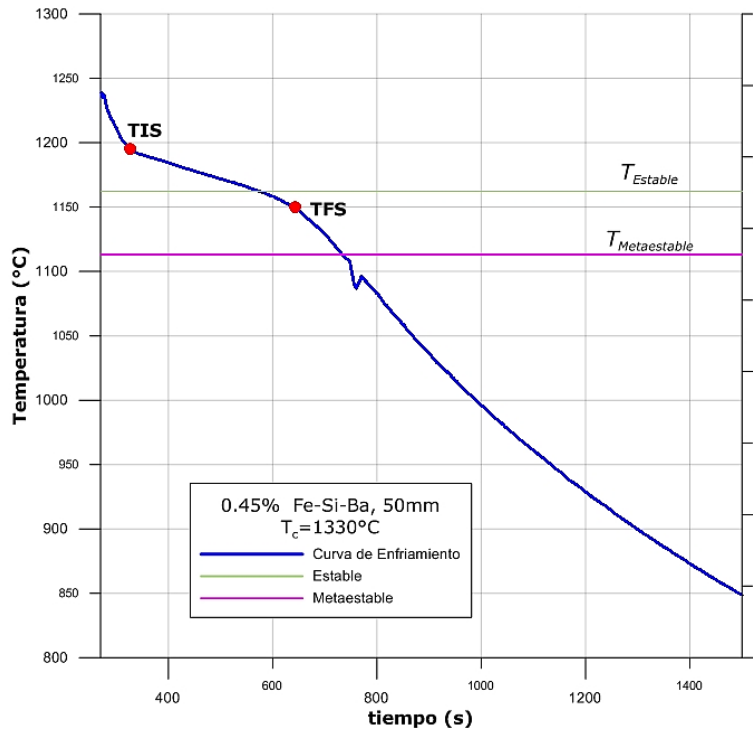
Gráficos 65C y 66C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 10D, (Arriba) y 10F (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.



Gráficos 67C y 68C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 10G, (Arriba) y 10H (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

APÉNDICE C. Análisis térmico: Curvas de enfriamiento.

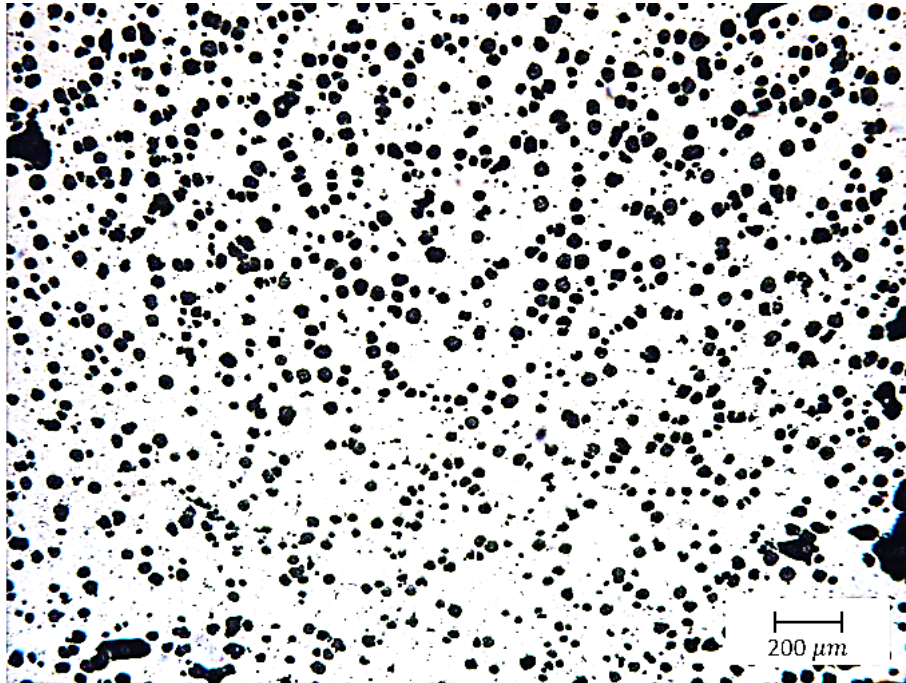


Gráficos 69C y 70C. Curvas de enfriamiento correspondientes a las secciones 10I, (Arriba) y 10L (Abajo). Se muestra la Temperatura de Inicio de Solidificación (TIS), (TR) y Temperatura Final de Solidificación (TFS).

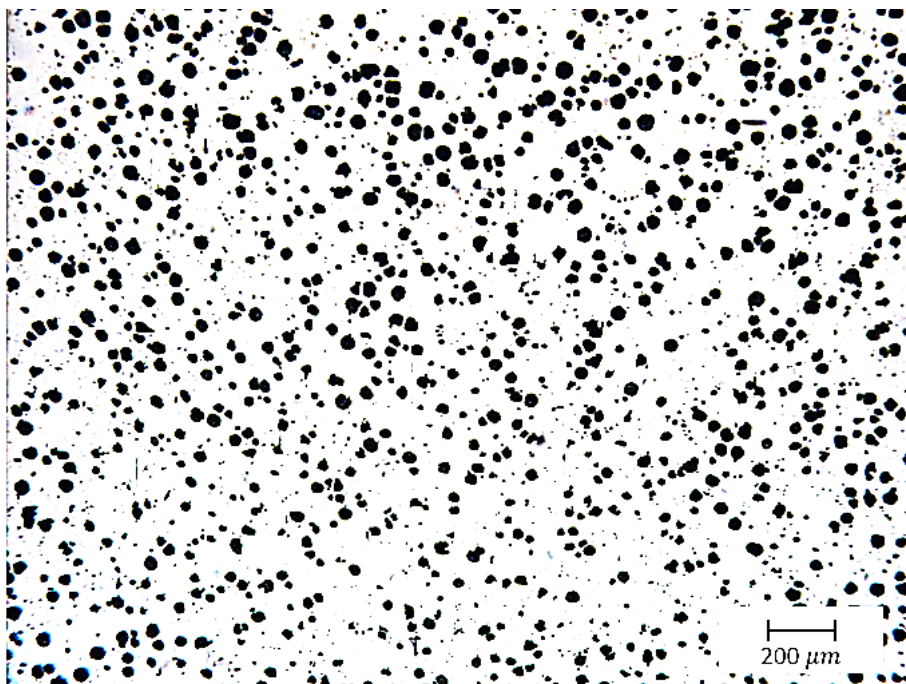
APÉNDICE D

- **Caracterización metalográfica de piñones fabricados con hierro nodular 120-90-02. Sin ataque, 100x.**

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

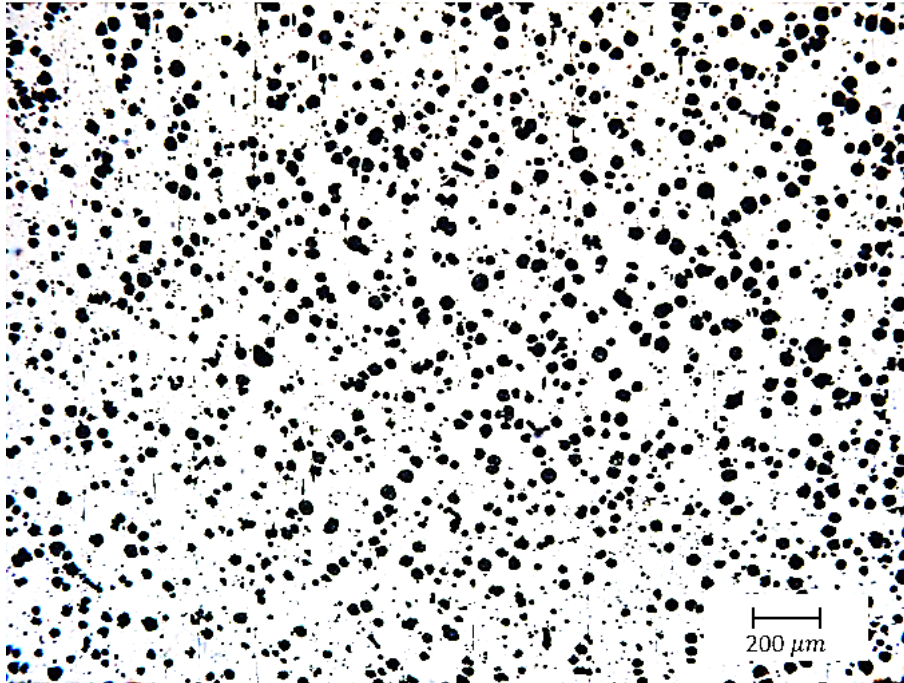


Metalografía 1D. Fotografía correspondiente a la sección 1A: 30mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1400^\circ\text{C}$, 142 nódulos/ mm^2 .

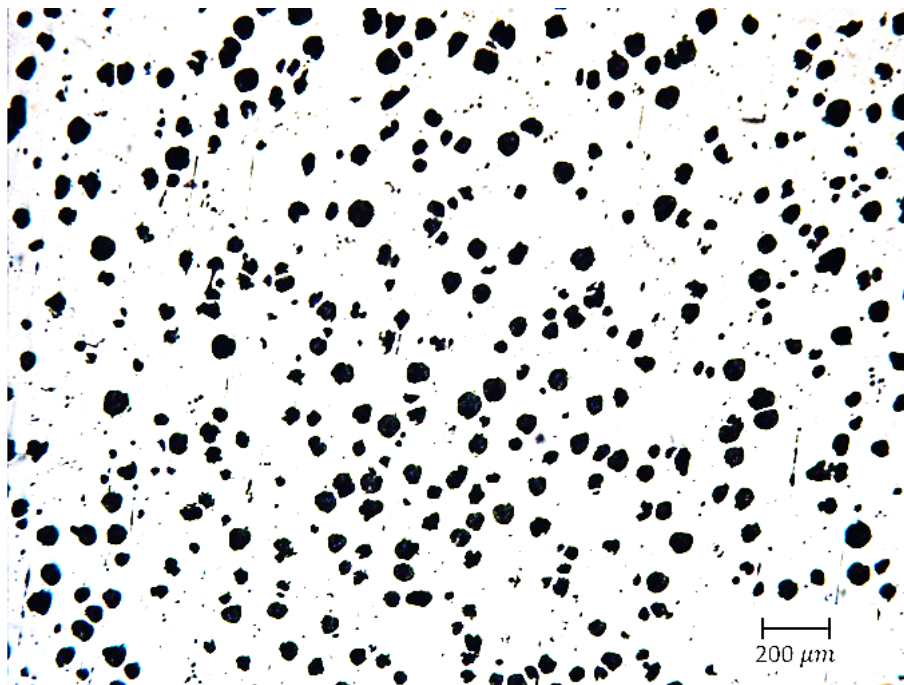


Metalografía 2D. Fotografía correspondiente a la sección 1B: 30mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1352^\circ\text{C}$, 167 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

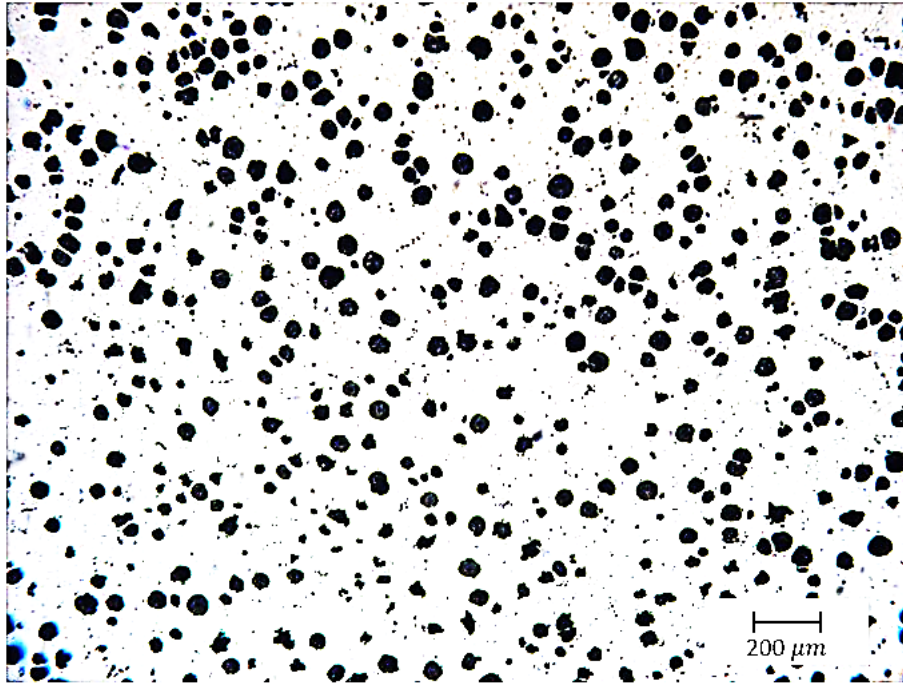


Metalografía 3D. Fotografía correspondiente a la sección 1C: 30mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1324^\circ\text{C}$, 158 nódulos/ mm^2 .

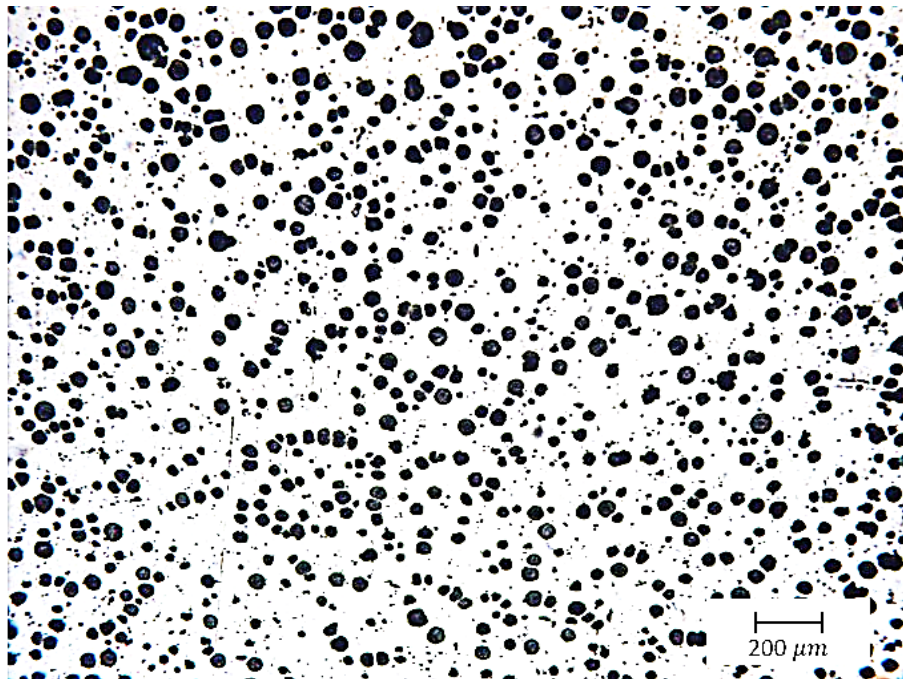


Metalografía 4D. Fotografía correspondiente a la sección 1D: 40mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1400^\circ\text{C}$, 104 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

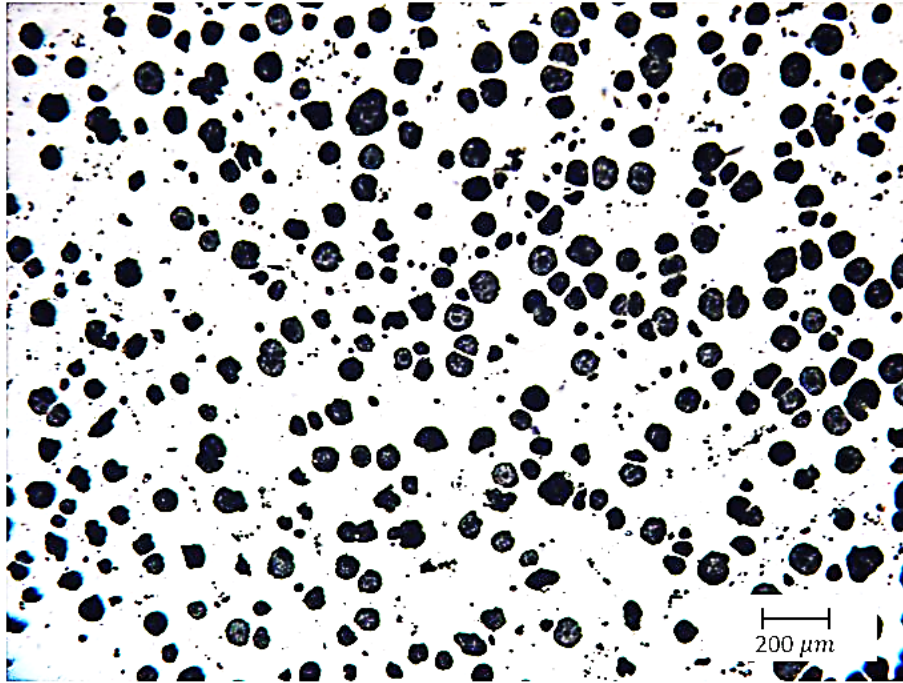


Metalografía 5D. Fotografía correspondiente a la sección 1E: 40mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1352^\circ\text{C}$, 156 nódulos/ mm^2 .

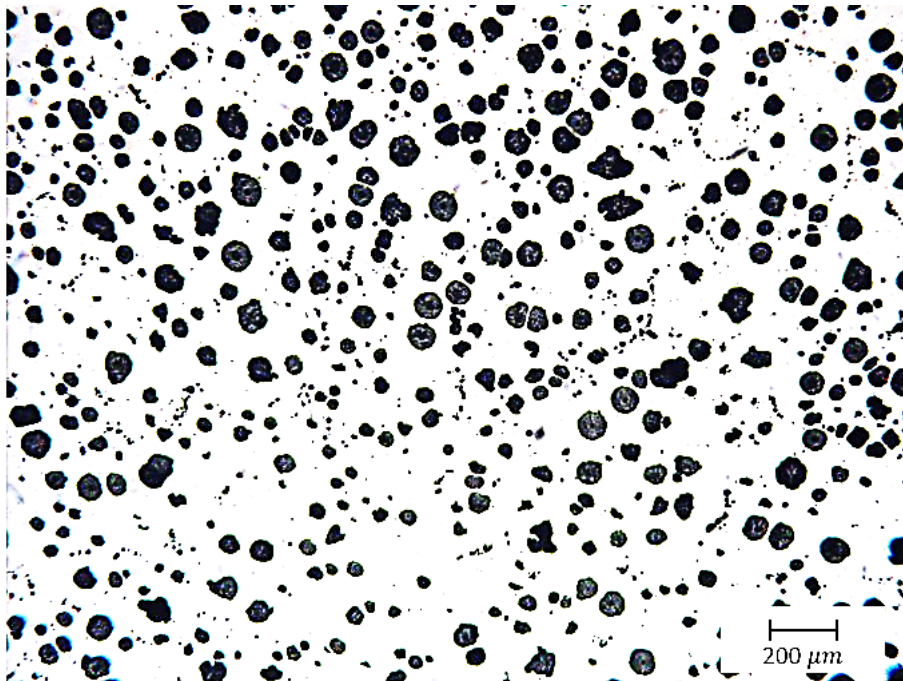


Metalografía 6D. Fotografía correspondiente a la sección 1F: 40mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1324^\circ\text{C}$, 224 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

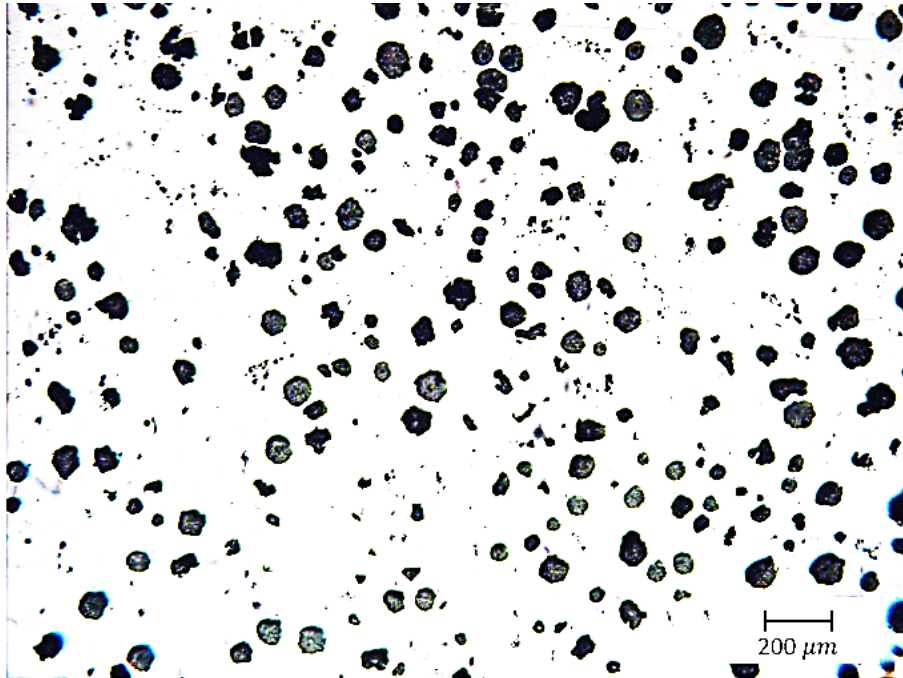


Metalografía 7D. Fotografía correspondiente a la sección 1G: 50mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1400^\circ\text{C}$, 136 nódulos/ mm^2 .

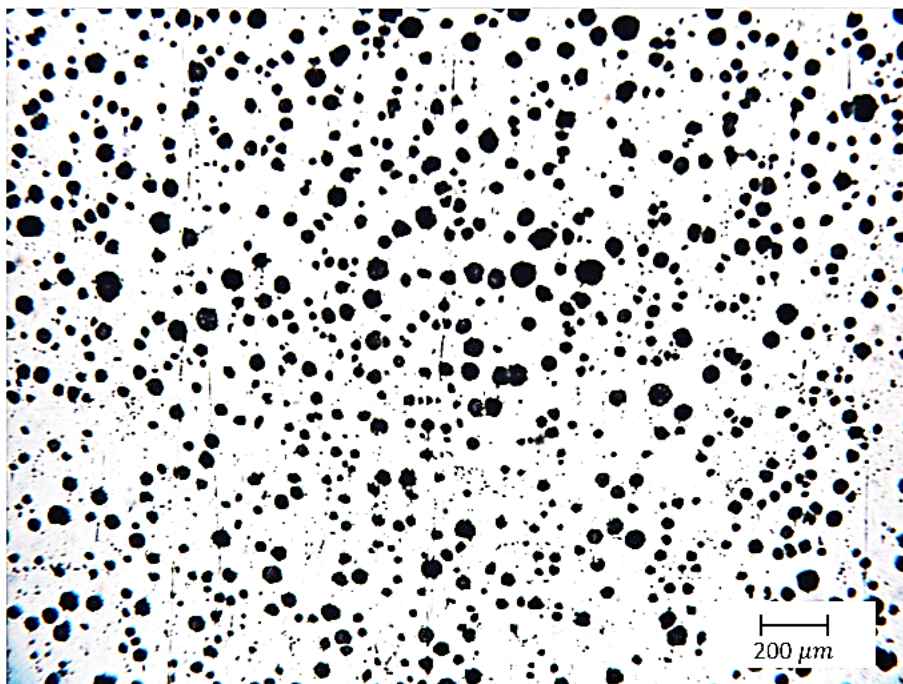


Metalografía 8D. Fotografía correspondiente a la sección 1H: 50mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1352^\circ\text{C}$, 194 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

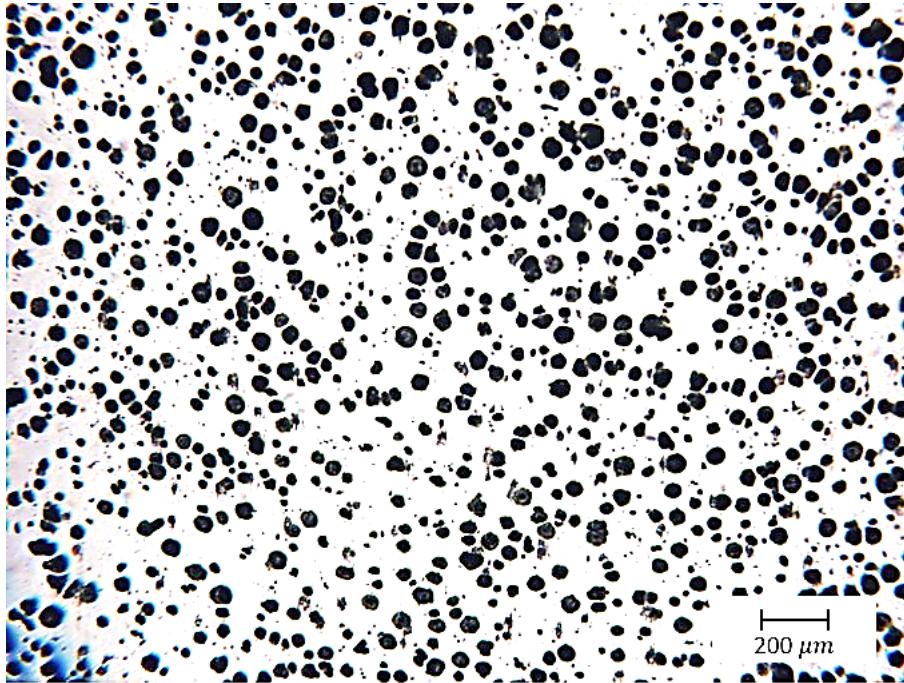


Metalografía 9D. Fotografía correspondiente a la sección 1I: 50mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1324^\circ\text{C}$, 165 nódulos/ mm^2 .

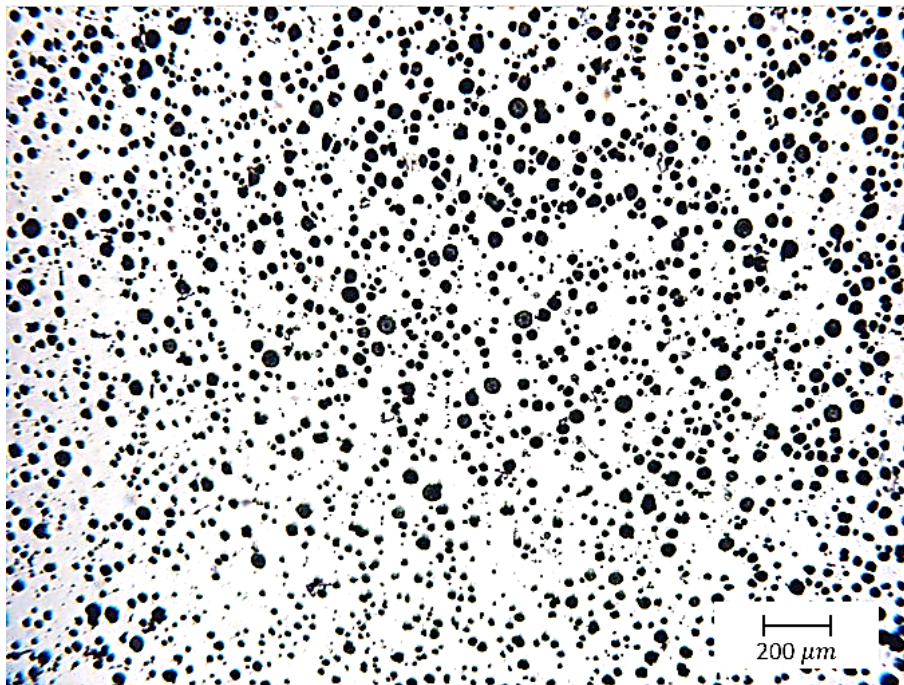


Metalografía 10D. Fotografía correspondiente a la sección 1J: 90mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-75%Si, $T_c=1400^\circ\text{C}$, 242 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

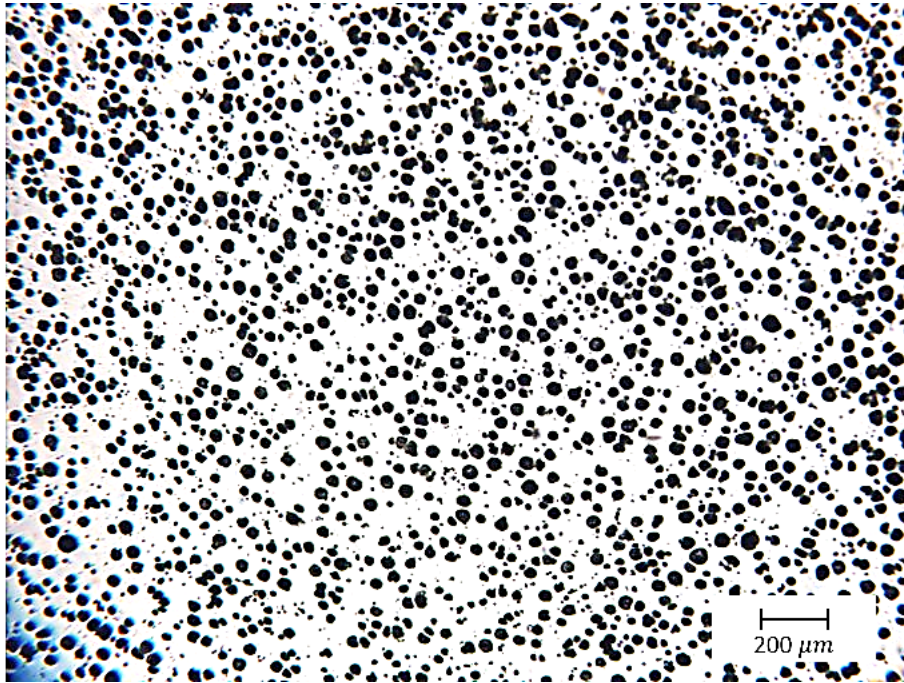


Metalografía 11D. Fotografía correspondiente a la sección 2A: 30mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1384^\circ\text{C}$, 421 nódulos/ mm^2 .

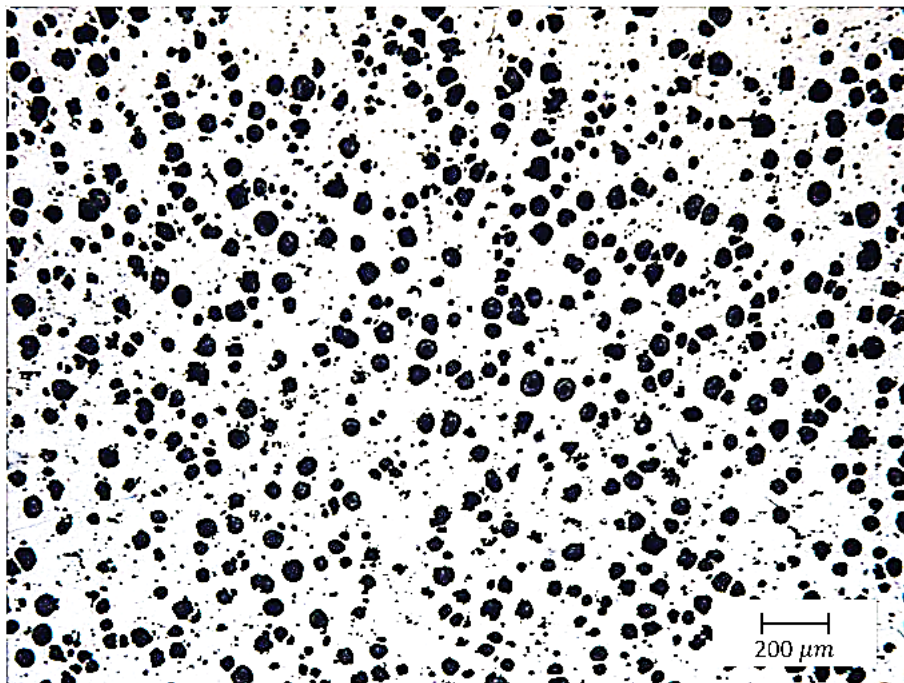


Metalografía 12D. Fotografía correspondiente a la sección 2B: 30mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1369^\circ\text{C}$, 415 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

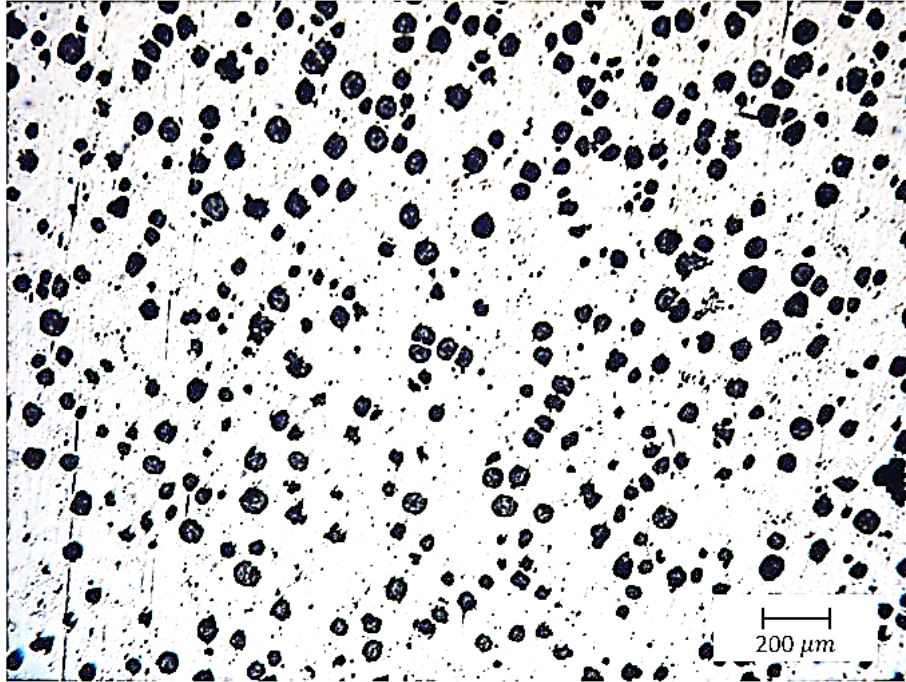


Metalografía 13D. Fotografía correspondiente a la sección 2C: 30mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1345^\circ\text{C}$, 460 nódulos/ mm^2 .

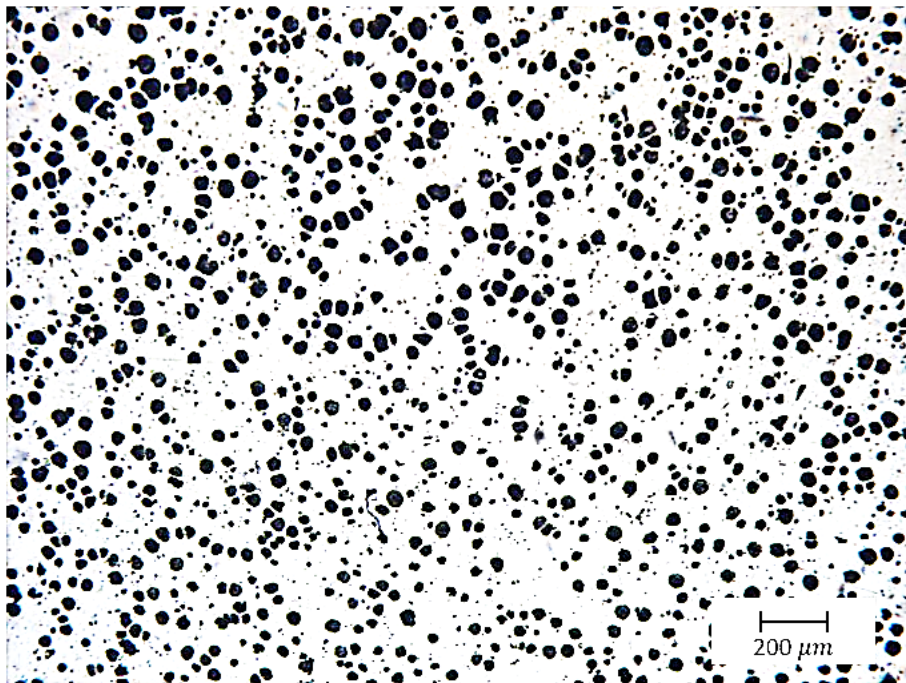


Metalografía 14D. Fotografía correspondiente a la sección 2D: 40mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1384^\circ\text{C}$, 232 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

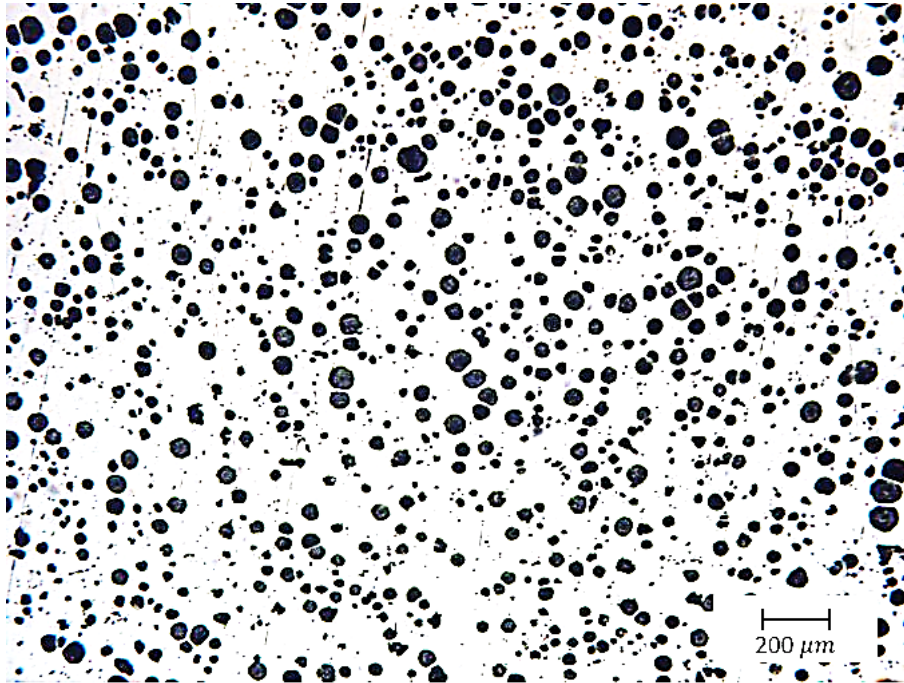


Metalografía 15D. Fotografía correspondiente a la sección 2E: 40mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1369^\circ\text{C}$, 153 nódulos/ mm^2 .

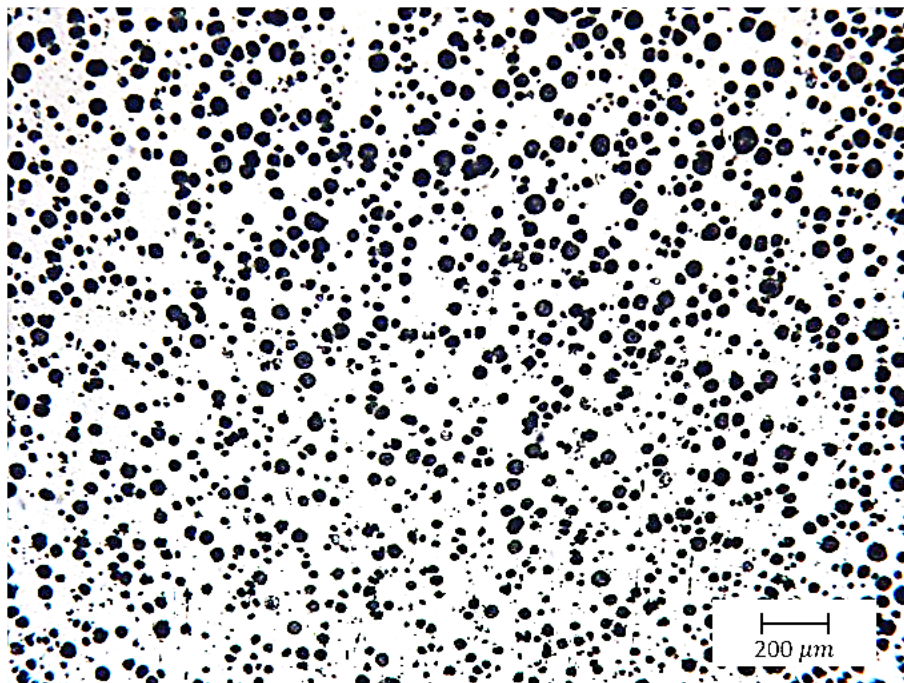


Metalografía 16D. Fotografía correspondiente a la sección 2F: 40mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1354^\circ\text{C}$, 194 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

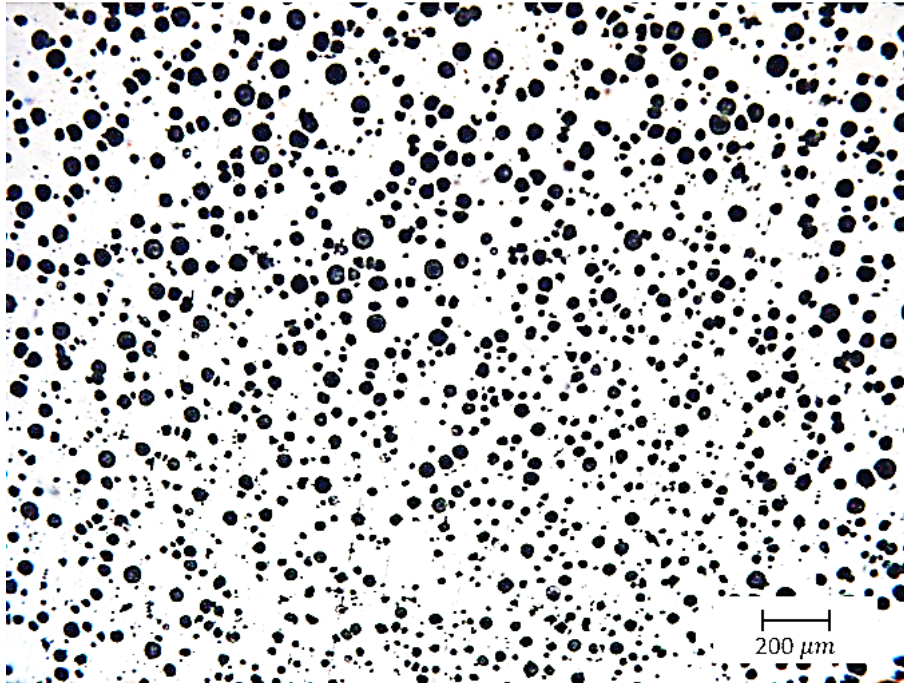


Metalografía 17D. Fotografía correspondiente a la sección 2G: 50mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1384^\circ\text{C}$, 312 nódulos/ mm^2 .

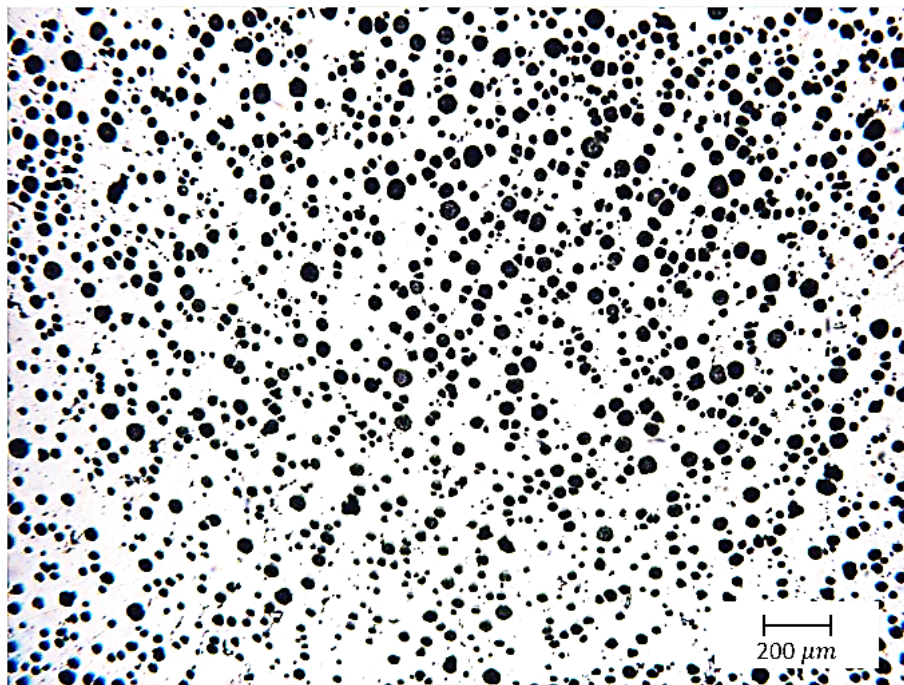


Metalografía 18D. Fotografía correspondiente a la sección 2H: 50mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1369^\circ\text{C}$, 256 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

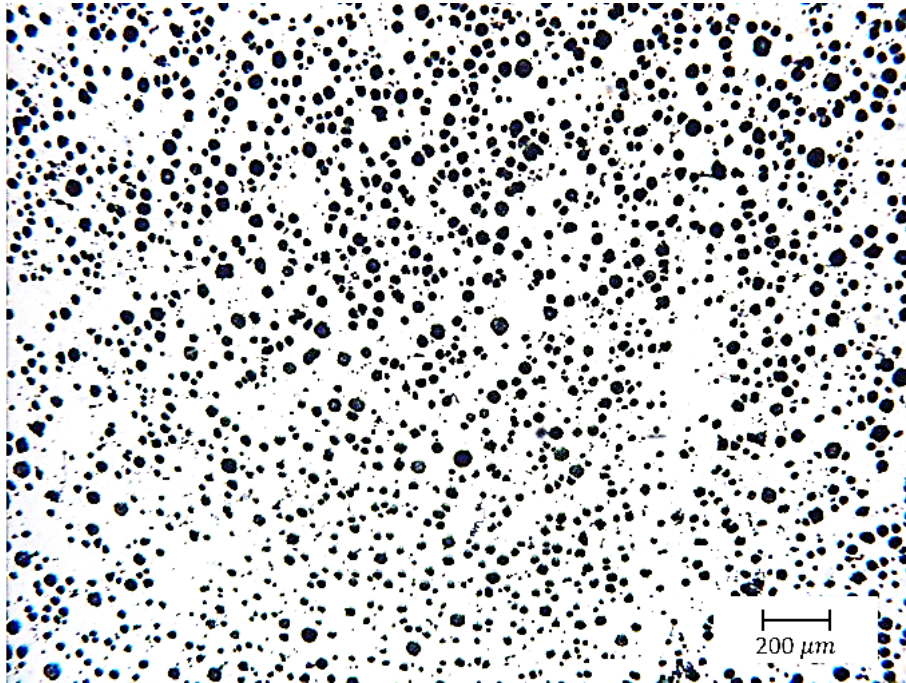


Metalografía 19D. Fotografía correspondiente a la sección 2I: 50mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-75%Si, $T_c=1345^\circ\text{C}$, 284 nódulos/ mm^2 .

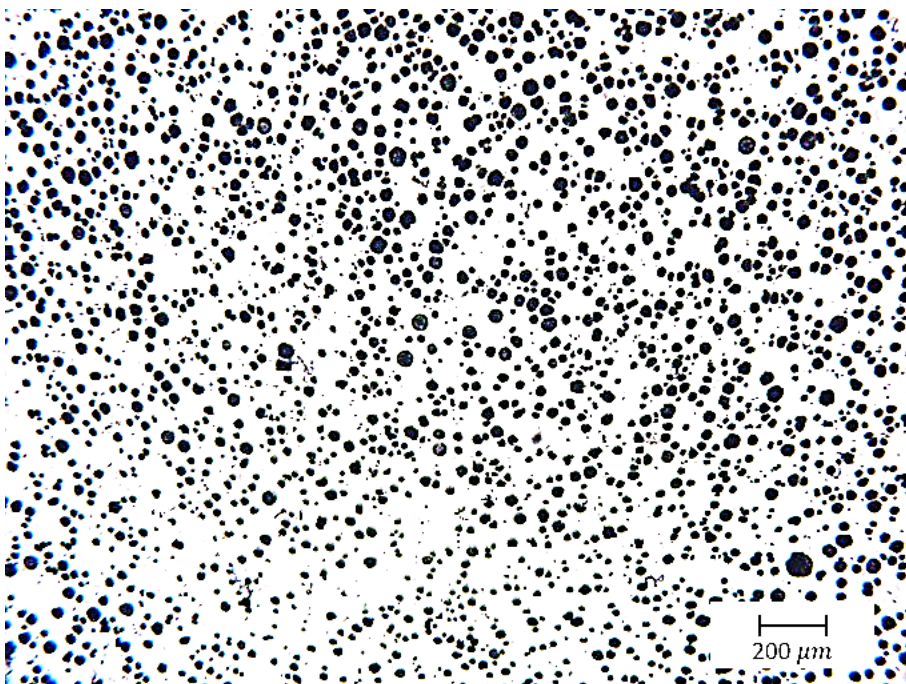


Metalografía 20D. Fotografía correspondiente a la sección 3A: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1390^\circ\text{C}$, 236 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

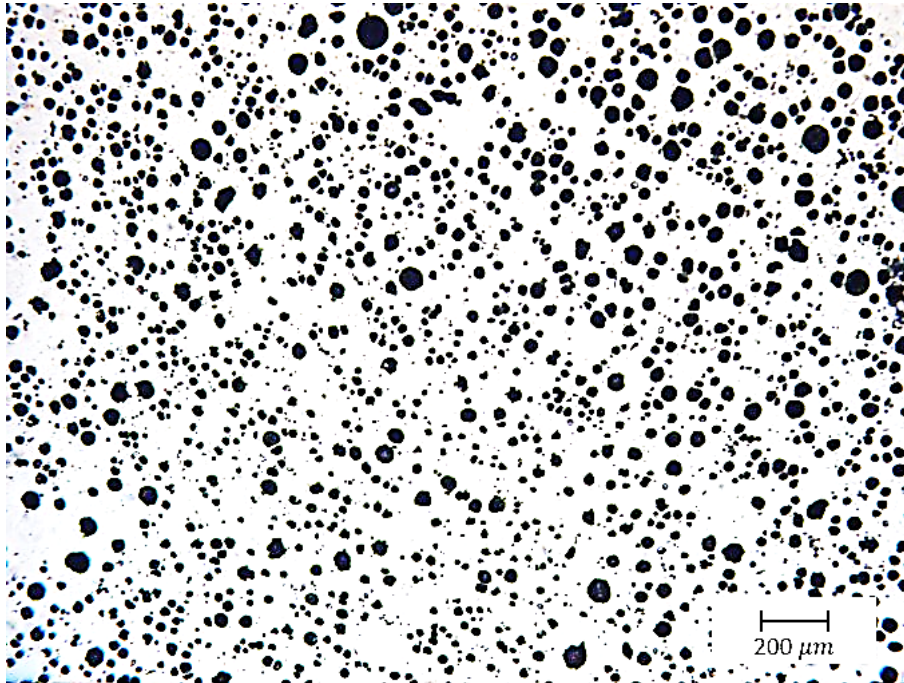


Metalografía 21D. Fotografía correspondiente a la sección 3B: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1365^\circ\text{C}$, 308 nódulos/ mm^2 .

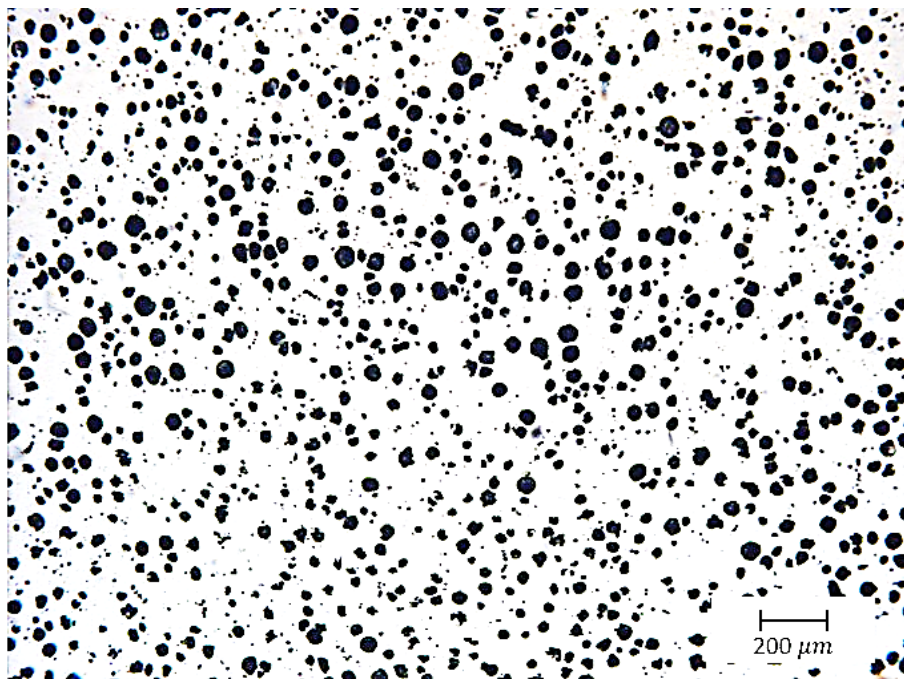


Metalografía 22D. Fotografía correspondiente a la sección 3C: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1352^\circ\text{C}$, 380 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

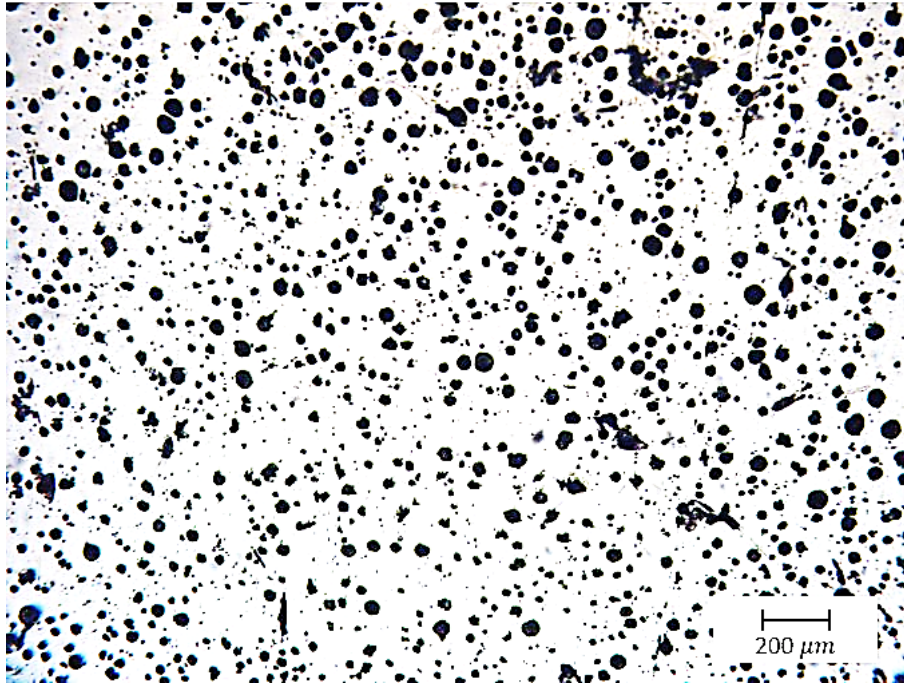


Metalografía 23D. Fotografía correspondiente a la sección 3D: 40mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1390^\circ\text{C}$, 268 nódulos/ mm^2 .

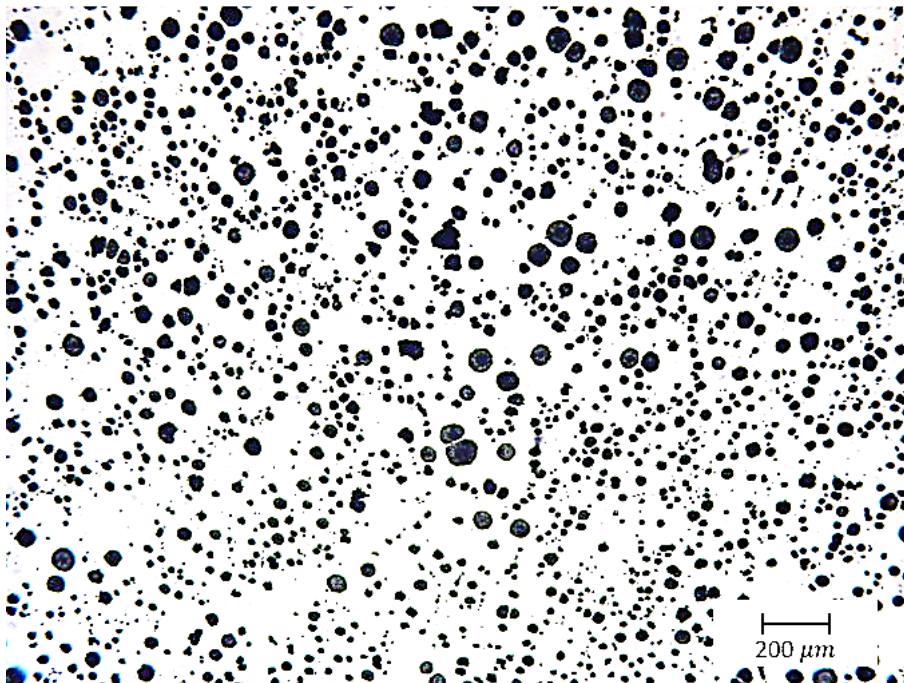


Metalografía 24D. Fotografía correspondiente a la sección 3E: 40mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1365^\circ\text{C}$, 296 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

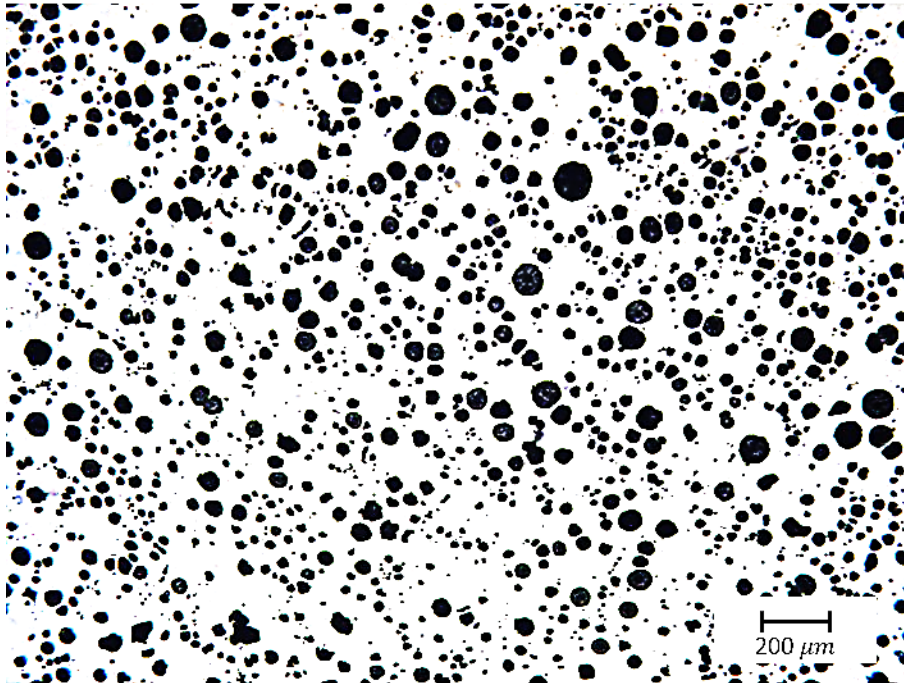


Metalografía 25D. Fotografía correspondiente a la sección 3F: 40mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1352^\circ\text{C}$, 282 nódulos/ mm^2 .

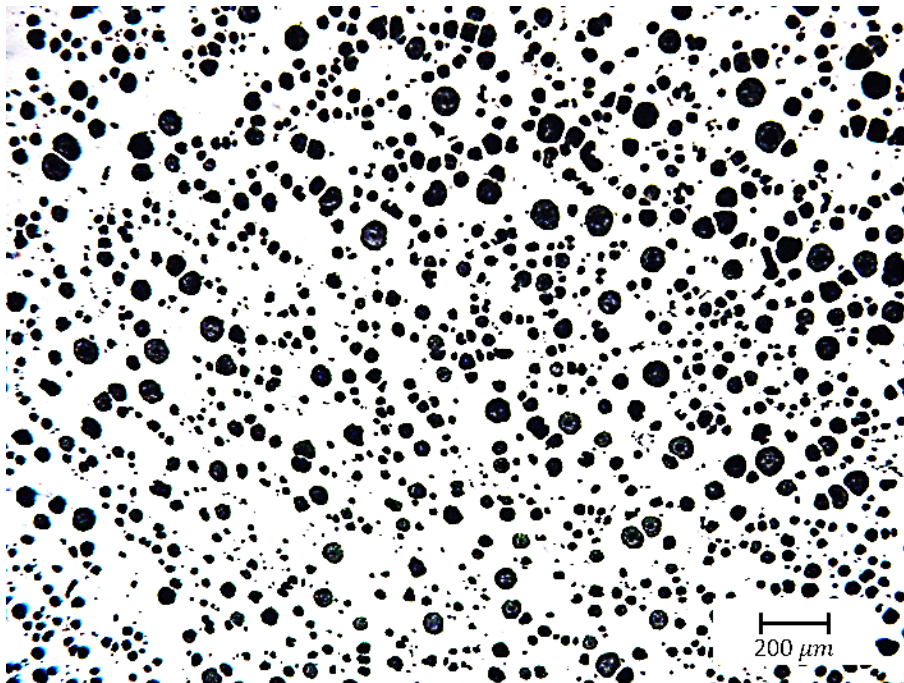


Metalografía 26D. Fotografía correspondiente a la sección 3G: 50mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1390^\circ\text{C}$, 344 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

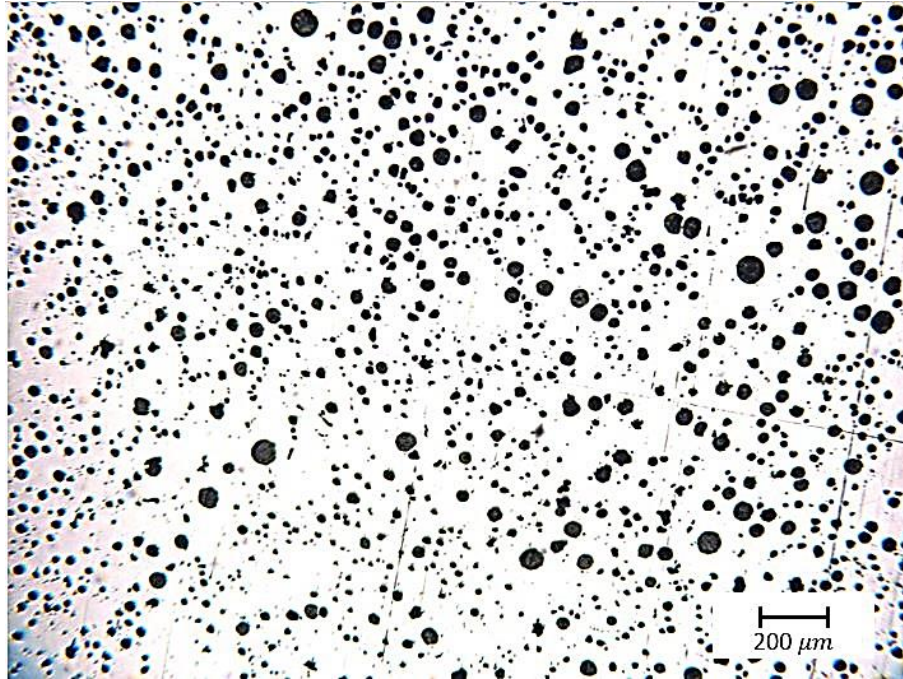


Metalografía 27D. Fotografía correspondiente a la sección 3H: 50mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1365^\circ\text{C}$, 248 nódulos/ mm^2 .

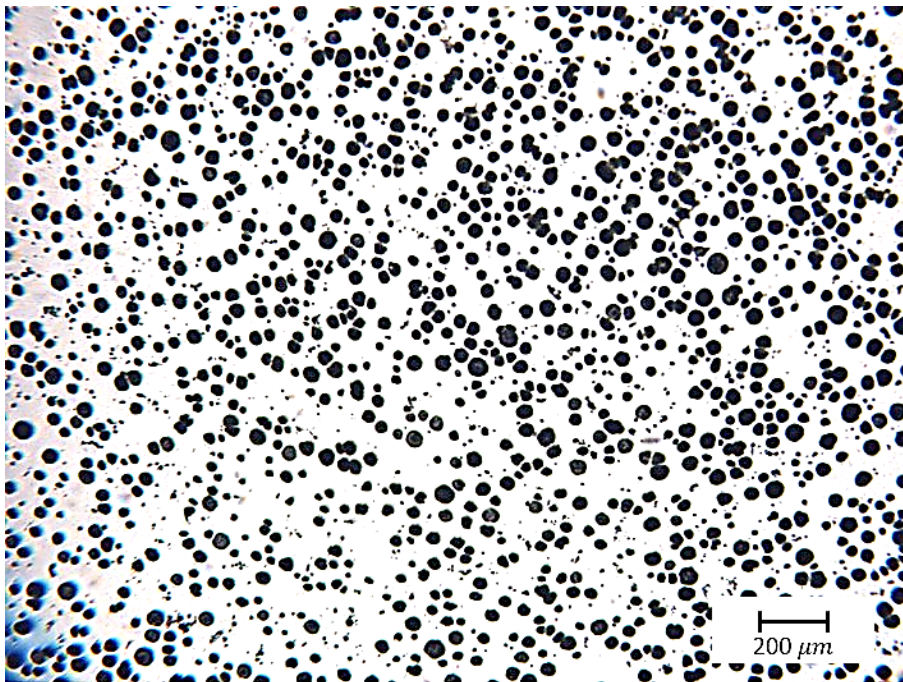


Metalografía 28D. Fotografía correspondiente a la sección 3I: 50mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1352^\circ\text{C}$, 298 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

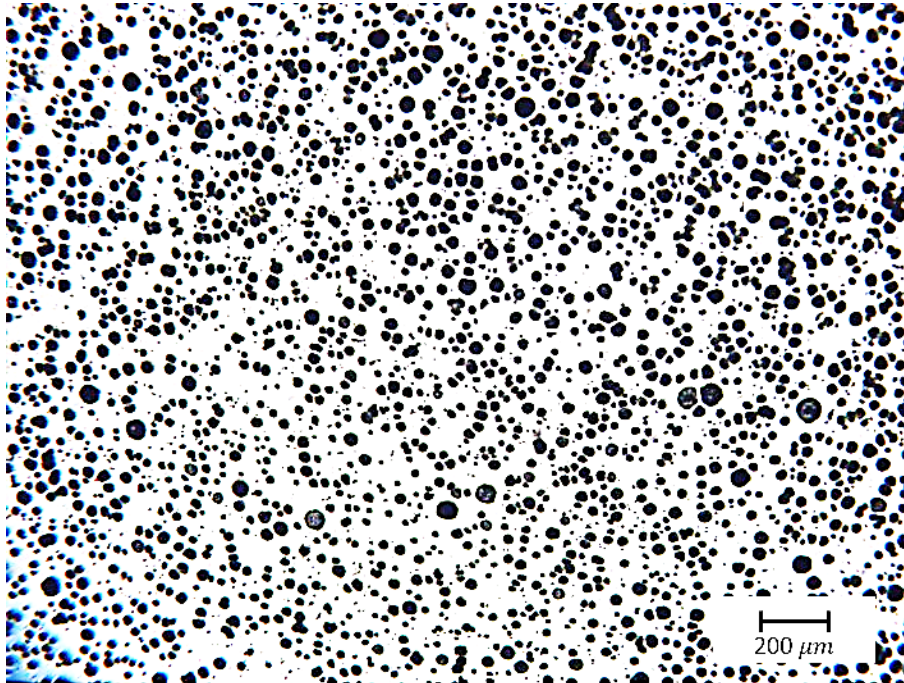


Metalografía 29D. Fotografía correspondiente a la sección 3J: 90mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-75%Si, $T_c=1390^\circ\text{C}$, 356 nódulos/mm².

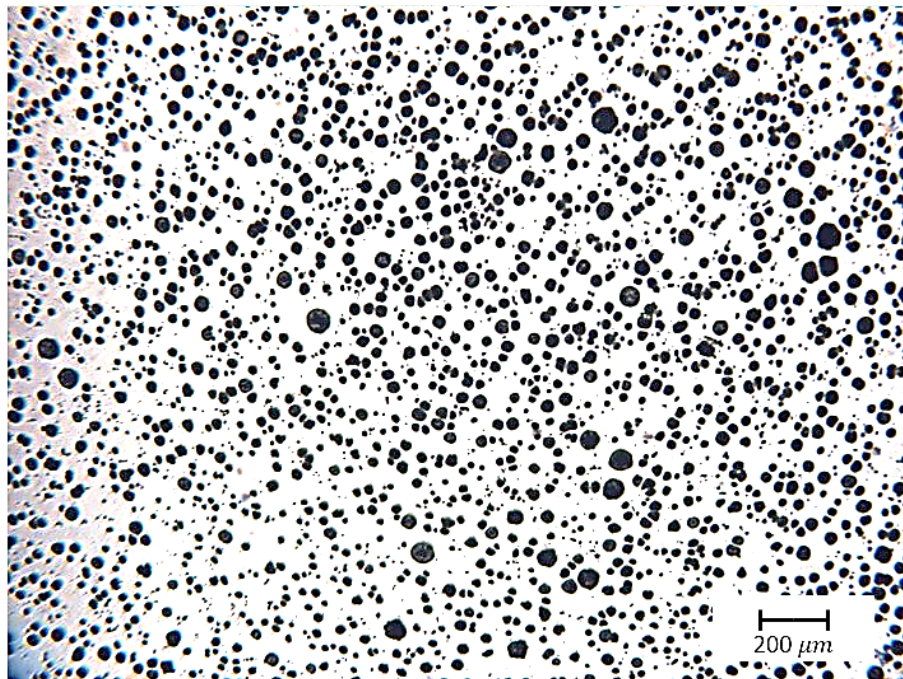


Metalografía 30D. Fotografía correspondiente a la sección 4A: 30mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1377^\circ\text{C}$, 248 nódulos/mm².

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

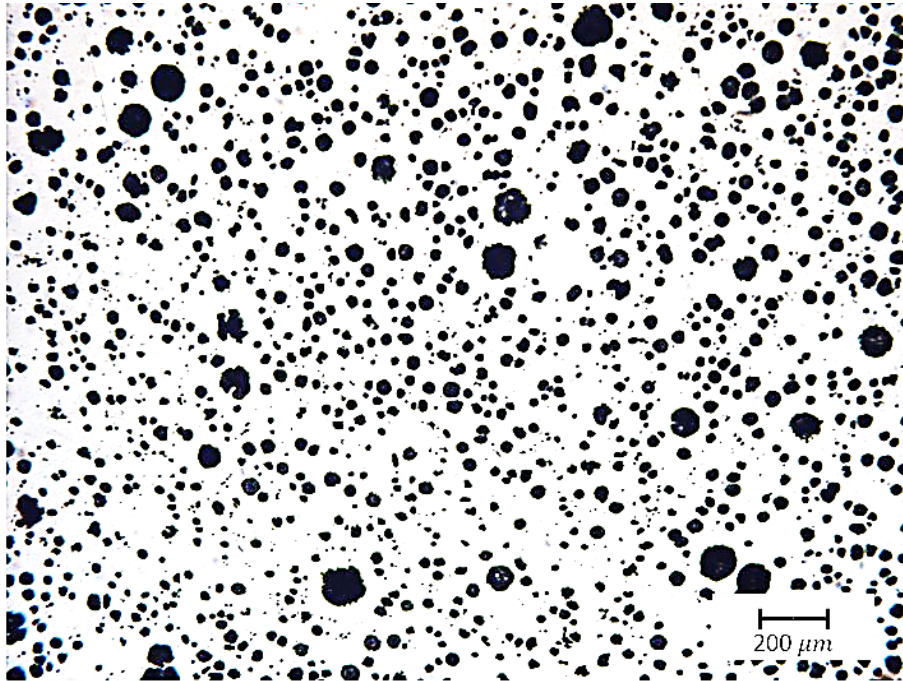


Metalografía 31D. Fotografía correspondiente a la sección 4B: 30mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1321^\circ\text{C}$, 324 nódulos/ mm^2 .

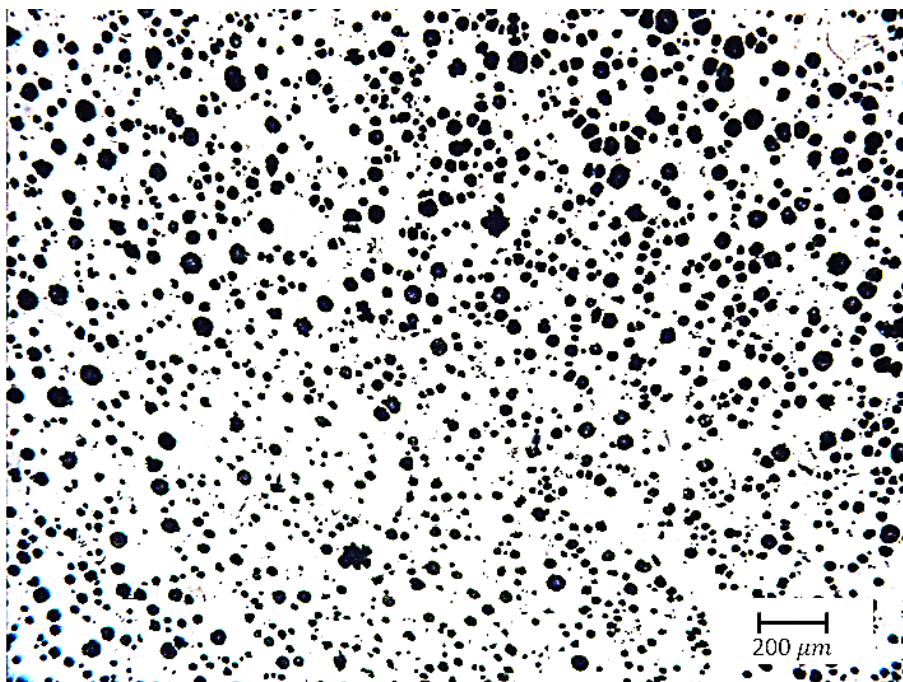


Metalografía 32D. Fotografía correspondiente a la sección 4C: 30mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1304^\circ\text{C}$, 286 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

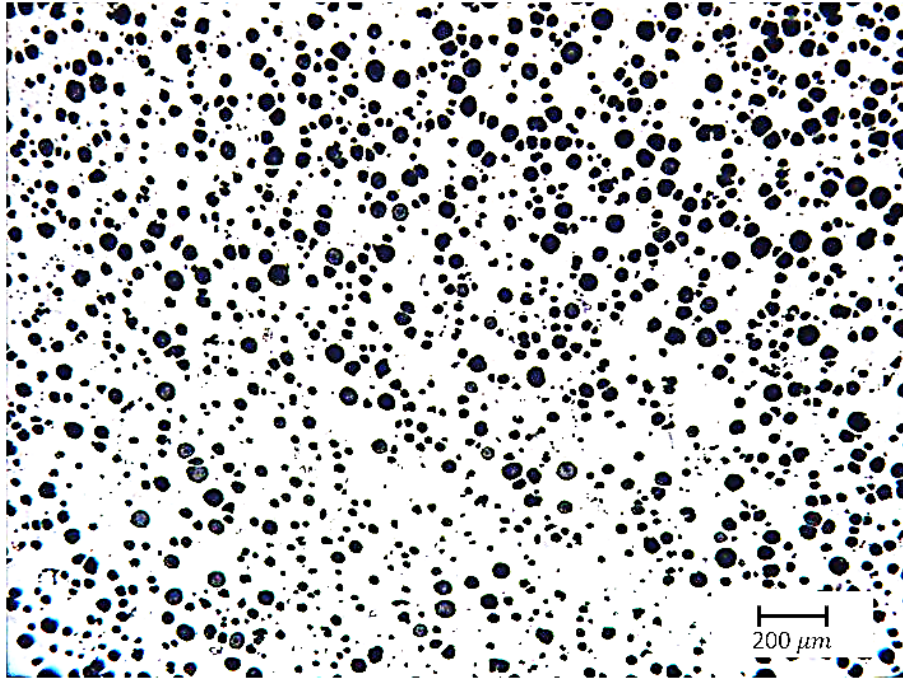


Metalografía 33D. Fotografía correspondiente a la sección 4D: 40mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1377^\circ\text{C}$, 244 nódulos/ mm^2 .

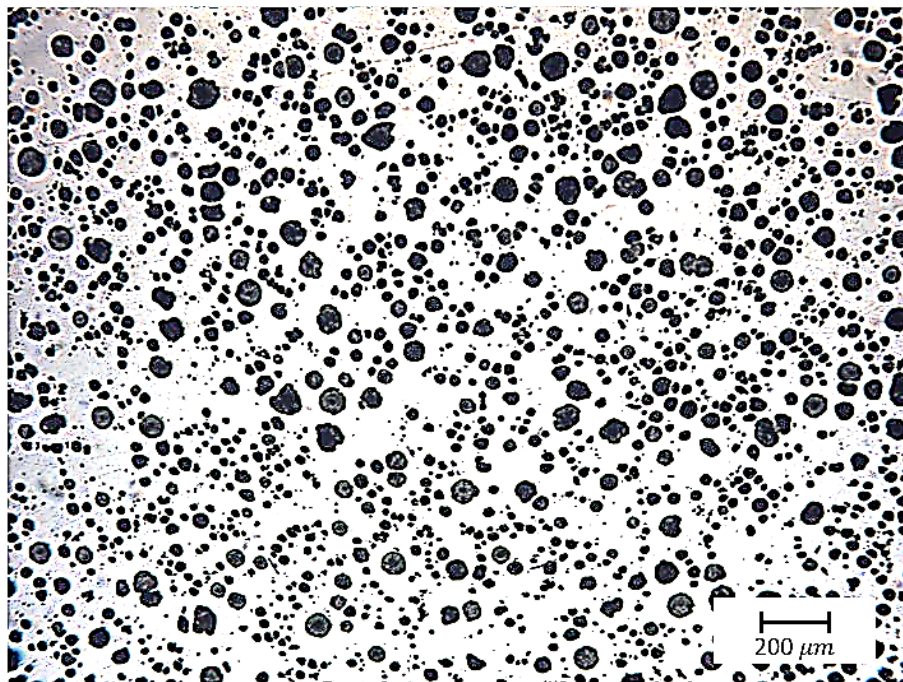


Metalografía 34D. Fotografía correspondiente a la sección 4E: 40mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1321^\circ\text{C}$, 276 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

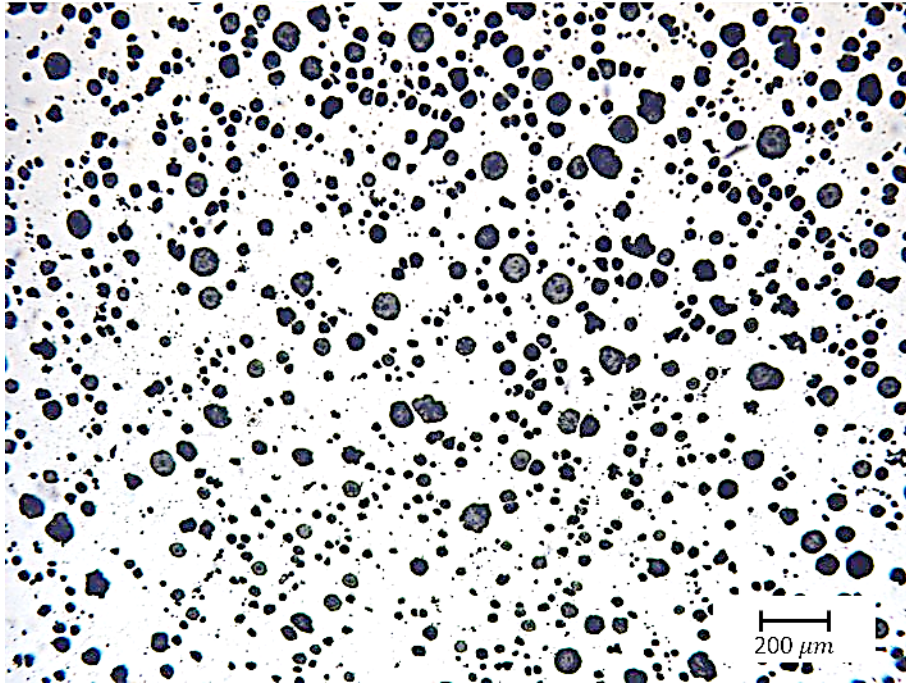


Metalografía 35D. Fotografía correspondiente a la sección 4F: 40mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1304^\circ\text{C}$, 260 nódulos/ mm^2 .

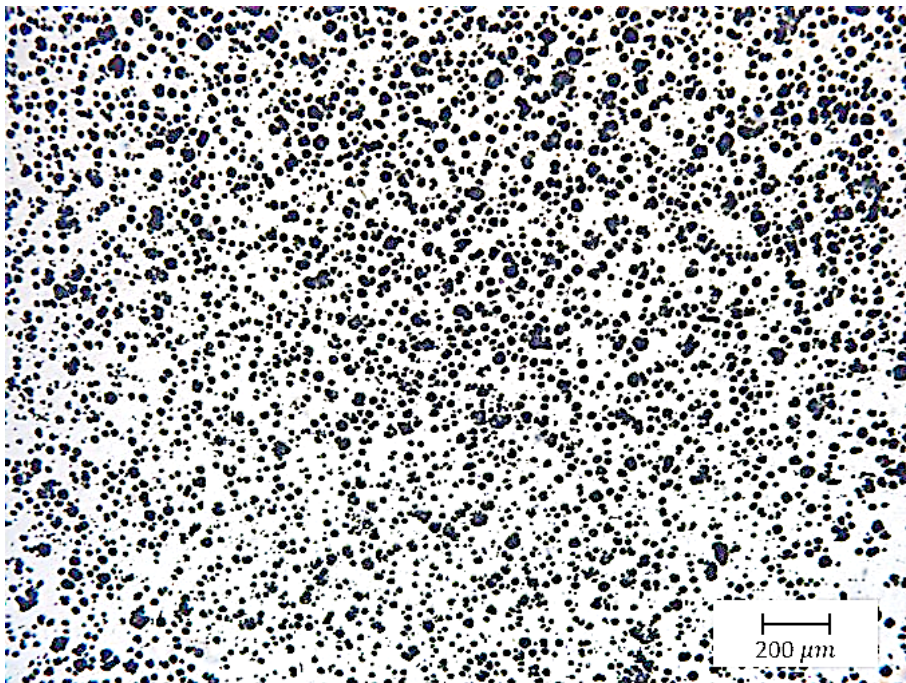


Metalografía 36D. Fotografía correspondiente a la sección 4H: 50mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1321^\circ\text{C}$, 304 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

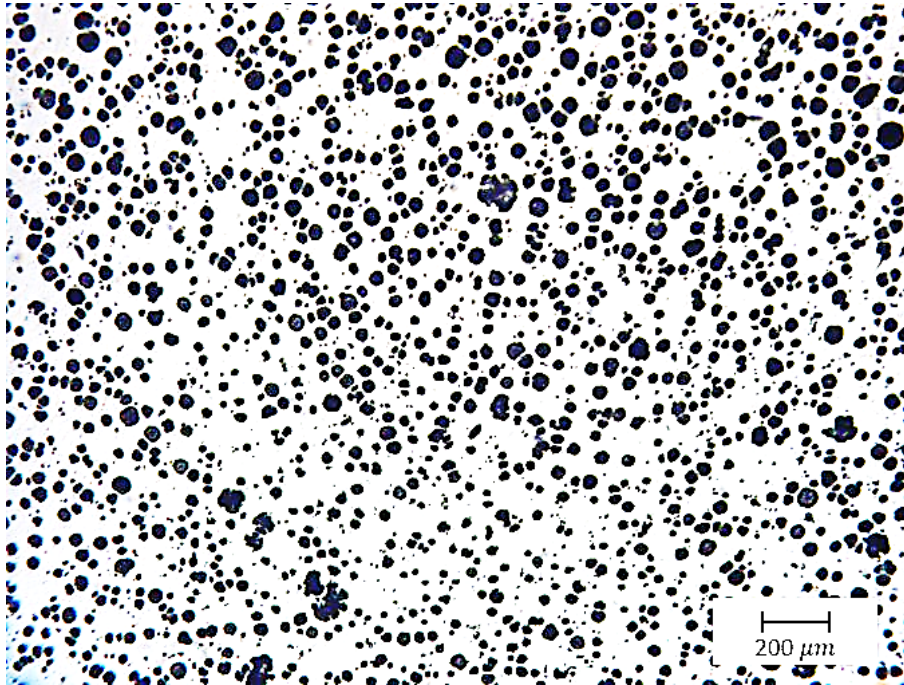


Metalografía 37D. Fotografía correspondiente a la sección 4I: 50mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-75%Si, $T_c=1304^{\circ}\text{C}$, 168 nódulos/ mm^2 .

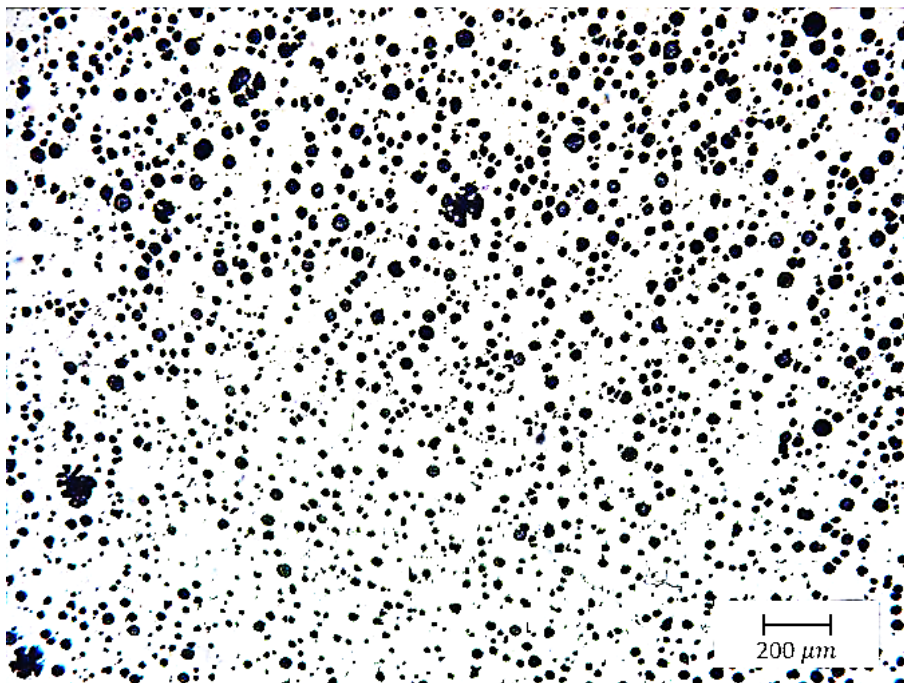


Metalografía 38D. Fotografía correspondiente a la sección 5A: 30mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1384^{\circ}\text{C}$, 392 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

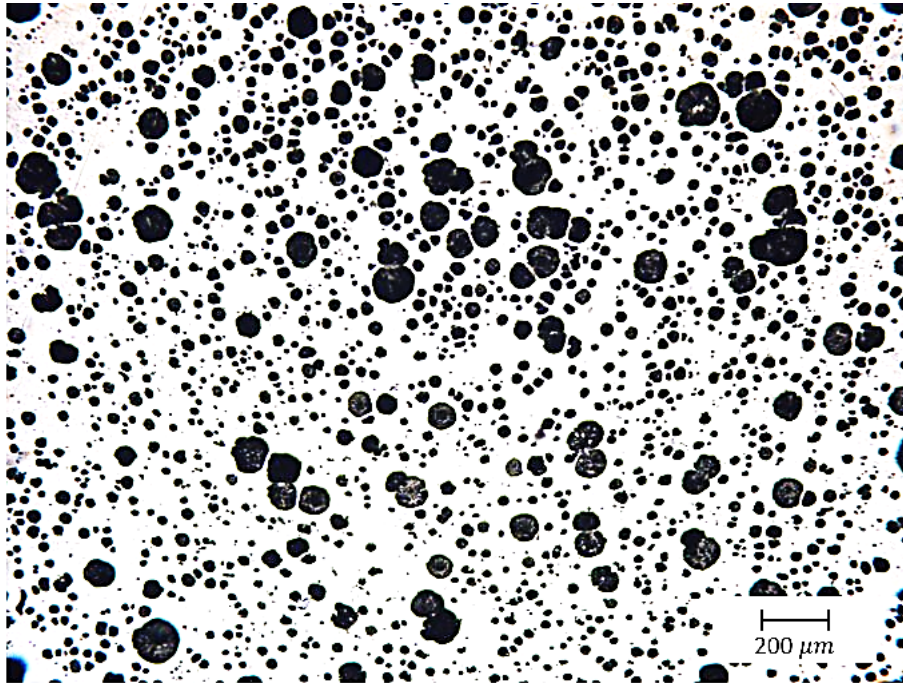


Metalografía 39D. Fotografía correspondiente a la sección 5B: 30mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1378^\circ\text{C}$, 240 nódulos/ mm^2 .

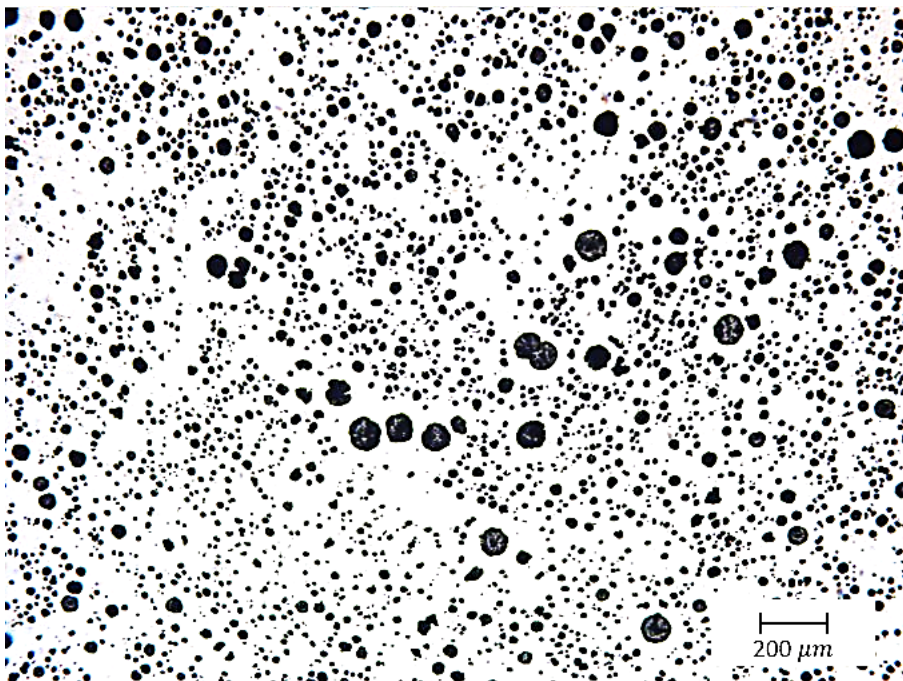


Metalografía 40D. Fotografía correspondiente a la sección 5C: 30mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1360^\circ\text{C}$, 316 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

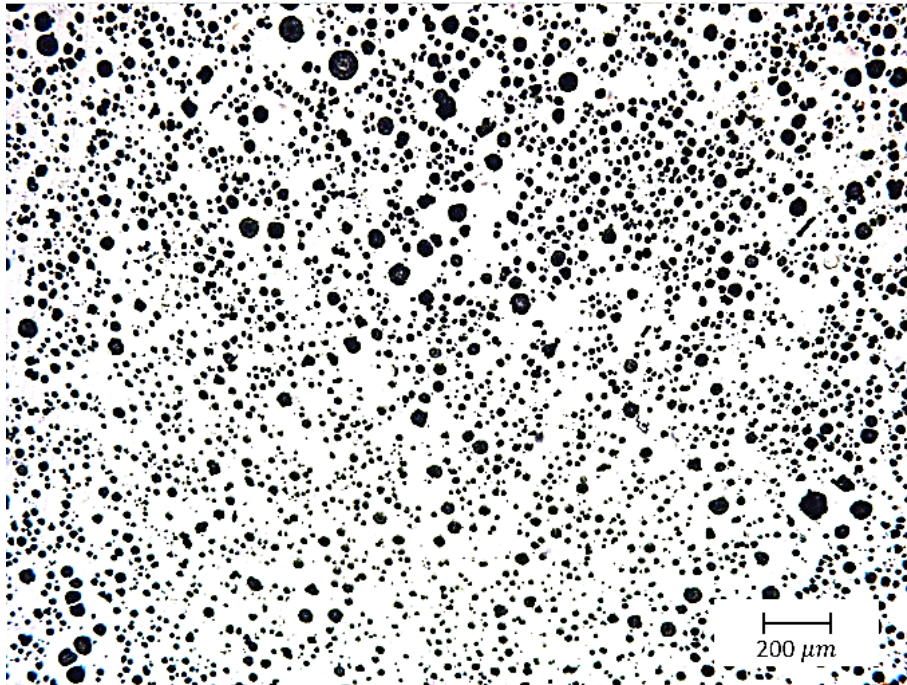


Metalografía 41D. Fotografía correspondiente a la sección 5D: 40mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1384^{\circ}\text{C}$, 296 nódulos/ mm^2 .

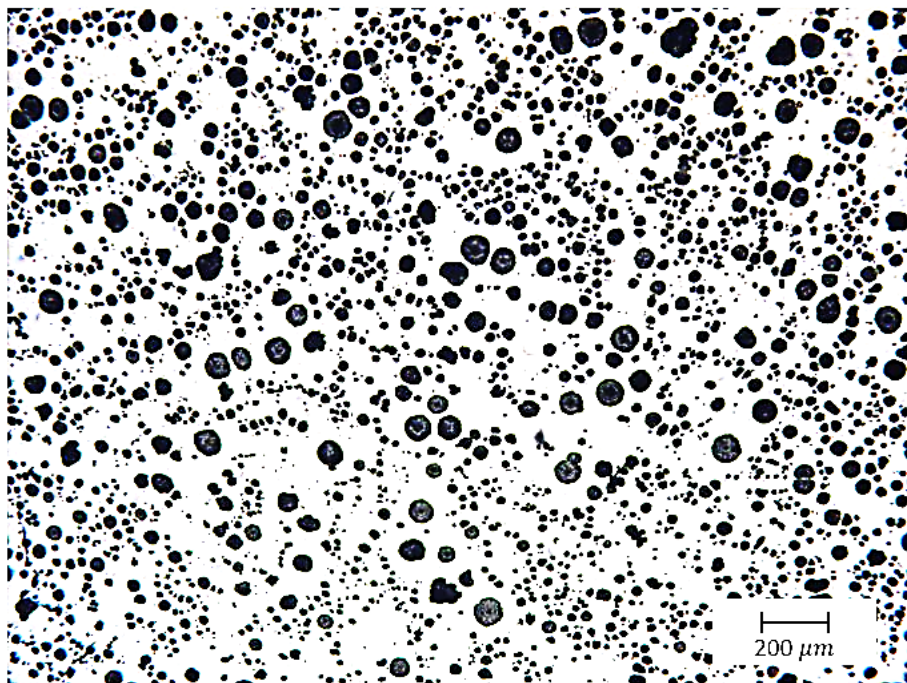


Metalografía 42D. Fotografía correspondiente a la sección 5E: 40mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1378^{\circ}\text{C}$, 456 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

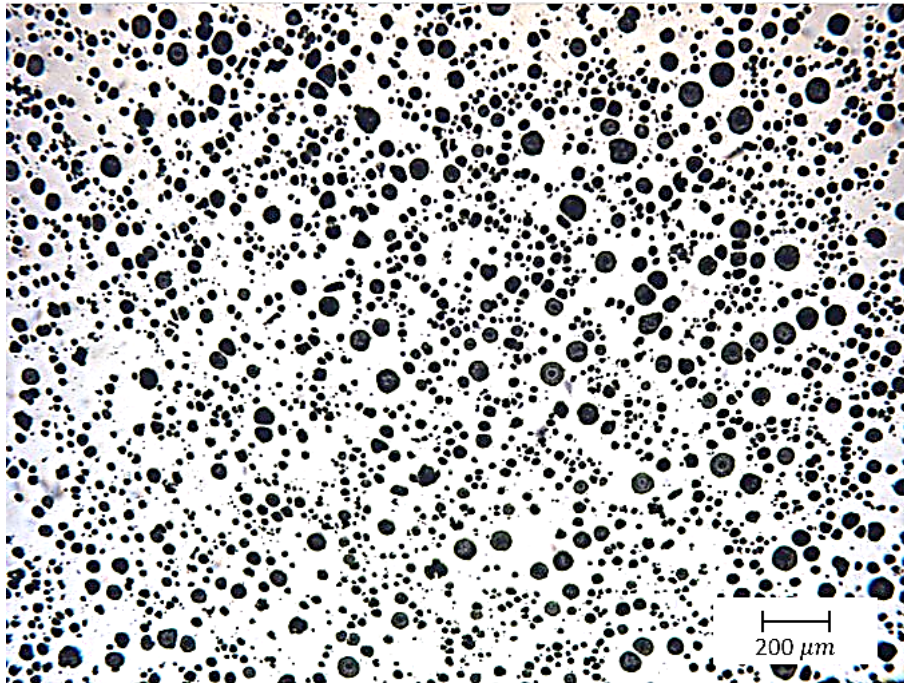


Metalografía 43D. Fotografía correspondiente a la sección 5F: 40mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1360^\circ\text{C}$, 366 nódulos/ mm^2

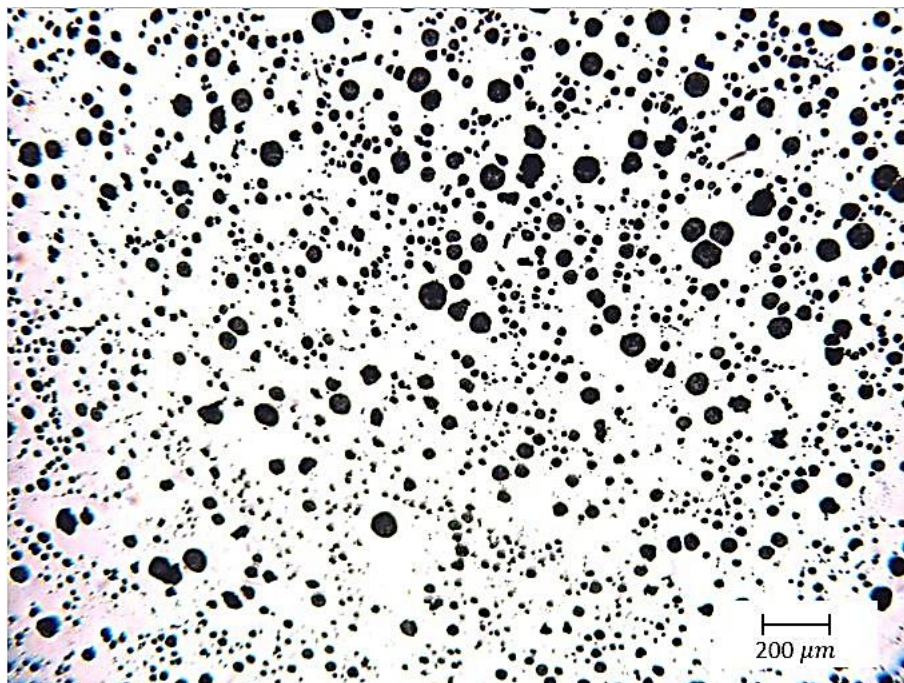


Metalografía 44D. Fotografía correspondiente a la sección 5G: 50mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75Si, $T_c=1384^\circ\text{C}$, 434 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

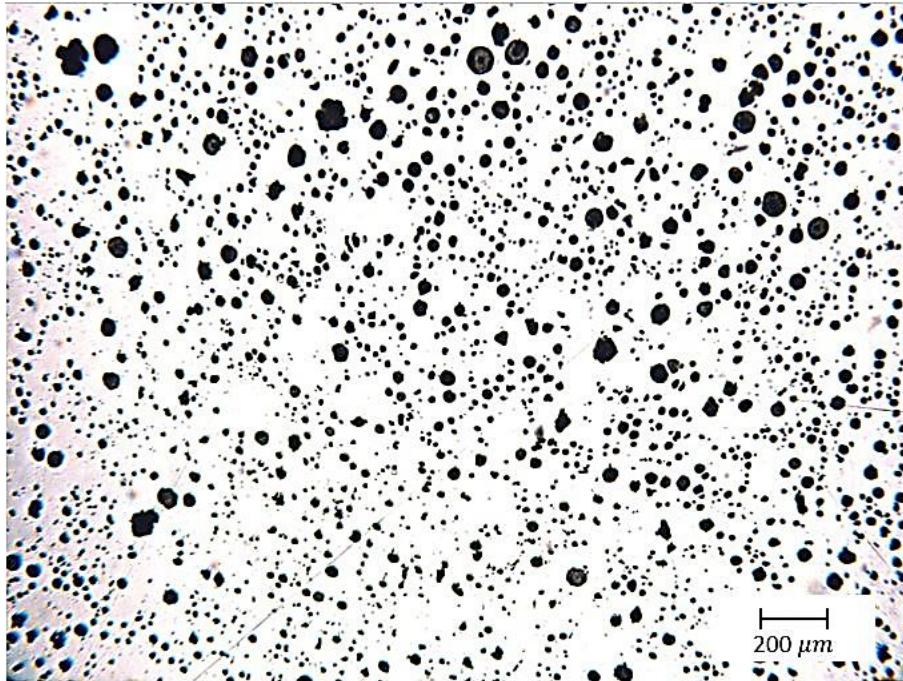


Metalografía 45D. Fotografía correspondiente a la sección 5H: 50mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1378^\circ\text{C}$, 496 nódulos/ mm^2 .

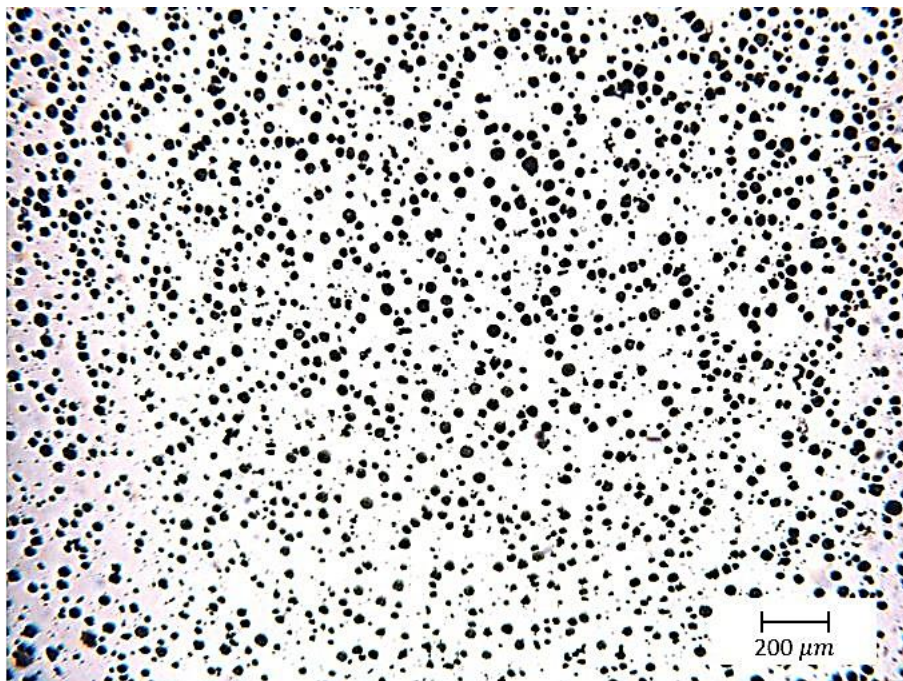


Metalografía 46D. Fotografía correspondiente a la sección 5I: 50mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1360^\circ\text{C}$, 455 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

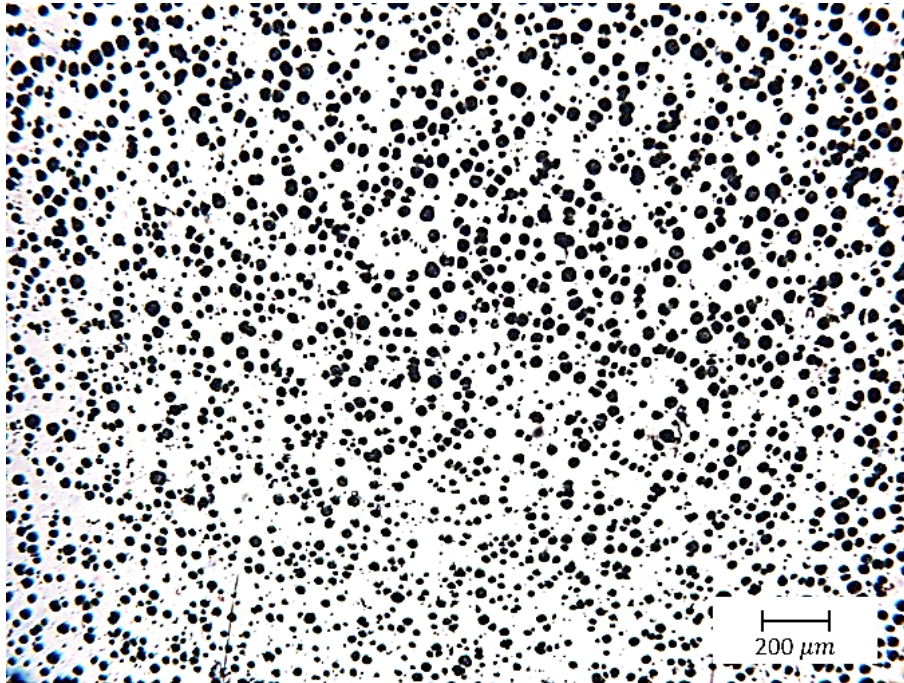


Metalografía 47D. Fotografía correspondiente a la sección 5J: 90mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-75%Si, $T_c=1384^\circ\text{C}$, 436 nódulos/ mm^2 .

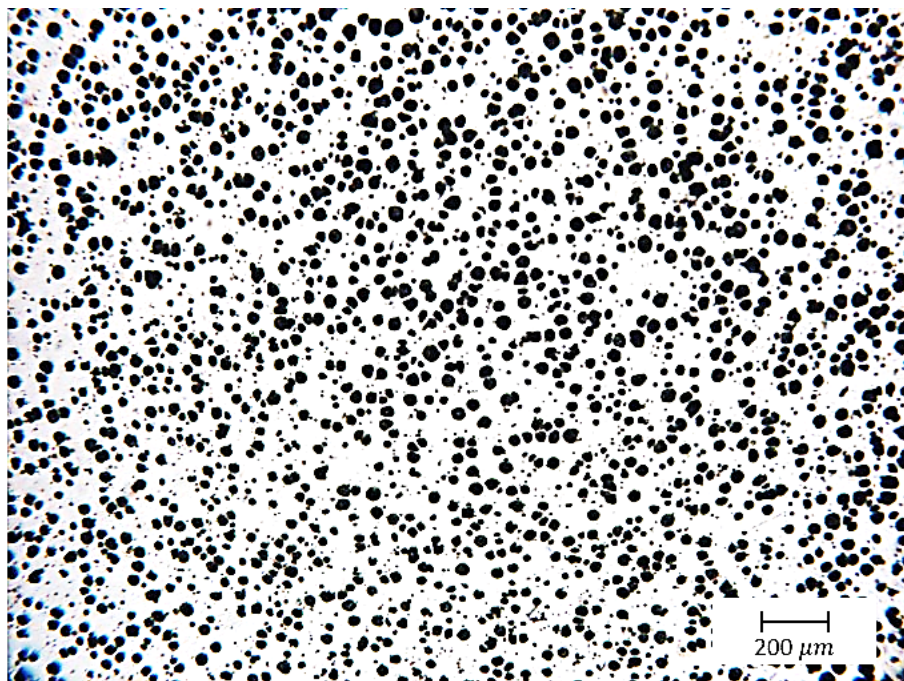


Metalografía 48D. Fotografía correspondiente a la sección 6A: 30mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1375^\circ\text{C}$, 428 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

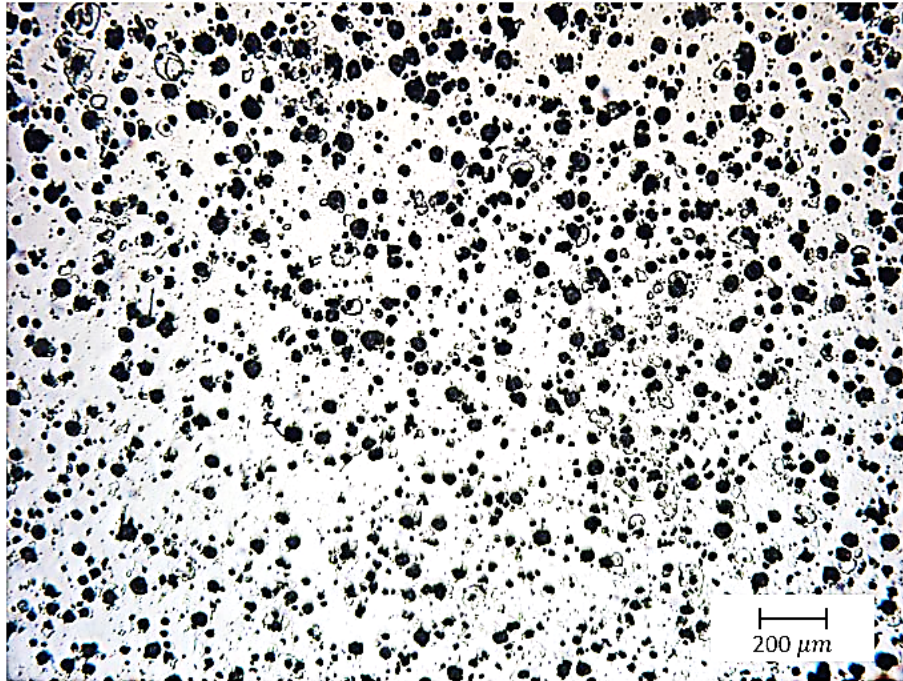


Metalografía 49D. Fotografía correspondiente a la sección 6B: 30mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1356^\circ\text{C}$, 524 nódulos/ mm^2 .

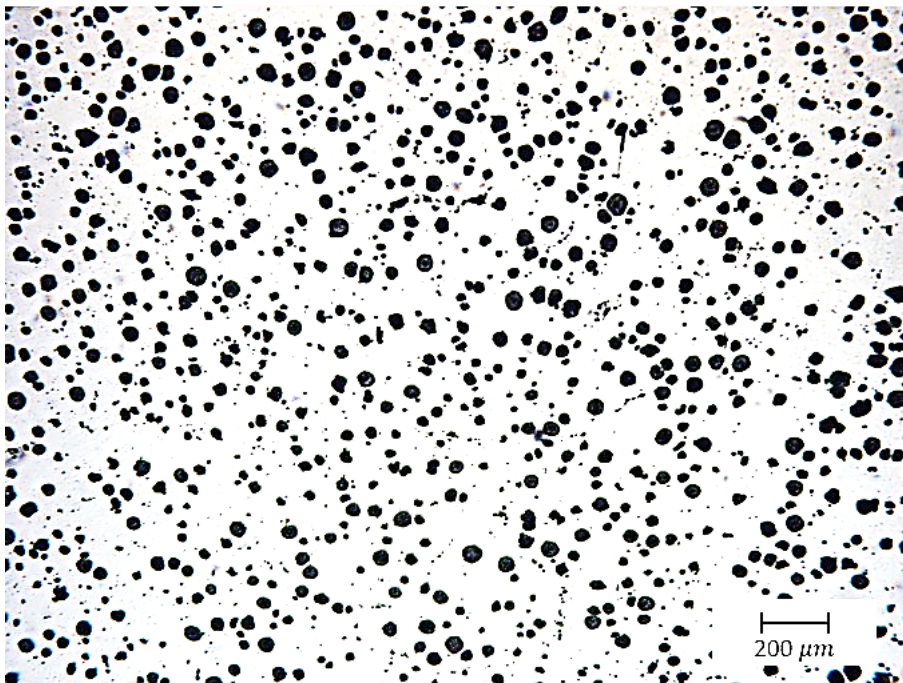


Metalografía 50D. Fotografía correspondiente a la sección 6C: 30mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1320^\circ\text{C}$, 479 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

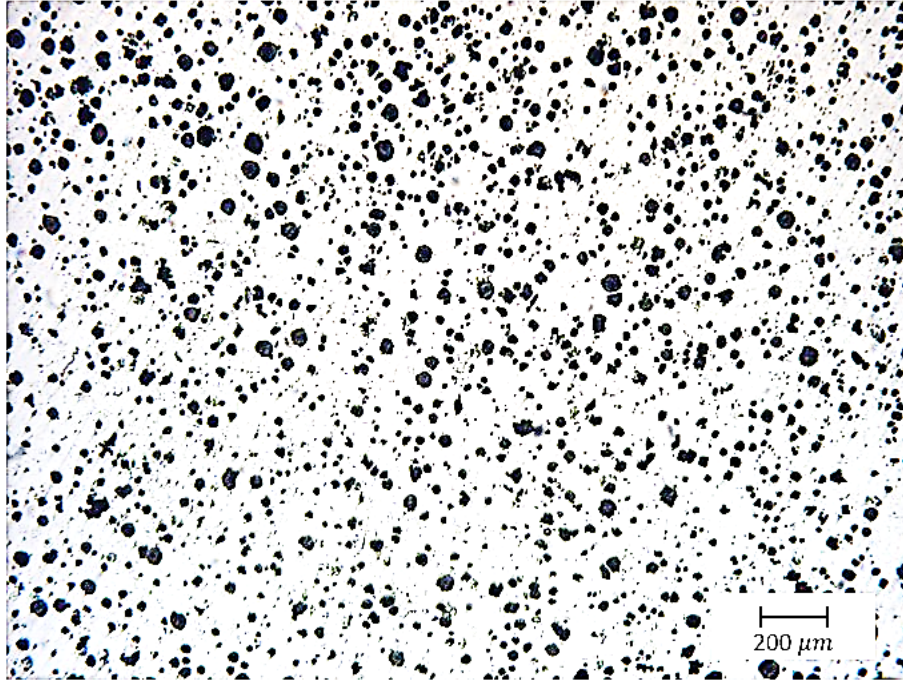


Metalografía 51D. Fotografía correspondiente a la sección 6D: 40mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1375^\circ\text{C}$, 404 nódulos/ mm^2 .

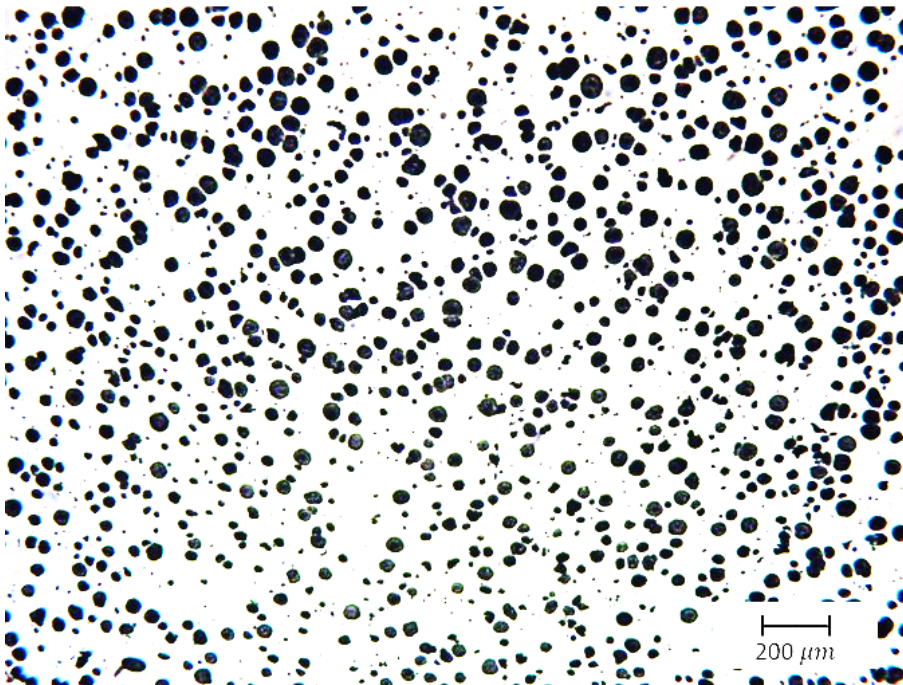


Metalografía 52D. Fotografía correspondiente a la sección 6E: 40mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1356^\circ\text{C}$, 392 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

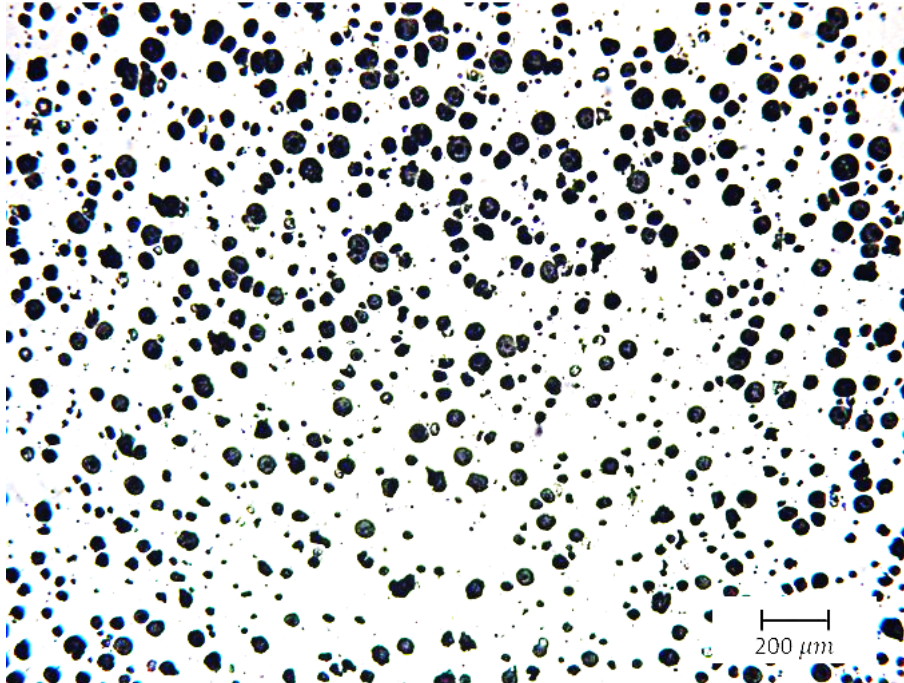


Metalografía 53D. Fotografía correspondiente a la sección 6F: 40mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1320^{\circ}\text{C}$, 388 nódulos/ mm^2 .

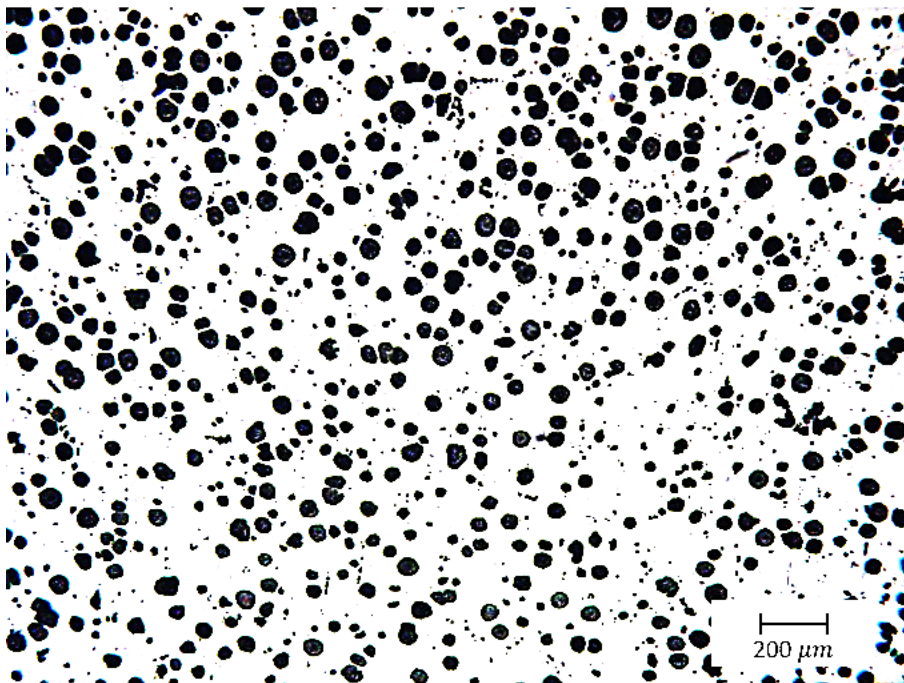


Metalografía 54D. Fotografía correspondiente a la sección 6G: 50mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1375^{\circ}\text{C}$, 316 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

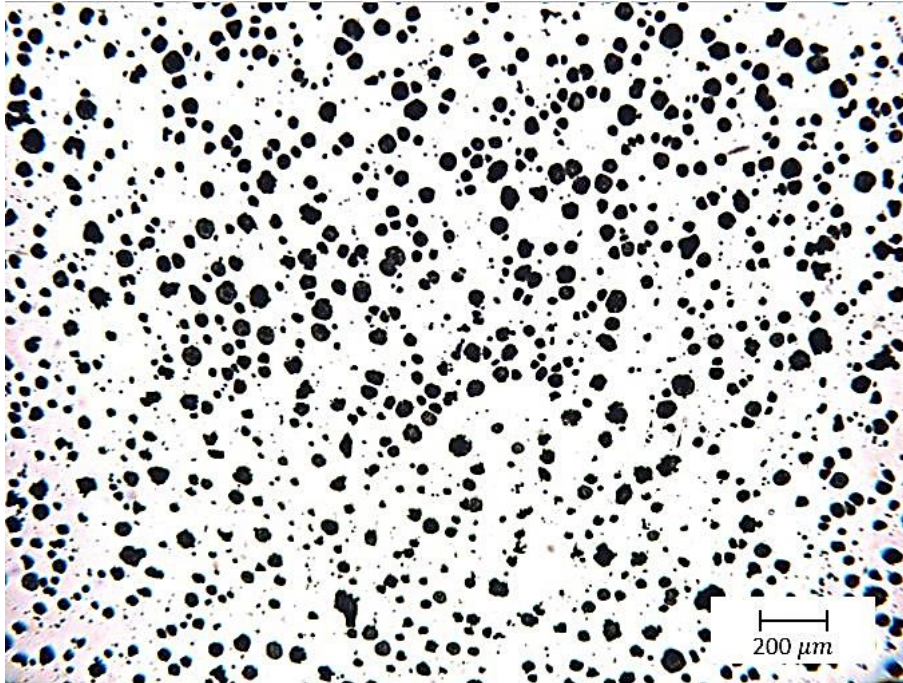


Metalografía 55D. Fotografía correspondiente a la sección 6H: 50mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-63%Si-4.5%Ba, $T_c=1356^\circ\text{C}$, 330 nódulos/ mm^2 .

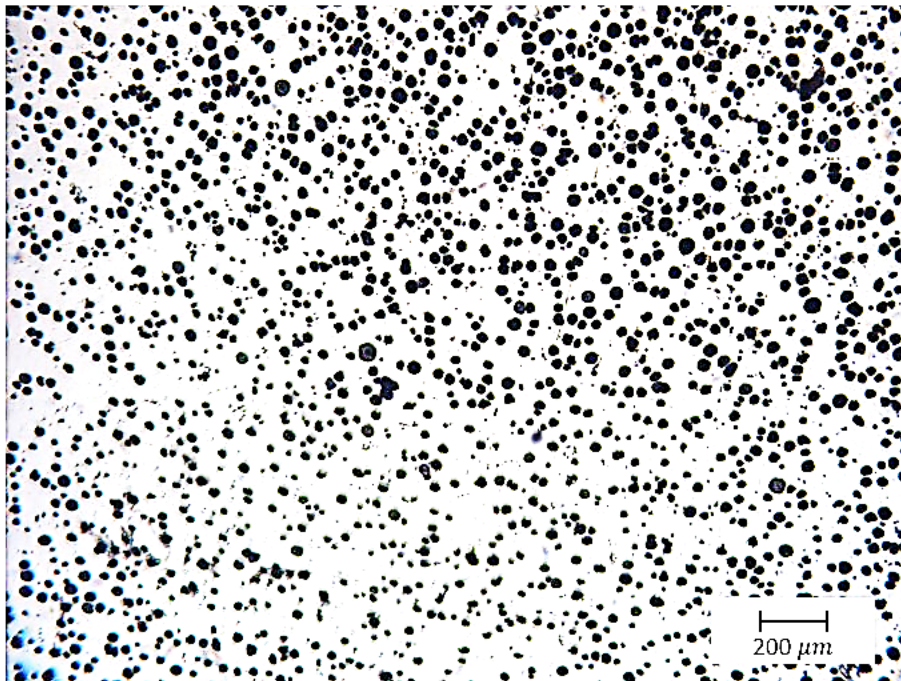


Metalografía 56D. Fotografía correspondiente a la sección 6I: 50mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-63%Si-4.5%Ba, $T_c=1320^\circ\text{C}$, 344 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

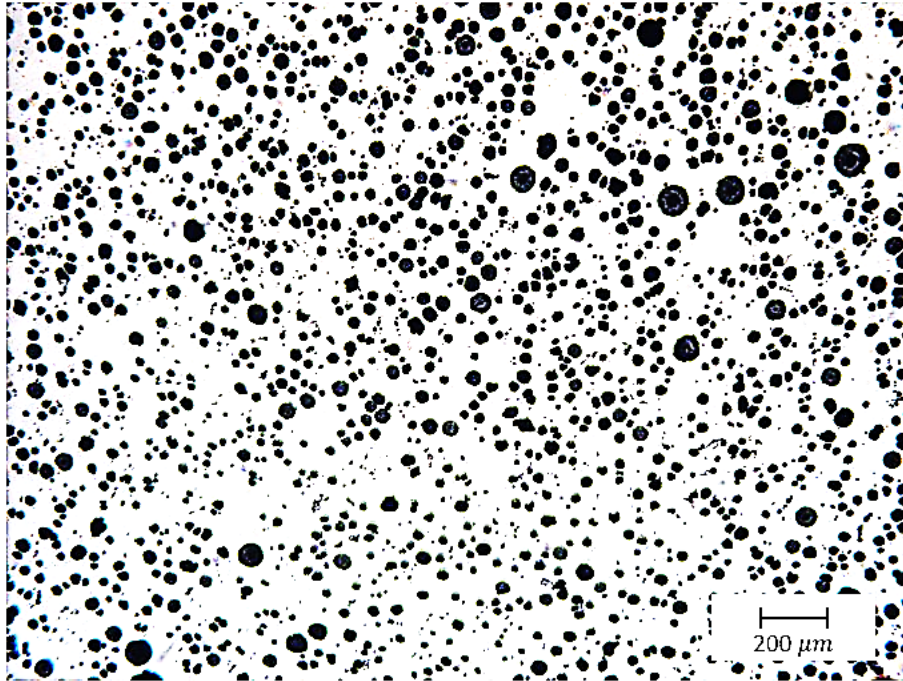


Metalografía 57D. Fotografía correspondiente a la sección 6J: 90mm, nivel de postinoculación 0.05% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1375^\circ\text{C}$, 372 nódulos/ mm^2 .

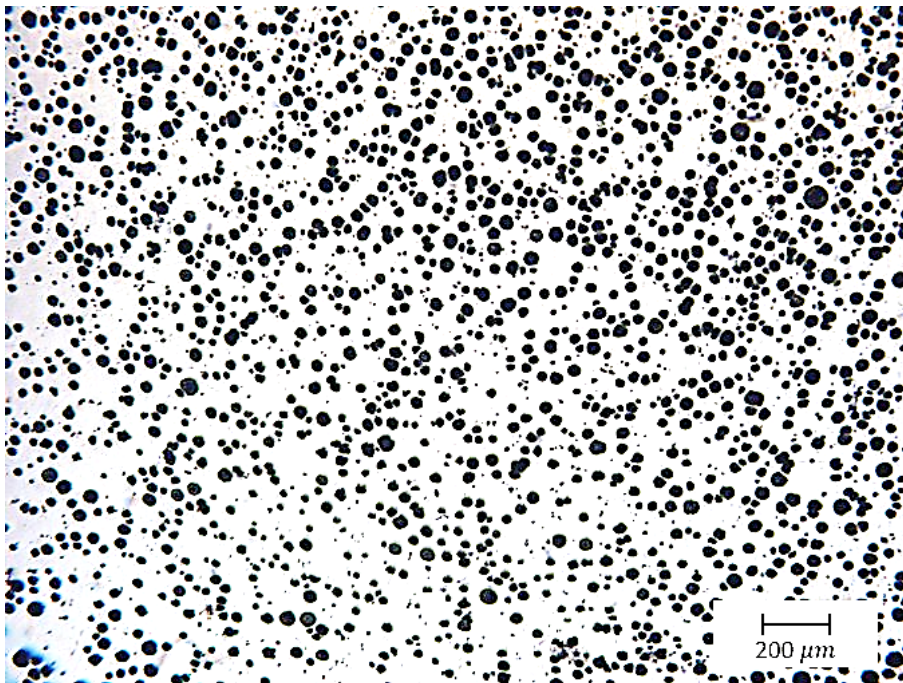


Metalografía 58D. Fotografía correspondiente a la sección 7A: 30mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1387^\circ\text{C}$, 524 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

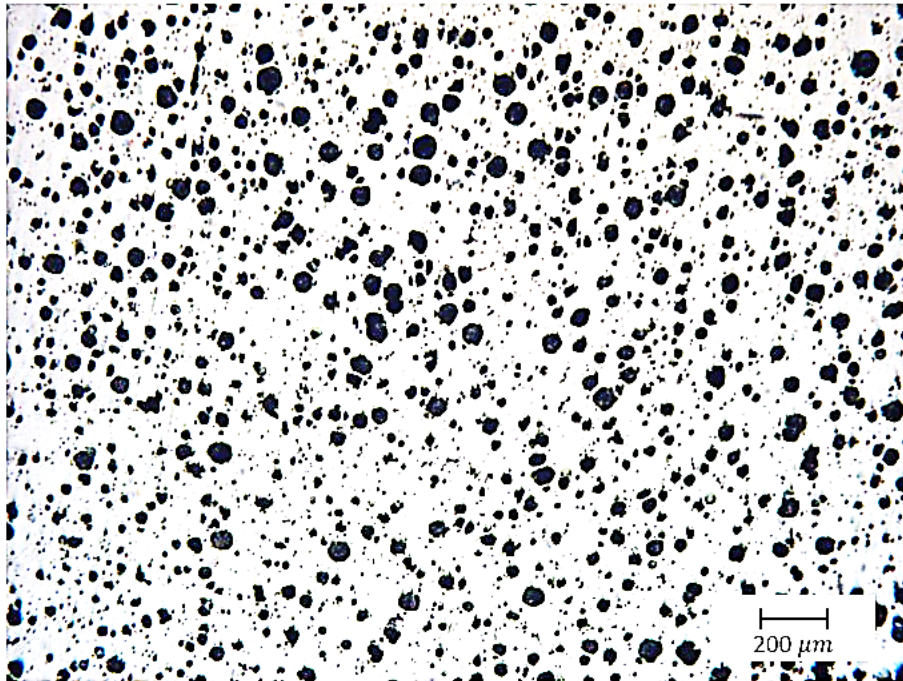


Metalografía 59D. Fotografía correspondiente a la sección 7B: 30mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1364^\circ\text{C}$, 484 nódulos/ mm^2 .

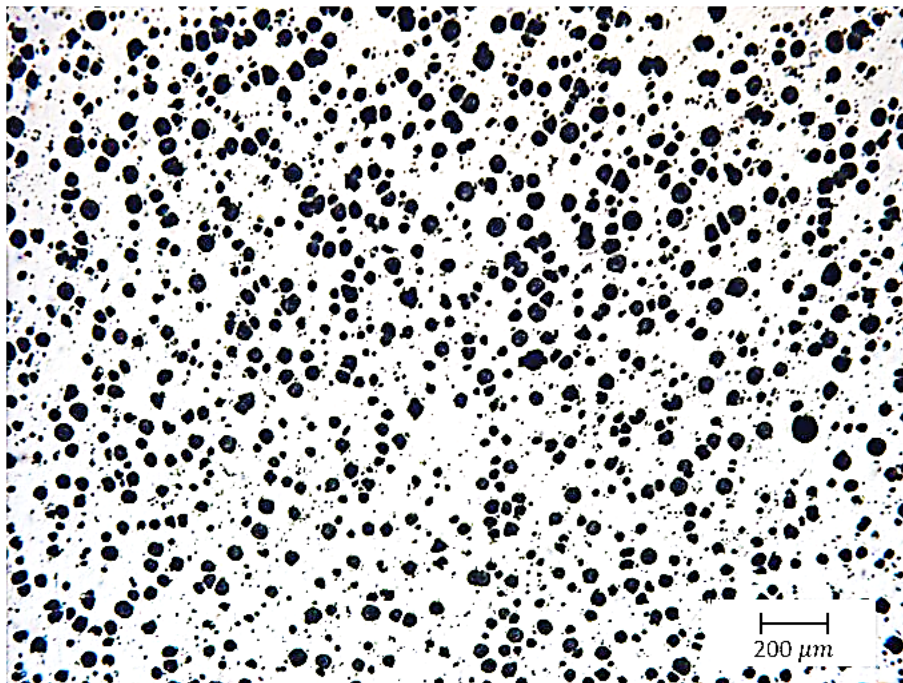


Metalografía 60D. Fotografía correspondiente a la sección 7C: 30mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1387^\circ\text{C}$, 506 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

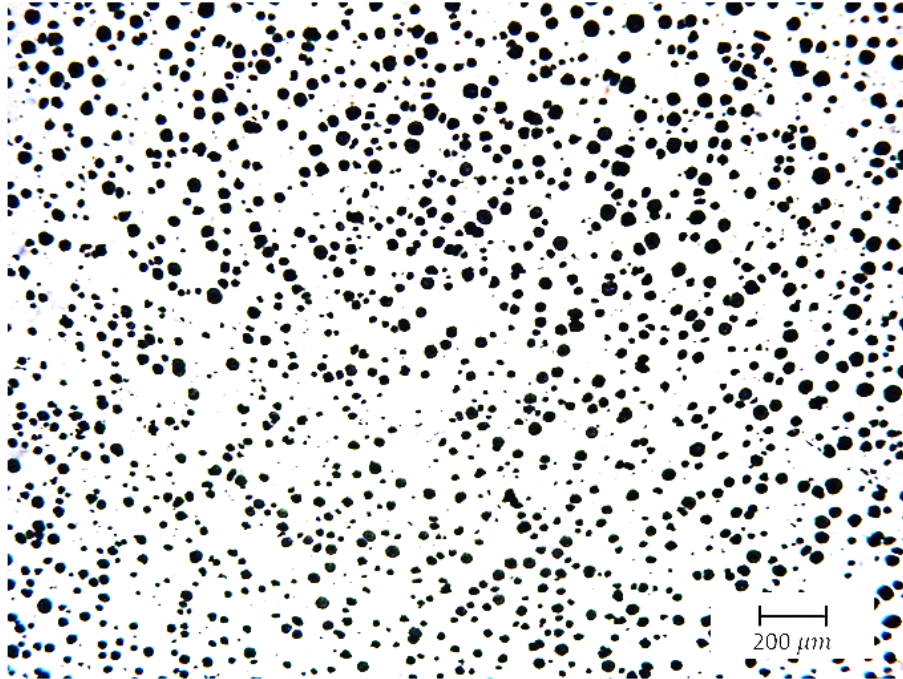


Metalografía 61D. Fotografía correspondiente a la sección 7D: 40mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1387^\circ\text{C}$, 336 nódulos/ mm^2 .

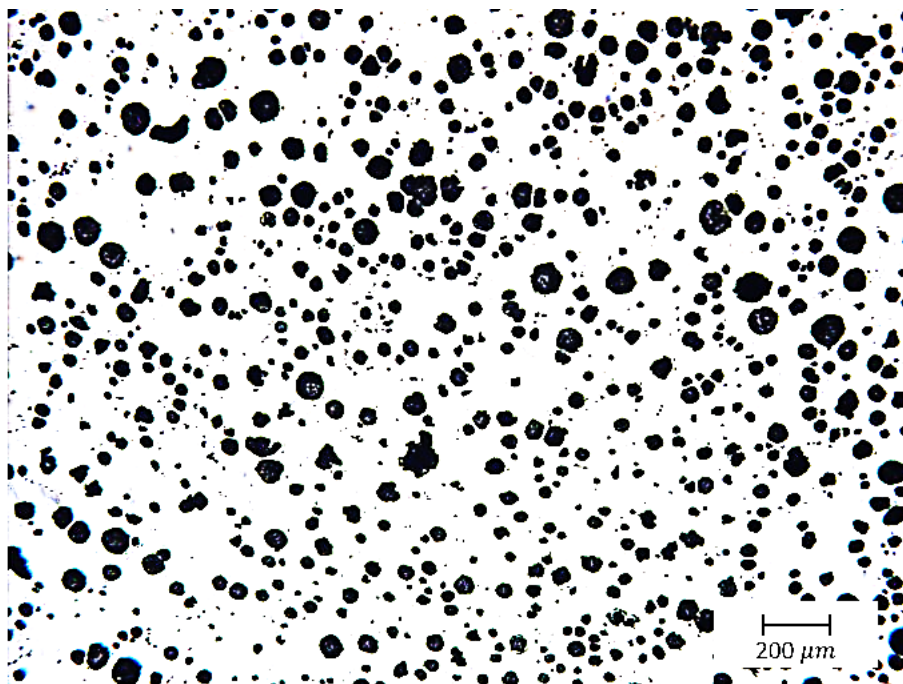


Metalografía 62D. Fotografía correspondiente a la sección 7E: 40mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1364^\circ\text{C}$, 424 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

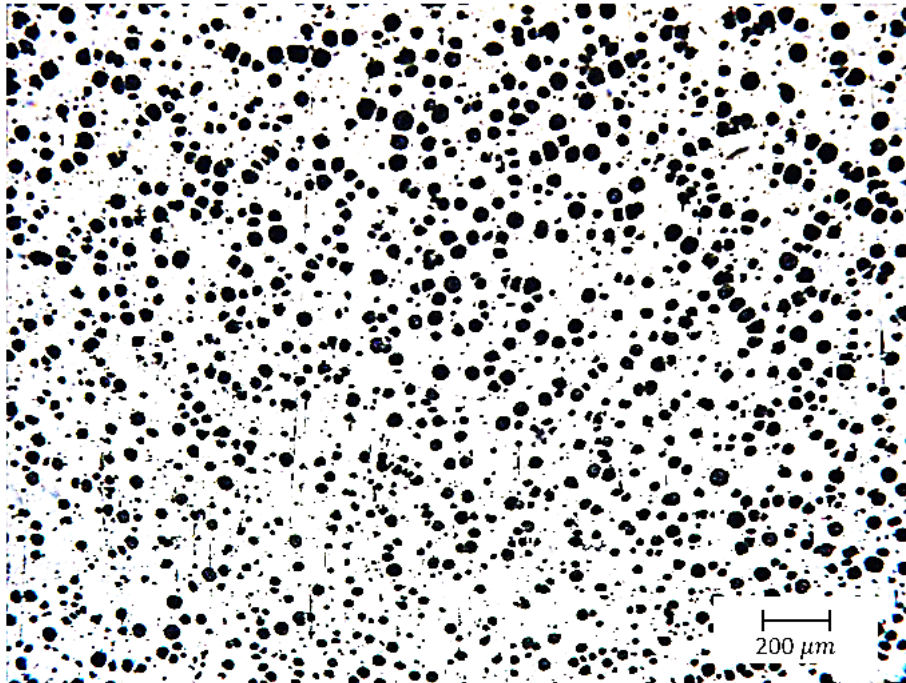


Metalografía 63D. Fotografía correspondiente a la sección 7F: 40mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1324^{\circ}\text{C}$, 380 nódulos/ mm^2 .

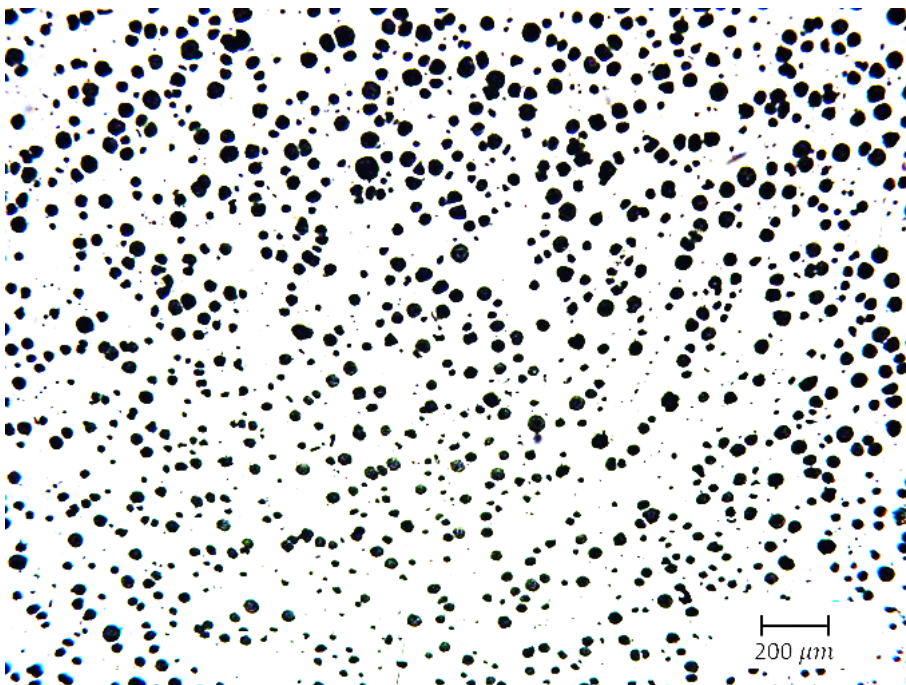


Metalografía 64D. Fotografía correspondiente a la sección 7G: 50mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1387^{\circ}\text{C}$, 232 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

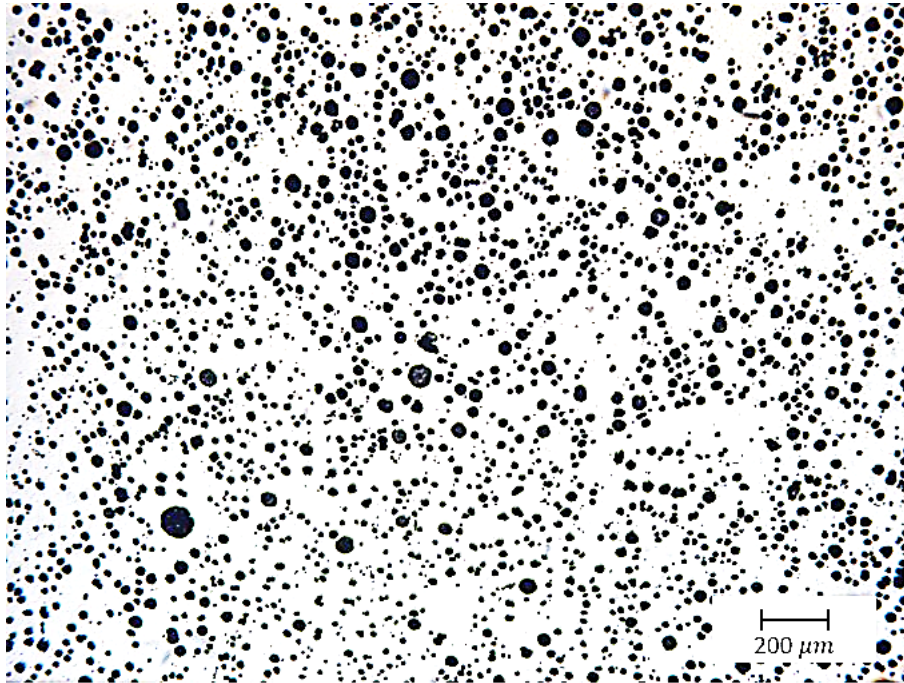


Metalografía 65D. Fotografía correspondiente a la sección 7H: 50mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1364^{\circ}\text{C}$, 264 nódulos/ mm^2 .

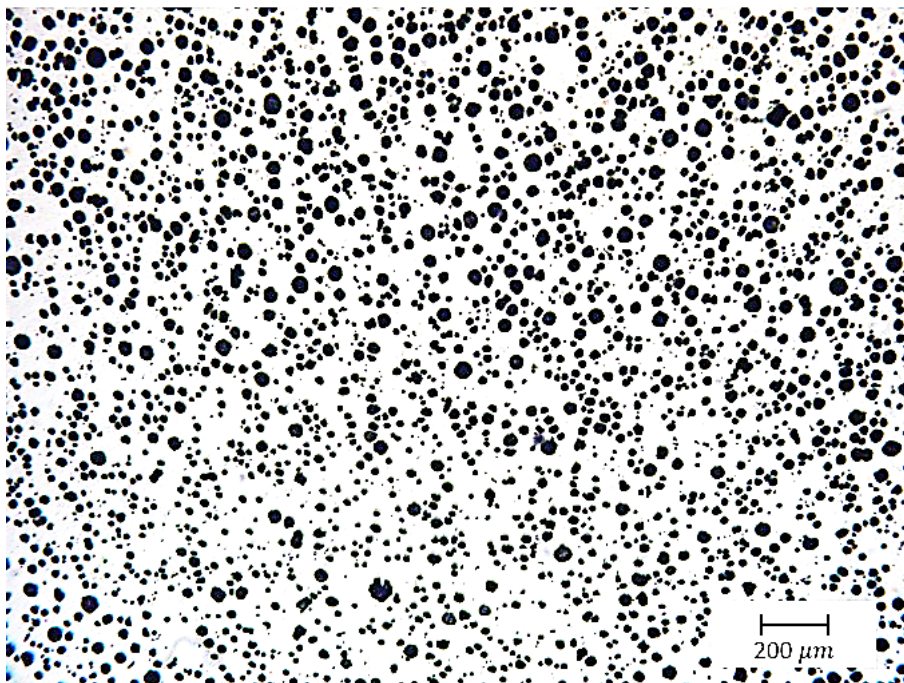


Metalografía 66D. Fotografía correspondiente a la sección 7I: 50mm, nivel de postinoculación 0.15% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1324^{\circ}\text{C}$, 248 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

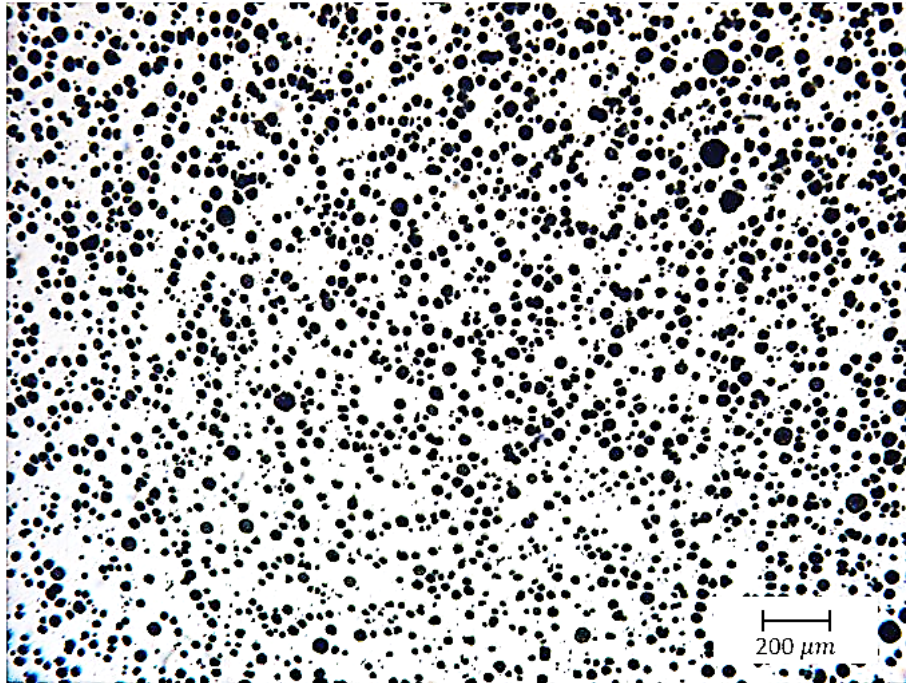


Metalografía 67D. Fotografía correspondiente a la sección 8A: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1385^\circ\text{C}$, 448 nódulos/ mm^2 .

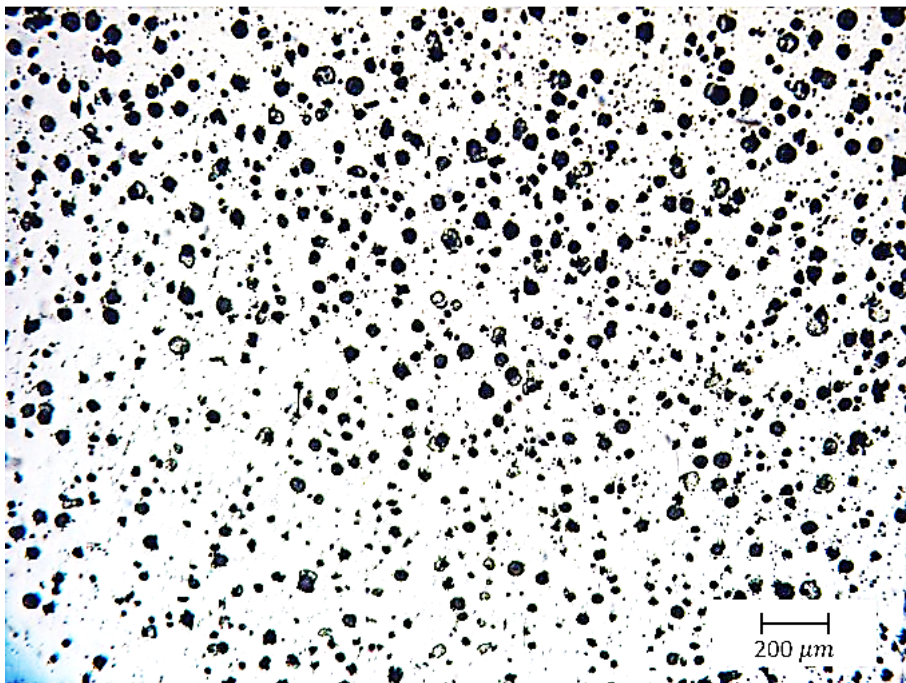


Metalografía 68D. Fotografía correspondiente a la sección 8B: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1367^\circ\text{C}$, 554 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

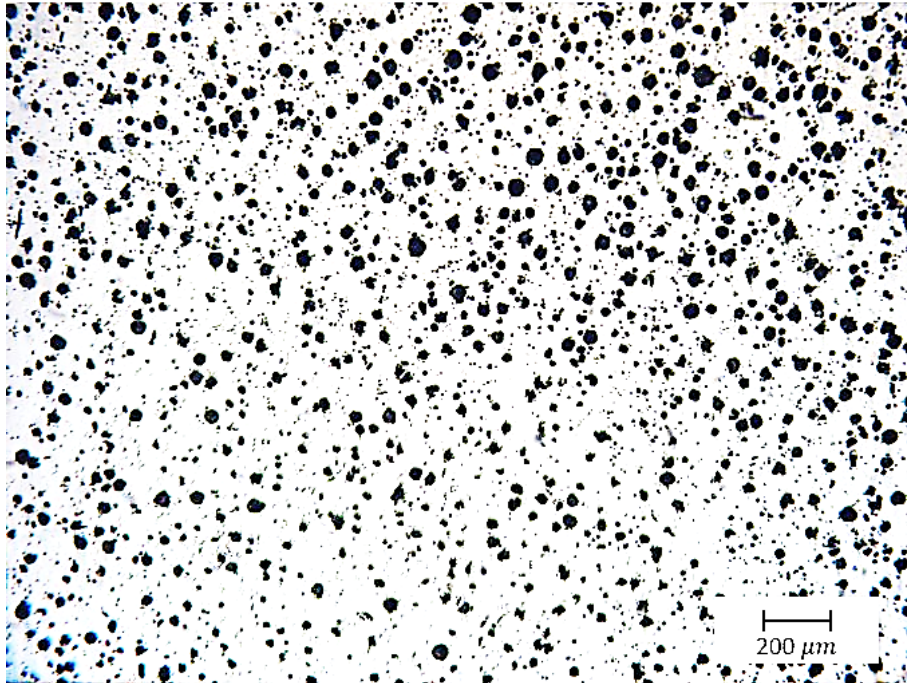


Metalografía 69D. Fotografía correspondiente a la sección 8C: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1353^{\circ}\text{C}$, 660 nódulos/mm².

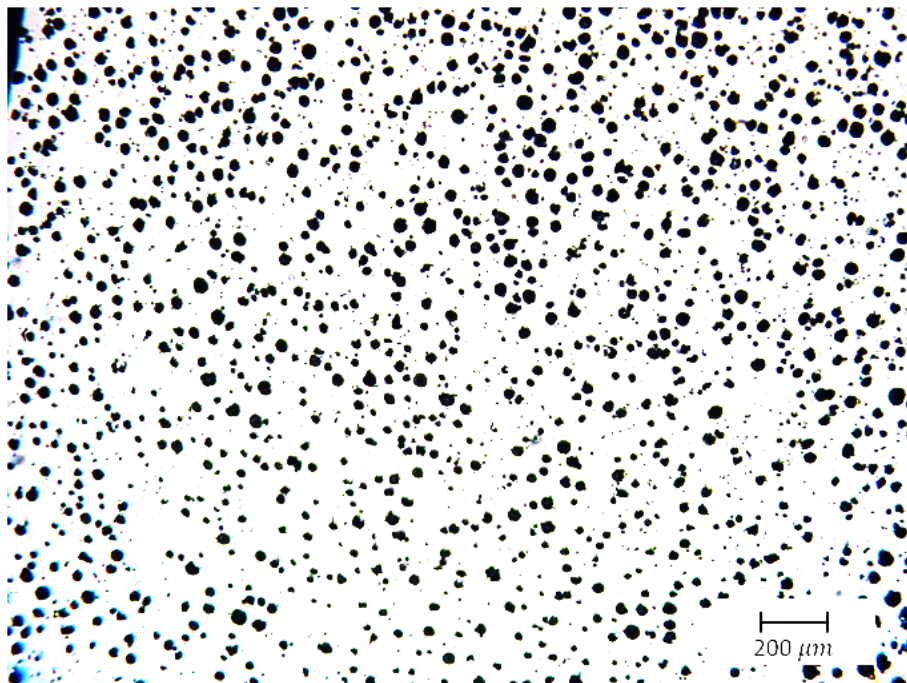


Metalografía 70D. Fotografía correspondiente a la sección 8D: 30mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1385^{\circ}\text{C}$, 340 nódulos/mm².

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

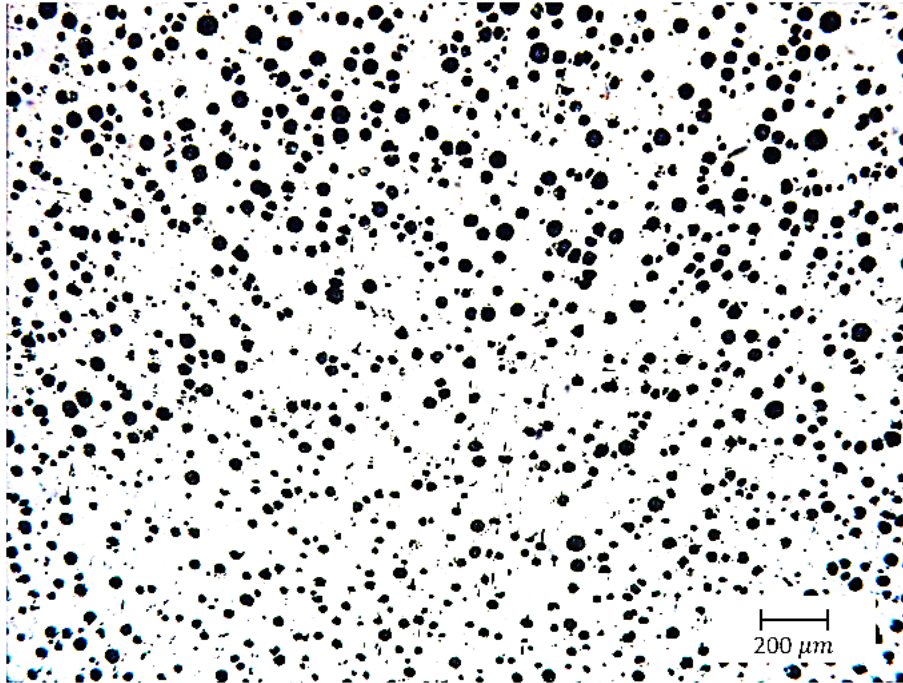


Metalografía 71D. Fotografía correspondiente a la sección 8E: 40mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1367^{\circ}\text{C}$, 420 nódulos/ mm^2 .

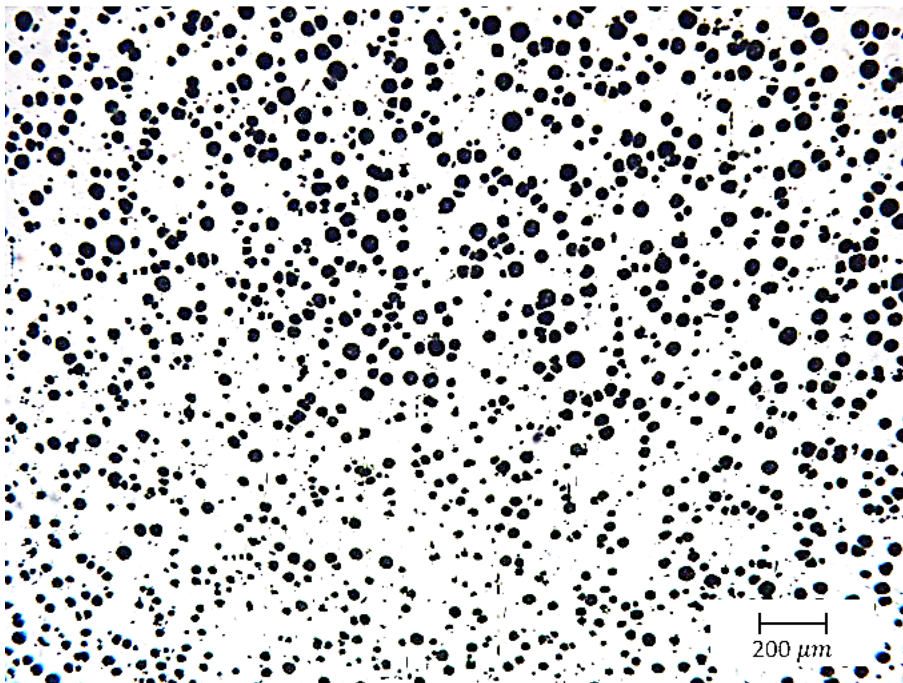


Metalografía 72D. Fotografía correspondiente a la sección 8F: 40mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1353^{\circ}\text{C}$, 381 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

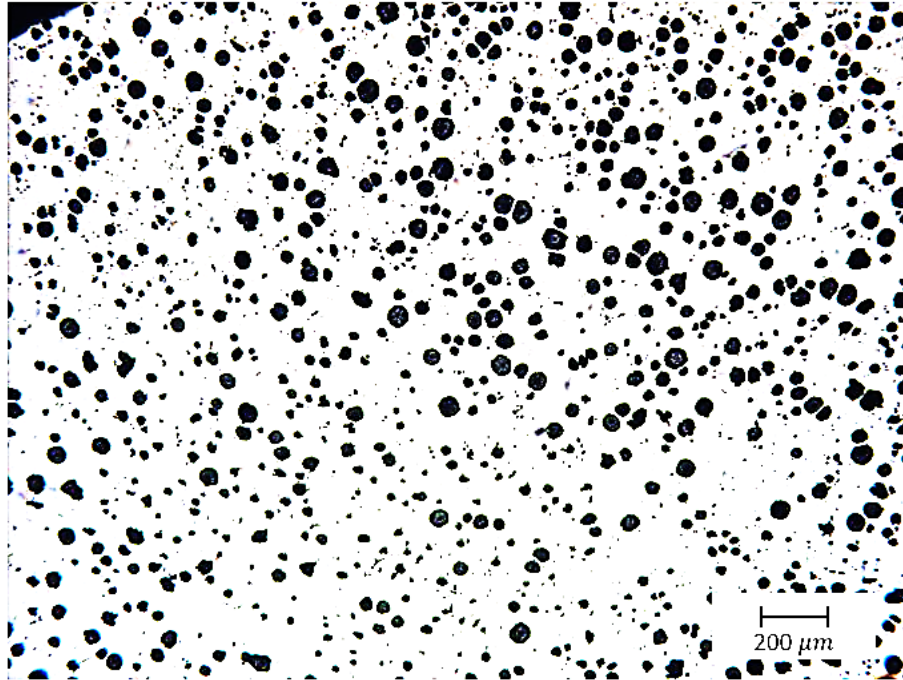


Metalografía 73D. Fotografía correspondiente a la sección 8G: 50mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1385^{\circ}\text{C}$, 260 nódulos/ mm^2 .

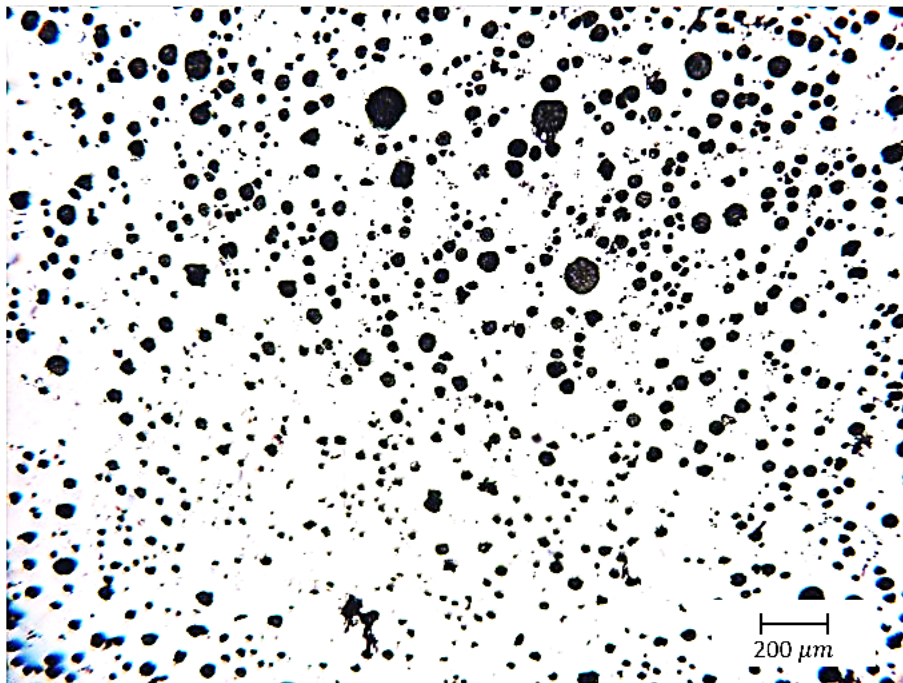


Metalografía 74D. Fotografía correspondiente a la sección 8H: 50mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1367^{\circ}\text{C}$, 368 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

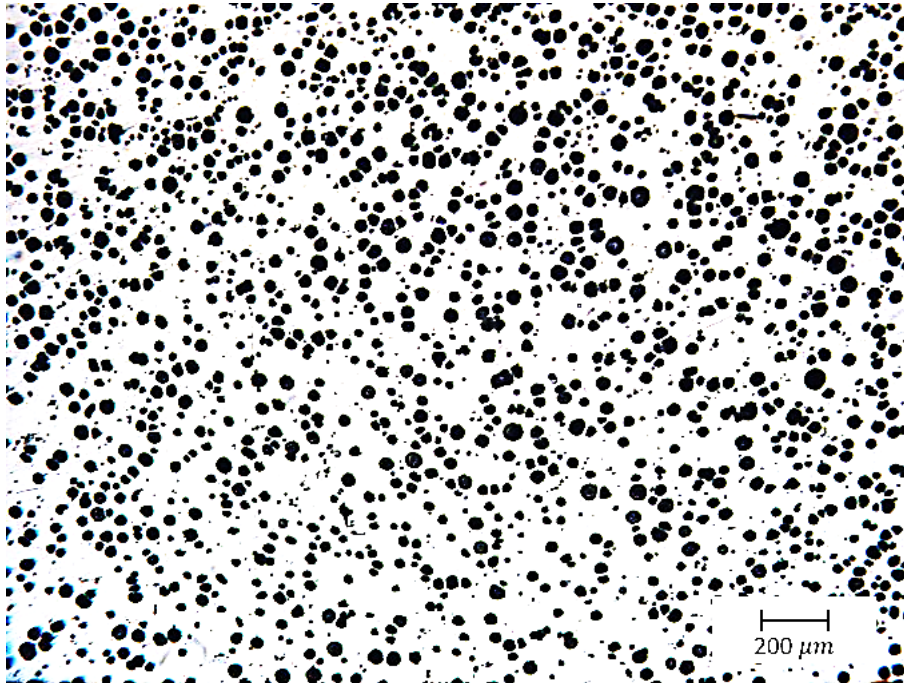


Metalografía 75D. Fotografía correspondiente a la sección 8I: 50mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1353^{\circ}\text{C}$, 294 nódulos/ mm^2 .

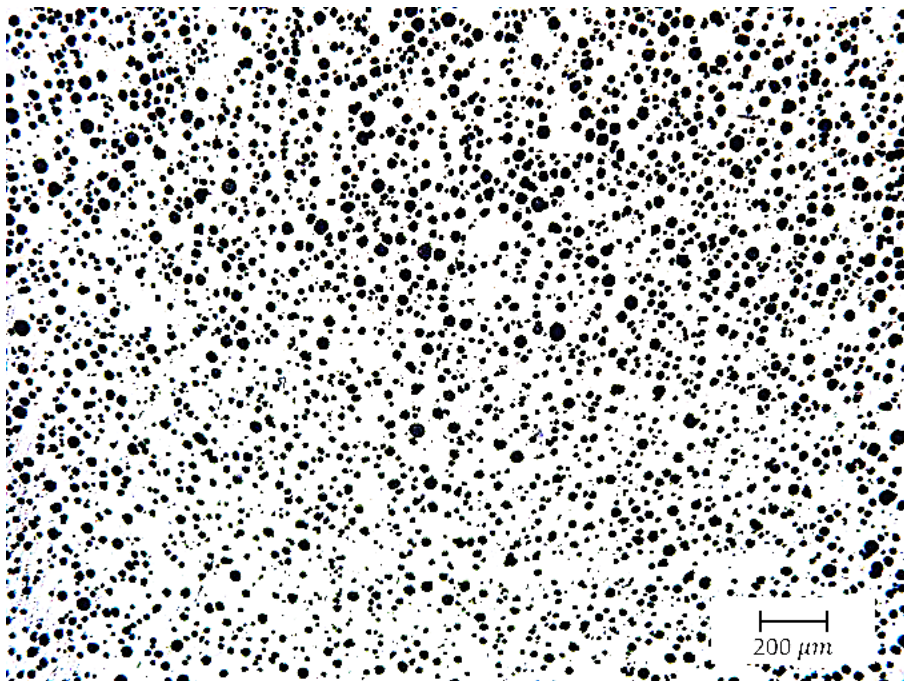


Metalografía 76D. Fotografía correspondiente a la sección 8J: 90mm, nivel de postinoculación 0.25% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1385^{\circ}\text{C}$, 324 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

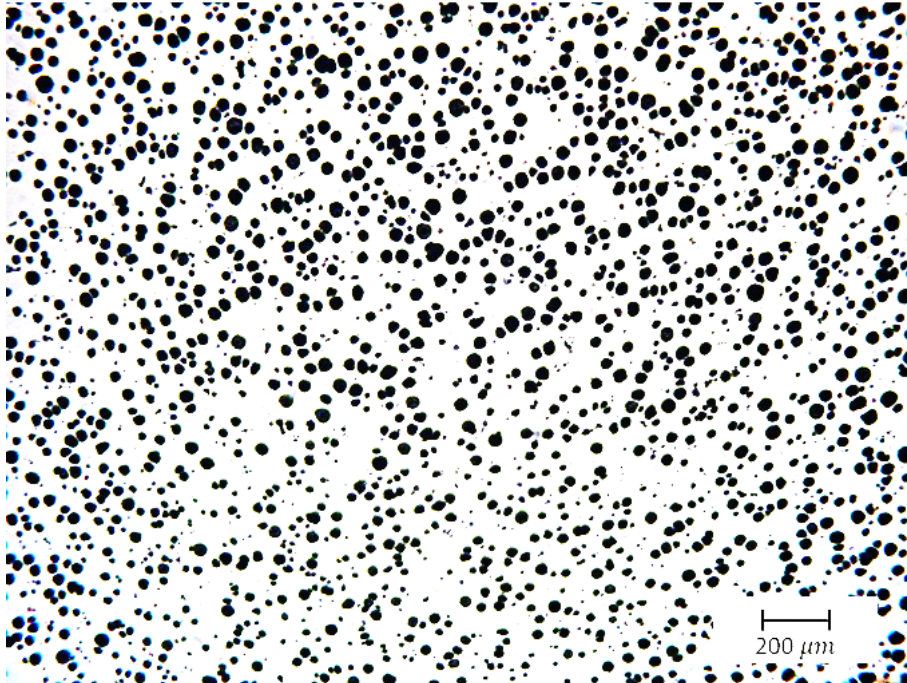


Metalografía 77D. Fotografía correspondiente a la sección 9A: 30mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1383^{\circ}\text{C}$, 564 nódulos/ mm^2 .

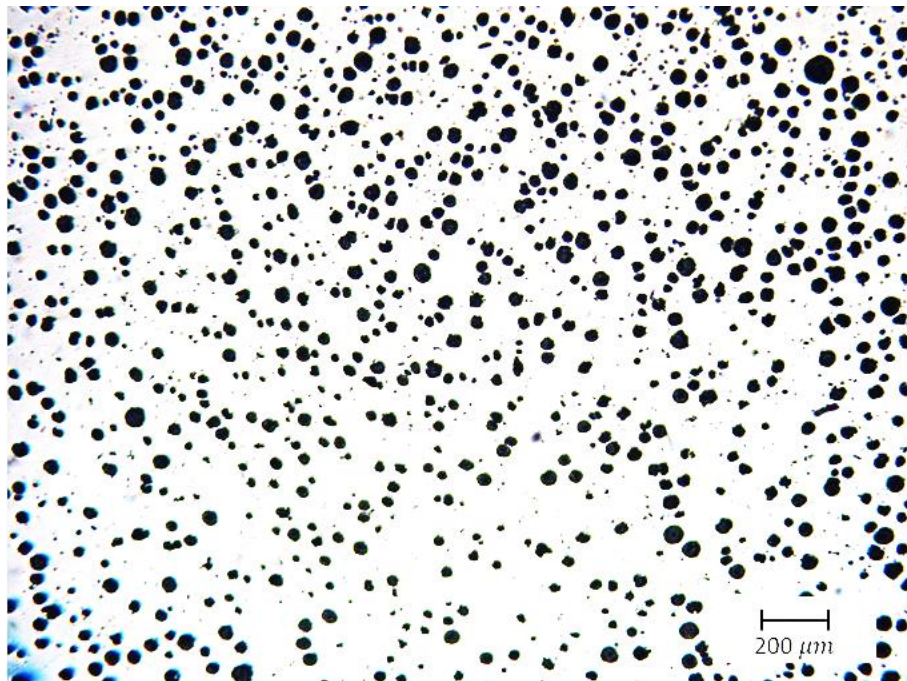


Metalografía 78D. Fotografía correspondiente a la sección 9B: 30mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1355^{\circ}\text{C}$, 472 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

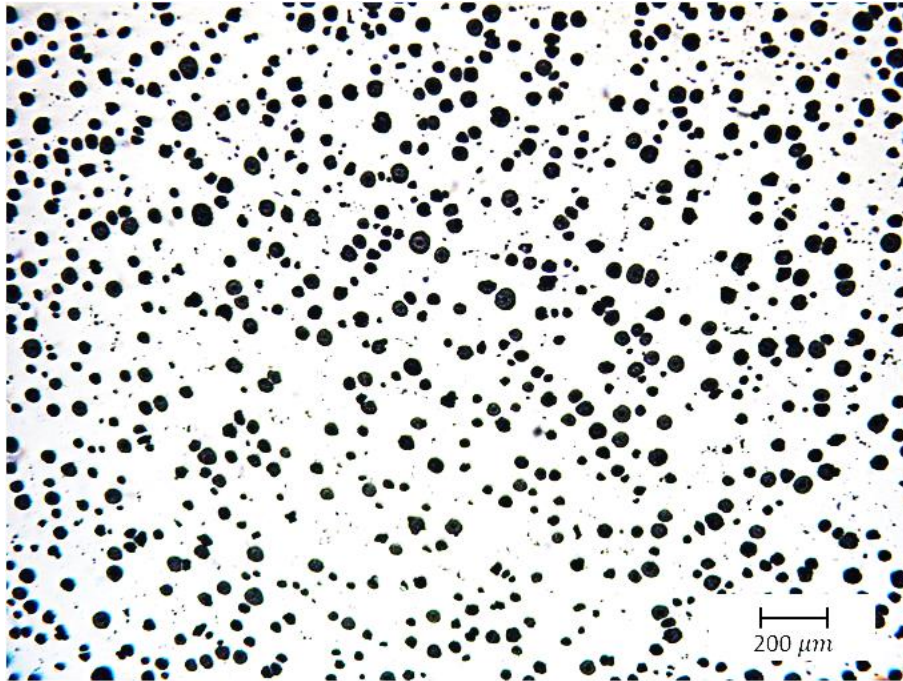


Metalografía 79D. Fotografía correspondiente a la sección 9C: 30mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1326^\circ\text{C}$, 521 nódulos/ mm^2 .

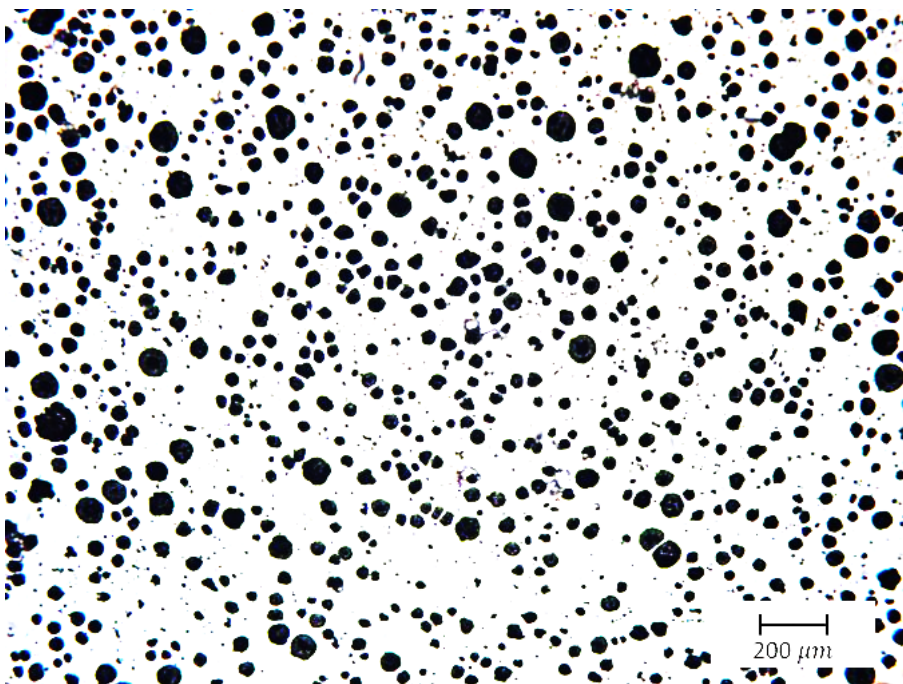


Metalografía 80D. Fotografía correspondiente a la sección 9D: 40mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1383^\circ\text{C}$, 296 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

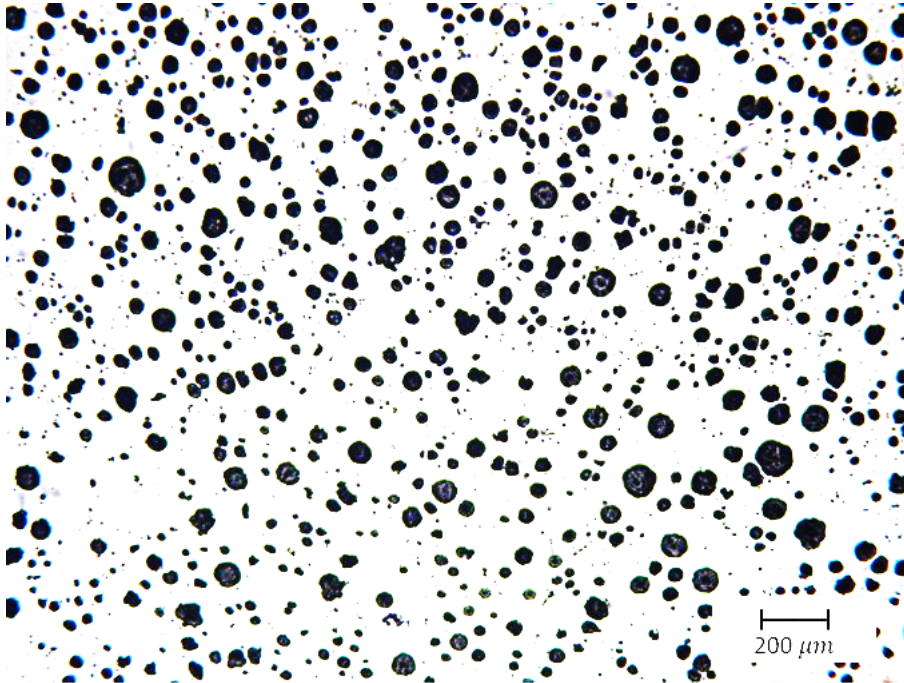


Metalografía 81D. Fotografía correspondiente a la sección 9E: 40mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1355^\circ\text{C}$, 321 nódulos/ mm^2 .

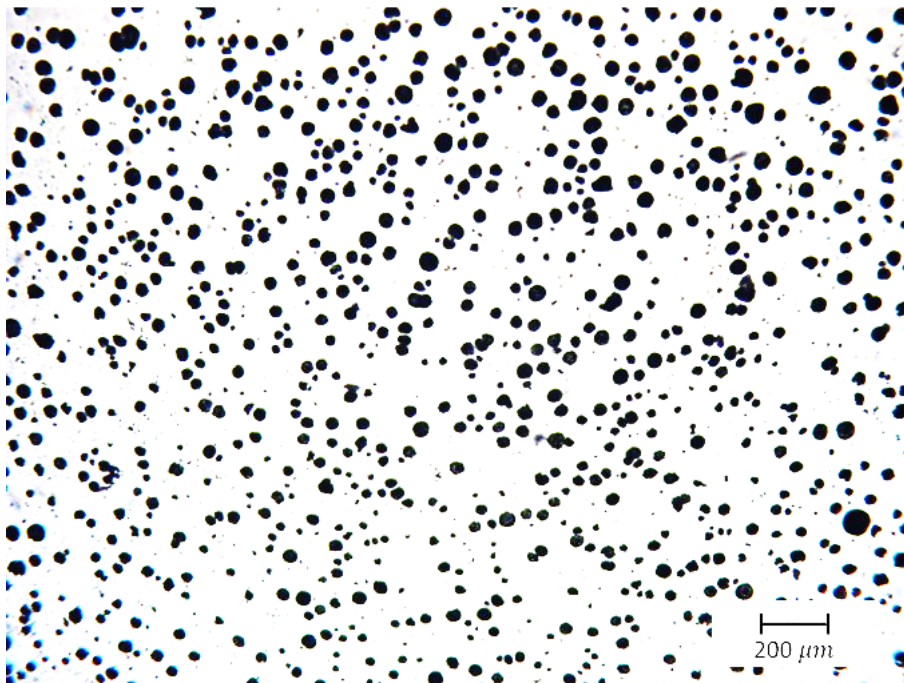


Metalografía 82D. Fotografía correspondiente a la sección 9F: 40mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1326^\circ\text{C}$, 308 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

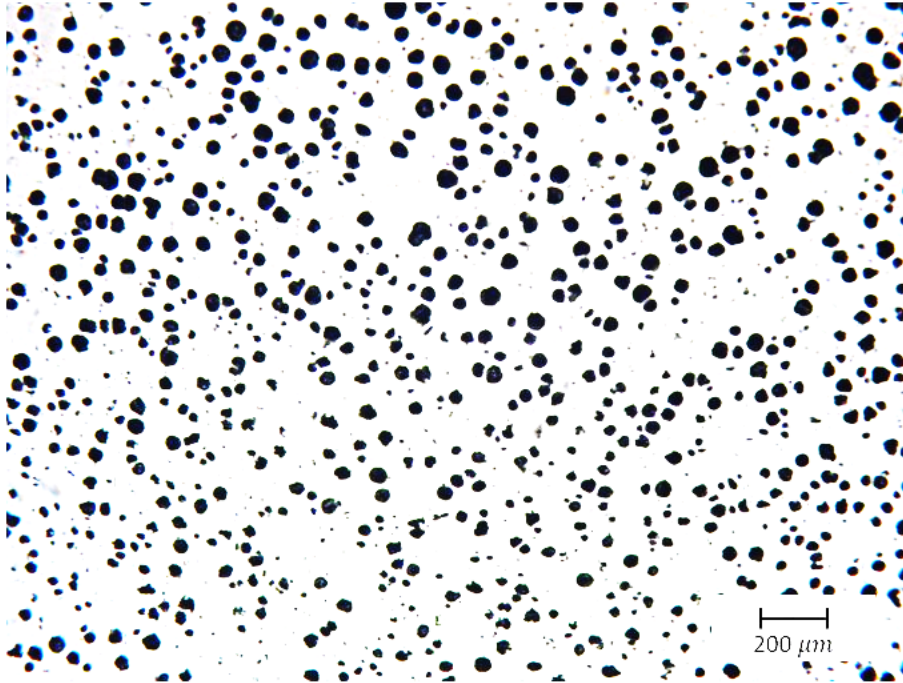


Metalografía 83D. Fotografía correspondiente a la sección 9G: 50mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1383^{\circ}\text{C}$, 392 nódulos/ mm^2 .

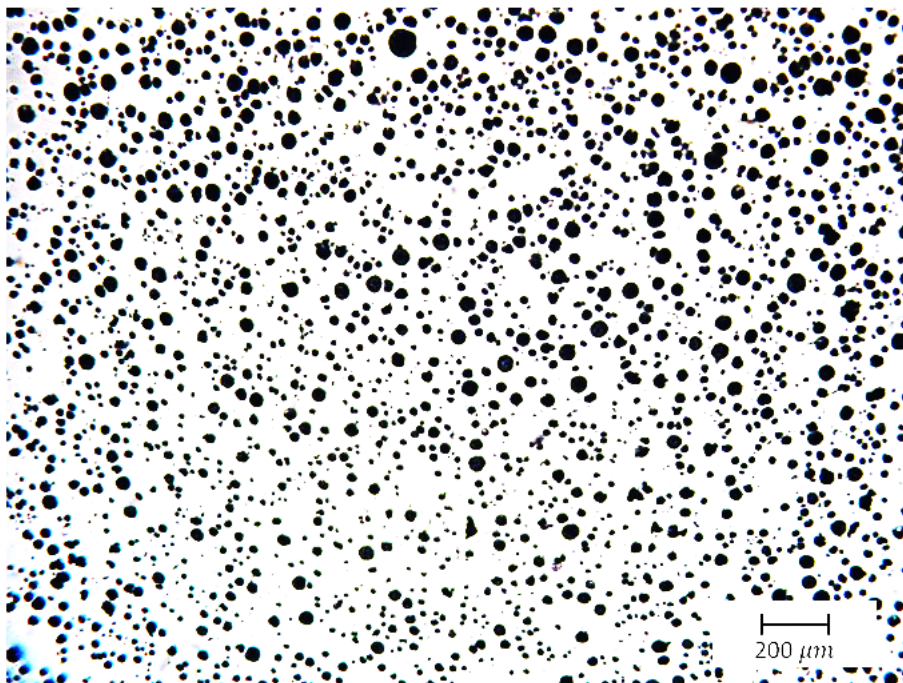


Metalografía 84D. Fotografía correspondiente a la sección 9H: 50mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1355^{\circ}\text{C}$, 410 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

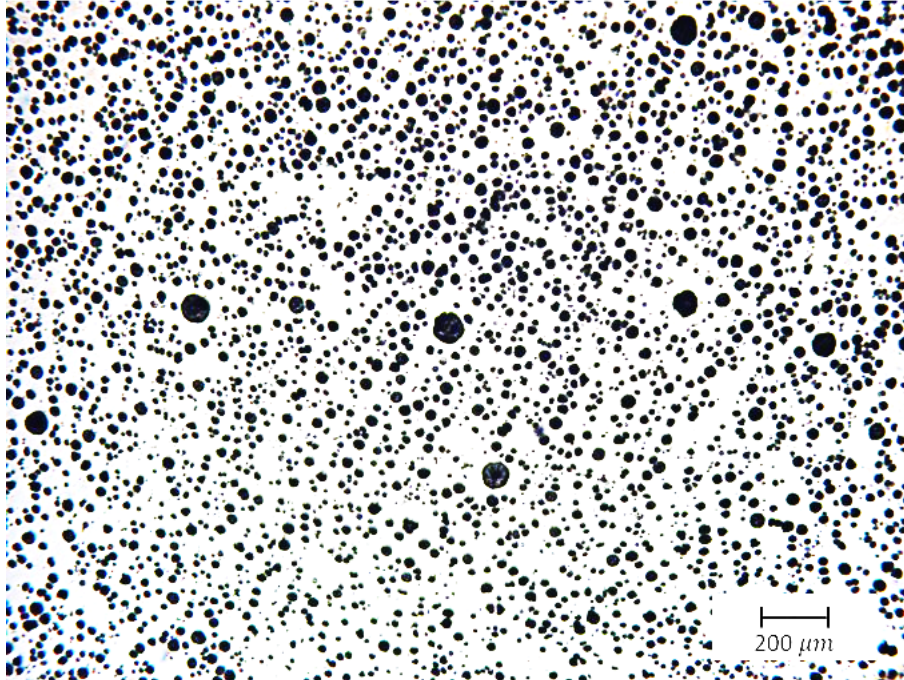


Metalografía 85D. Fotografía correspondiente a la sección 9I: 50mm, nivel de postinoculación 0.35% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1326^\circ\text{C}$, 424 nódulos/ mm^2 .

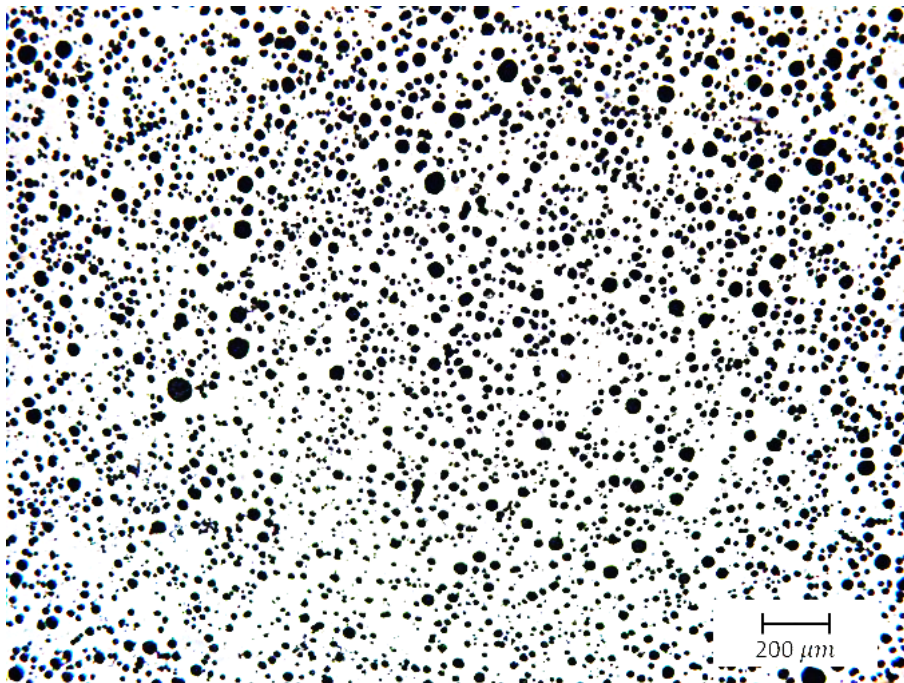


Metalografía 86D. Fotografía correspondiente a la sección 10A: 30mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1388^\circ\text{C}$, 568 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

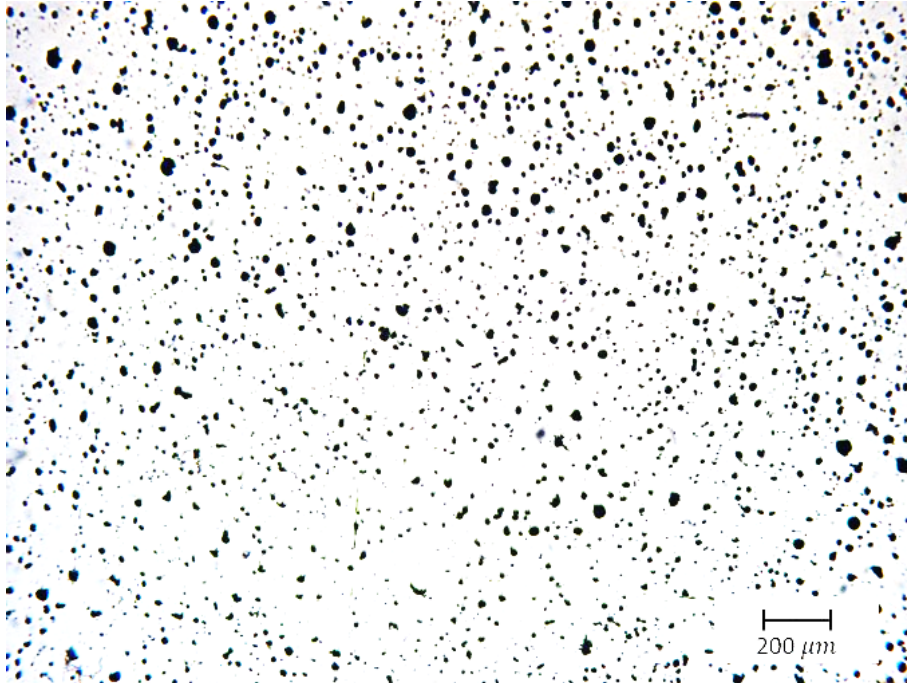


Metalografía 87D. Fotografía correspondiente a la sección 10B: 30mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1359^\circ\text{C}$, 654 nódulos/ mm^2 .

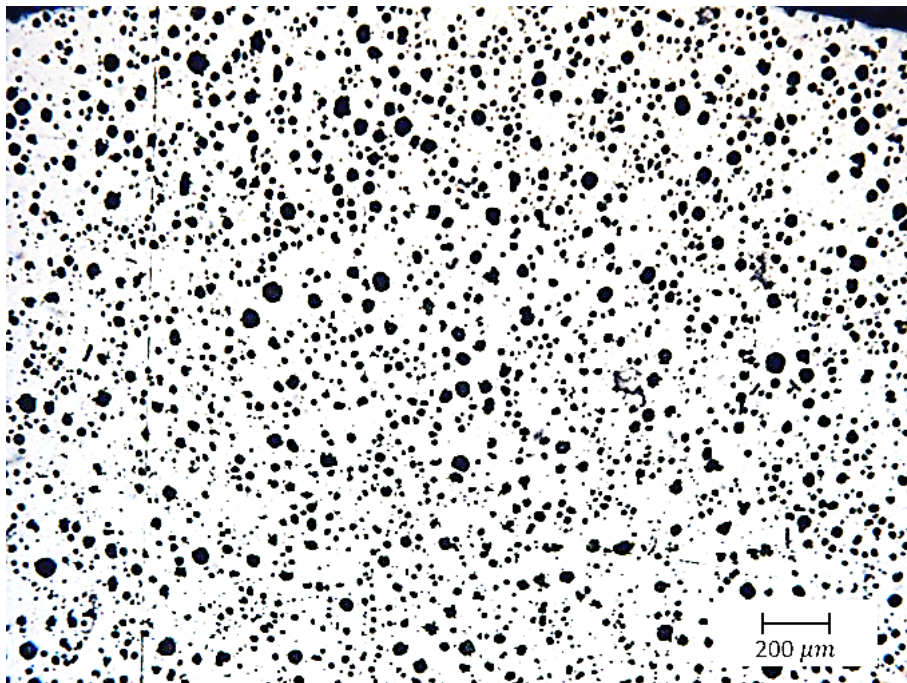


Metalografía 88D. Fotografía correspondiente a la sección 10C: 30mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1330^\circ\text{C}$, 736 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

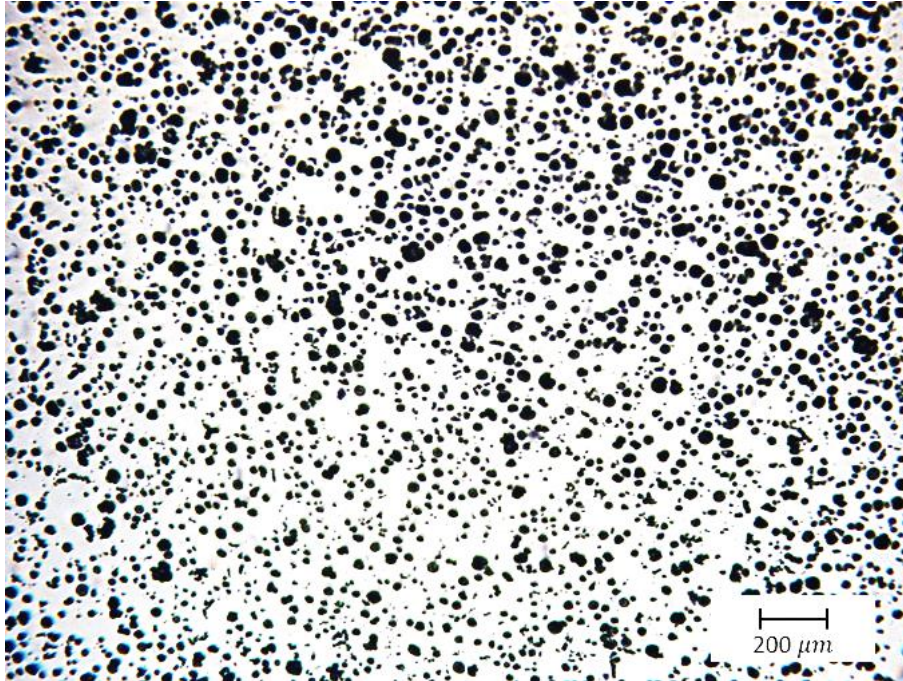


Metalografía 89D. Fotografía correspondiente a la sección 10D: 40mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1388^\circ\text{C}$, 484 nódulos/ mm^2 .

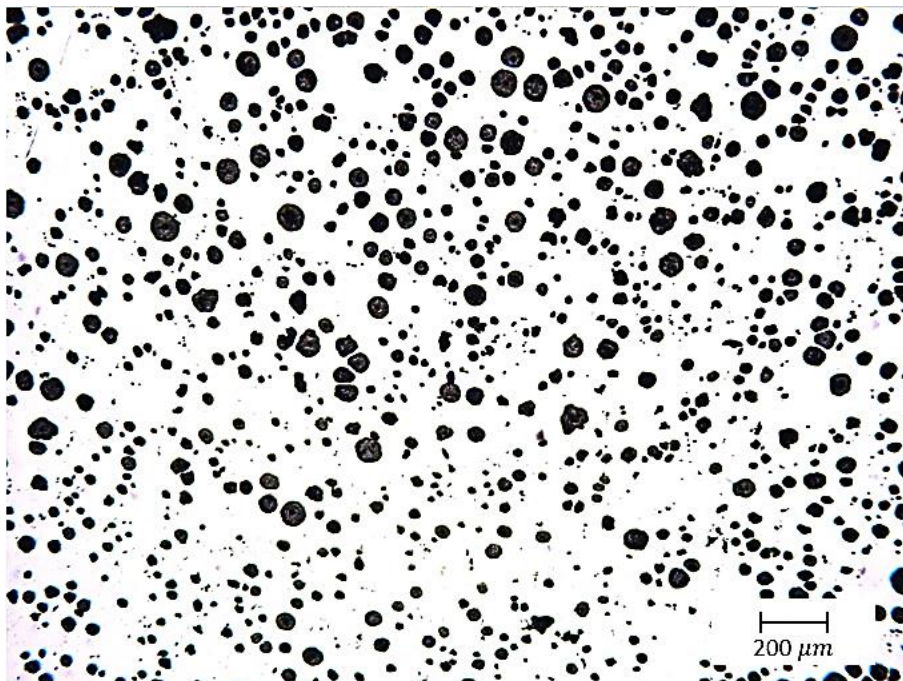


Metalografía 90D. Fotografía correspondiente a la sección 10E: 40mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1359^\circ\text{C}$, 469 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

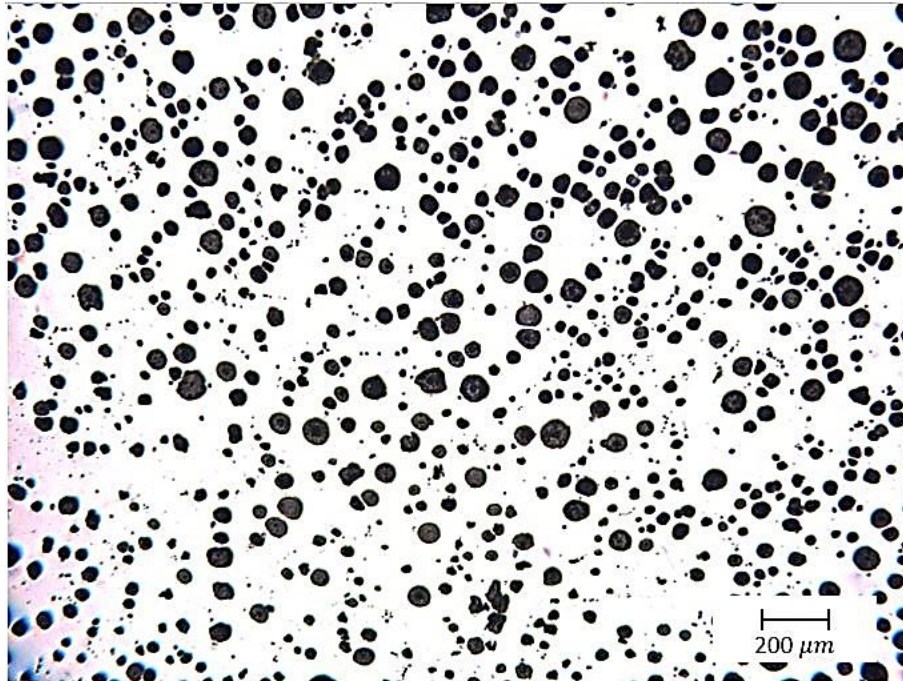


Metalografía 91D. Fotografía correspondiente a la sección 10F: 40mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1330^\circ\text{C}$, 452 nódulos/ mm^2 .

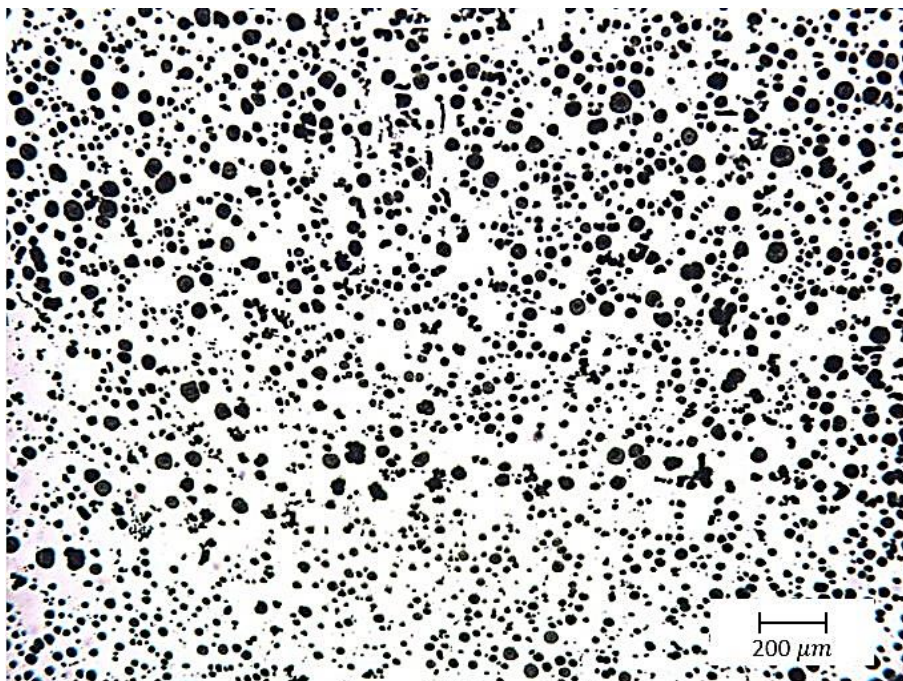


Metalografía 92D. Fotografía correspondiente a la sección 10G: 50mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1388^\circ\text{C}$, 384 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.

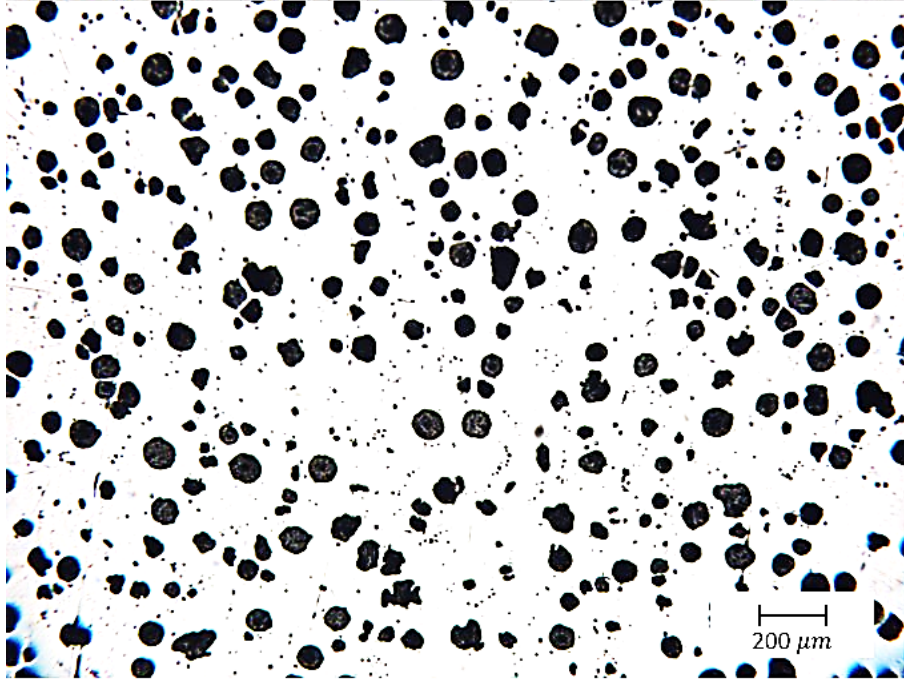


Metalografía 93D. Fotografía correspondiente a la sección 10H: 50mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1359^{\circ}\text{C}$, 367 nódulos/ mm^2 .



Metalografía 94D. Fotografía correspondiente a la sección 10I: 50mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1330^{\circ}\text{C}$, 332 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE D. Caracterización metalográfica.



Metalografía 95D. Fotografía correspondiente a la sección 10J: 90mm, nivel de postinoculación 0.45% usando Fe-64%Si-4.5%Ba, $T_c=1388^\circ\text{C}$, 345 nódulos/ mm^2 .

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

APÉNDICE E

- **Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos en las secciones de las piezas automotrices fabricadas.**

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 1E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 30mm, usando inoculante Fe-75%Si.

Sección 30mm (Inoculante Fe-75%Si)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
1	0.05	1A	90-100	142	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
		1B	90	167	6	75 perlítica - 25 ferrítica	5
		1C	90-100	158	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
2	0.15	2A	100	421	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		2B	90-100	415	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		2C	100	460	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
3	0.25	3A	90-100	236	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		3B	90-100	308	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		3C	90-100	380	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
4	0.35	4A	100	248	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		4B	100	324	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		4C	100	286	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
5	0.45	5A	90	392	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5B	90-100	240	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5C	90-100	316	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 2E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 40mm, usando inoculante Fe-75%Si.

Sección 40mm (Inoculación Fe-75%Si)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
1	0.05	1D	90	104	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		1E	90	156	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		1F	90-100	224	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	10
2	0.15	2D	90-100	232	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		2E	90	153	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		2F	90-100	194	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
3	0.25	3D	90	268	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		3E	80-90	296	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
		3F	90	282	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
4	0.35	4D	100	244	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		4E	90-100	276	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		4F	100	260	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
5	0.45	5D	90	296	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5E	90-100	456	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5F	90-100	366	7	100 perlítica	0

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 3E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 50mm, usando inoculante Fe-75%Si.

Sección 50mm (Inoculación Fe-75%Si)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
1	0.05	1G	90-100	136	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		1H	90-100	194	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		1I	90-100	165	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
2	0.15	2G	100	312	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		2H	100	256	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		2I	90-100	284	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
3	0.25	3G	100	344	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		3H	90-100	248	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		3I	90-100	298	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
4	0.35	4G	-	-	-	-	-
		4H	90-100	304	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		4I	100	168	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
5	0.45	5G	90	434	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5H	90-100	496	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5I	90-100	455	5	75 perlítica - 25 ferrítica	0

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 4E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 90mm, usando inoculante Fe-75%Si.

Sección 90mm (Inoculación Fe-75%Si)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
1	0.05	1J	90-100	242	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		1K	-	-	-	-	-
		1L	-	-	-	-	-
2	0.15	2J	-	-	-	-	-
		2K	-	-	-	-	-
		2L	-	-	-	-	-
3	0.25	3J	90	356	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		3K	-	-	-	-	-
		3L	-	-	-	-	-
4	0.35	4J	-	-	-	-	-
		4K	-	-	-	-	-
		4L	-	-	-	-	-
5	0.45	5J	90-100	436	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		5K	-	-	-	-	-
		5L	-	-	-	-	-

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 5E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 30mm, usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

Sección 30mm (Inoculación Fe-64%Si-4.5%Ba)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
6	0.05	6A	90-100	428	7	25 perlítica - 50 perlítica	0
		6B	100	524	Entre 6 y 7	25 perlítica - 50 perlítica	0
		6C	100	479	Entre 6 y 7	25 perlítica - 50 perlítica	0
7	0.15	7A	100	524	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
		7B	100	484	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
		7C	100	506	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
8	0.25	8A	90-100	448	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		8B	90-100	554	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		8C	90-100	660	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
9	0.35	9A	90	564	Entre 6 y 7	100 perlítica	0
		9B	90-100	472	7	100 perlítica	0
		9C	90-100	521	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
10	0.45	10A	100	568	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		10B	100	654	Entre 6 y 7	100 perlítica	0
		10C	90-100	736	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 6E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 40mm, usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

Sección 40mm (Inoculación Fe-64%Si-4.5%Ba)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
6	0.05	6D	90	404	7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
		6E	90-100	392	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
		6F	80-90	388	7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
7	0.15	7D	90	336	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		7E	90-100	424	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		7F	90-100	380	Entre 6 y 7	50 perlítica - 50 ferrítica	0
8	0.25	8D	90	340	Entre 5 y 6	100 perlítica	0
		8E	90	420	6	100 perlítica	0
		8F	90-100	381	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
9	0.35	9D	90-100	296	Entre 5 y 6	100 perlítica	0
		9E	90-100	321	6	100 perlítica	0
		9F	90-100	308	6	100 perlítica	0
10	0.45	10D	90	484	Entre 7 y 8	100 perlítica	0
		10E	90-100	469	7	100 perlítica	0
		10F	90-100	452	7	75 perlítica - 25 ferrítica	0

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 7E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 50mm, usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

Sección 50mm (Inoculación Fe-64%Si-4.5%Ba)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
6	0.05	6G	100	316	Entre 6 y 7	25 perlítica - 75 ferrítica	0
		6H	100	330	6	25 perlítica - 75 ferrítica	0
		6I	100	344	6	25 perlítica - 75 ferrítica	0
7	0.15	7G	90	232	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		7H	90-100	264	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		7I	90-100	248	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
8	0.25	8G	90-100	260	6	100 perlítica	0
		8H	100	368	6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		8I	100	294	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
9	0.35	9G	90-100	392	Entre 5 y 6	100 perlítica	0
		9H	100	410	Entre 5 y 6	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		9I	90-100	424	Entre 5 y 6	100 perlítica	0
10	0.45	10G	80-90	384	6	100 perlítica	0
		10H	90	367	6	100 perlítica	0
		10I	90	332	7	100 perlítica	0

APÉNDICE E. Análisis metalográfico: Porcentaje de nodularidad, densidad de nódulos, tamaño de nódulo, tipo de matriz y presencia de carburos.

Tabla 8E. Resultados de análisis metalográfico. Sección 90mm, usando inoculante Fe-64%Si-4.5%Ba.

Sección 90mm (Inoculación Fe-64%Si-4.5%Ba)							
Fusión	Postinoculación (%)	Designación	Nodularidad (%)	Densidad de nódulos (nódulos/mm ²)	Tamaño de nódulo	Matriz (%)	Carburos (%)
6	0.05	6J	90-100	372	Entre 6 y 7	25 perlítica - 75 ferrítica	0
		6K	-	-	-	-	-
		6L	-	-	-	-	-
7	0.15	7J	-	-	-	-	-
		7K	-	-	-	-	-
		7L	-	-	-	-	-
8	0.25	8J	90	324	Entre 6 y 7	75 perlítica - 25 ferrítica	0
		8K	-	-	-	-	-
		8L	-	-	-	-	-
9	0.35	9J	-	-	-	-	-
		9K	-	-	-	-	-
		9L	-	-	-	-	-
10	0.45	10J	90	345	Entre 5 y 6	100 perlítica	0
		10K	-	-	-	-	-
		10L	-	-	-	-	-

Bibliografía.

1. Asociación Mexicana de la Industria Automotriz.
<http://www.amia.com.mx/prodtot.html>. Octubre 2013.
2. American Foundrymen's Society Inc. *Ductile Iron Handbook*. AFS. USA. 1992. pp. 1-19.
3. Cuevas A. Carlos. *Métodos de Producción de Hierro Compacto y Nodular*. Tesis monográfica. UNAM. 1997. pp. 8-14.
4. Goodrich G.M., Jones D.P. *Factors Affecting Ductile Iron Nodule Count: A Literature Review*. AFS Transactions. USA. 1993. pp. 1031-1037.
5. Velandia Miguel. *Metalografía Cuantitativa*. Centro de Investigación de Materiales. UNEG. CITEG, revista arbitrada. Venezuela. 2008.
6. Bhadeshia, H. *Introduction to Quantitative Metallography*. Material Science & Metallurgy. Cambridge, UK. 1999.
7. Gagné M. y Labrecque C. *Microstructural Defects in Heavy Section Ductile Iron Castings Formation and Effect on Properties*. AFS Transactions. USA. 2009. pp. 561- 571.
8. Askeland D. R. *Effect of Nodule Count and Cooling Rate on the Matrix of Nodular Cast Iron*. AFS Transactions. USA. 1975. pp. 313-320.
9. Labraque C., Cabanne P.M. *Low Temperature Impact Strength of Heavy Section Ductile Iron Castings: Effects of Microstructure and Chemical Composition*. China Foundry. Vol. 8. No. 1. 2011. pp. 66-73.
10. Górnny M. Frás y López H. F. *Chilling Tendency and Nodule Count in Ductile Cast Iron: Part I Theoretical Background*. AFS Transactions. USA. 2006. pp. 575- 594.
11. Zhao Haidong, Liu Baicheng. *Modeling of Stable and Metastable Eutectic Transformation of Spheroidal Graphite Iron Casting*. ISIJ International . USA. 2001. pp. 986-991.
12. G. Upadhyay, D. K. Banerjee, D. M. Stefanescu. *Heat Transfer- Solidification Kinetics Modeling of Structural Transitions: Chill Formation in Gray Iron*. AFS Transactions. USA. 1990. pp. 699- 706.
13. Dong, J.M., Henning, W.A., Ward, J.R. *Effects of Barium/Cerium Combinations in Magnesium-Ferrosilicon on Ductile Iron*. AFS Transactions. 1978. USA. pp. 163-168.

14. Amin A. S., C. R. Loper Jr. *Cerium and Rare Earths in Ductile Cast Irons*. AFS Transactions. USA. 1978. USA. pp. 505- 512.
15. Rivera, G., Boeri, R., Sikora, J., *Research Advances in Ductile Iron Solidification*. AFS Transactions. Vol. 111. USA. 2003. pp. 979-989.
16. Labreque C., Gagné M. *Carbides in Ductile Iron Casting*. 8th International Foundryman Conference. Opatija , Croacia. 2008.
17. R. Suárez, J. M. Gutiérrez, A. Loizaga, P. Larrañaga y J. Sertucha. *Influencia de diferentes productos inoculantes sobre el poder de nucleación y la tendencia a la contracción de la fundición con grafito esferoidal*. Revista de Metalurgia. España. 2009. pp. 339- 350.
18. Goodrich, G. M. y Lobenhofer R. W. *Effect of Cooling Rate on Pearlitic Ductile Iron Mechanical Properties*. AFS Transactions. USA. 2007. pp. 547- 566.
19. Kanno T., Kikuchi I. Kang y Nakae H. *Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Iron*. AFS Transactions. USA. 2005. pp. 825- 833.
20. Górný M. Frás y López H. F. *Chilling Tendency and Nodule Count in Ductile Cast Iron: Part II Experimental Verification*. AFS Transactions. USA. 2006. pp. 595- 603.
21. Torrance J., Misterek C. y Popovski V. *Verification of the Dynamic Nature of Thermal Analysis Properties in Ductile Iron*. AFS Transactions. USA. 2009. pp. 607- 616.
22. Viswanathan S. y Samuel C. *Solidification of Ductile Iron Revisited*. AFS Transactions. USA. 2011. pp. 431- 439.
23. Kanno T., Kang I., Fukuda Y., Mizuki T. y Kiguchi S. *Effect of Pouring Temperature and Composition on Shrinkage Cavity in Spheroidal Graphite Cast Iron*. AFS Transactions. USA. 2006. pp. 525- 534.
24. H. Fredriksson, J. Stjerndahl, J. Tinoco. *On the solidification of nodular cast iron and its relation to the expansion and contraction*. Materials Science and Engineering. USA. 2005. pp. 363-372.
25. D. J. Celentano, P. M. Dardati, F. D. Carazo and L. A. Godoy *Thermomechanical–microstructural modelling of nodular cast iron solidification*. Materials Science and Technology. USA. 2013. pp. 156- 164.

26. LI Zhenhua, LI Yanxiang, ZHOU Rong. *Melt Quality Evaluation of Ductile Iron by Pattern Recognition of Thermal Analysis Cooling Curves*. Tsinghua Science and Technology. China. 2008. pp. 142- 146.
27. Bockus S., G. Zaldarys. *Evaluation of Producing Technique Factors Affecting the Matrix Microstructure of As-Cast Ductile Iron Castings*. Metalurgia 50. USA. 2011. pp. 9-12.
28. Alagarsamy, Neuman R. *Ductile Iron Handbook*. AFS Transactions. pp. 222-226. USA. 1982. pp. 235-240.
29. Box George E. P., Stuart J. Hunter, William G. Hunter. *Statistics for Experiments. Design, Innovation and Discovery*. Wiley-Interscience. 2da edición. USA. 2005.
30. Riposan Iluian Mihai C., Stelian S. Performance of Heavy Ductile Iron Castings for Windmills. China Foundry. Vol. 7. No. 2. China. 2010. pp. 163- 170.