



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**FABRICACIÓN DE PUNTAS PARA EXCAVADORA POR
FUNDICIÓN, CON HIERRO NODULAR OBTENIENDO
ALTA FRACCIÓN DE CARBUROS MEDIANTE LA
ADICIÓN DE CR Y V**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A N :

PEDRO ARTURO CALLEJAS CANSECO
TANIA SHARIM BOBADILLA SILVA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2017



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: EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO

SECRETARIO: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

1er. SUPLENTE: AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO

2° SUPLENTE: JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO "D"
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
ÁREA DE FUNDICIÓN

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dr. José Alejandro García Hinojosa

SUSTENTANTE (S):

Pedro Arturo Callejas Canseco

Tania Sharim Bobadilla Silva

Agradecimientos

A mis padres, Arturo y Araceli, por el apoyo que me han brindado para realizar este logro, por su cariño y amistad que siempre me han ofrecido, por todo el sacrificio que han enfrentado para que tenga las mejores herramientas como profesionista y persona. Padres no cabe duda que son un orgullo para mí, este triunfo lo comparto con ustedes mis amigos de toda la vida. Aras y Arthur los quiero demasiado y muchas gracias por todo.

A mi hermana Fernanda por ser una buena amiga que me ha enseñado muchas cosas y darme consejos, aunque en momentos nuestra relación no es del todo buena no cabe duda que eres una de las personas más importantes en mi vida que siempre me apoya y me hace reír con tus bromas. Recuerda que tú también puedes lograr esto y mucho más. Fer te quiero, no lo olvides hermanita.

A mis abuelos Juana y Pedro, aunque ya no estén con nosotros siempre tendré muy bonitos recuerdos con ellos y gracias por brindarme el más grande ejemplo de trabajo y superación. Los extraño abuelitos.

A mis abuelos Bernardo y Graciela, por haberme inculcado buenos valores desde que era pequeño y su cariño infinito que siempre he recibido, no cabe duda que han sido mis segundos padres. Los quiero demasiado.

A mis tíos Domingo, Adela, Salvador, Olga y Daniel por siempre estar pendiente de mí desde pequeño, por toda la ayuda que nos han brindado a nuestra familia, son un gran ejemplo a seguir en todos los aspectos de mi vida.

A mis tíos Víctor, Bernardo y Carmen, gracias por brindarme la confianza de concluir mis estudios y ser un ejemplo de gente trabajadora y de gran corazón.

A Daniel, por ser un amigo que considero mi hermano porque siempre me has apoyado y escuchado en los momentos difíciles, espero que nuestra amistad perdure muchos años más y vengan muchos buenos momentos y logros que compartir.

A Ernesto, por ser ese gran amigo que conocí durante la universidad en el que puedo confiar y saber que puedo contar en cualquier momento. Neto eres una gran persona, un claro ejemplo de mentalidad ganadora. Espero que nuestra amistad continúe muchos años más.

A Eunice, mi gran amiga con la que me he identificado en muchas cosas, la cual siempre me ha inyectado esa confianza que en ocasiones no tengo. Aunque no nos frecuentemos tan seguido, te quiero mucho, agradezco al destino por poner en mi camino a una persona tan genial como tú.

A Maira, amiguita gracias por ofrecerme tu amistad, consejos y cariño, sabes que soy malo con las palabras pero tú sabes lo importante que fue tu compañía durante todo este camino que compartimos y espero que sigamos siendo grandes amigos. Mai te quiero amiguita.

A Byron y Alejandra, mis amigos de la secundaria, quien lo diría que continuaremos con esta gran amistad después de tantos años aunque nuestras actividades hacen que no nos frecuentemos, siempre podrán contar conmigo.

A Israel y Emilio, mis amigos de prepa 9, con los cuales he pasado grandes momentos, agradezco conocer personas tan geniales como ustedes y con las que siempre he podido contar en cualquier apuro.

A Alfaro, Diego y Rodrigo, amigos gracias por haber cursado a mi lado esta etapa tan importante en mi vida y haberme apoyado para concluir este logro, espero que nuestra amistad no termine y nunca olviden que siempre tendrán un amigo en quien confiar.

A Tania, no cabe duda que si no hubiéramos hecho este proyecto juntos me hubiera sido mucho más complicado, siempre nos apoyábamos uno al otro cuando parecía que no tenía fin y por haber conocido a una gran amiga. Gracias Ingeniera Tan.

A Arturo, Clemente, Pantaleón, Nacho y Adrián, mis amigos del cubículo, no cabe duda que ustedes fueron una parte esencial en este trabajo, siempre nos apoyaron en cualquier cosa durante los experimentos y por pasar momentos agradables en esos días que pasábamos en el laboratorio trabajando. No duden en pedirme ayuda en cualquier cosa, para eso estamos los amigos.

Al Dr. Adrián por enseñarme muchas cosas durante estos meses de arduo trabajo y por la confianza que puso en mí para llevar a cabo este proyecto.

Y por último pero no menos importante a mi Facultad y universidad, por haberme brindado grandes amigos, fabulosas experiencias y las herramientas que necesita un profesionista.

Agradecimientos

Durante mi vida he tenido la compañía de personas que me han apoyado, cada una de diferente forma, lugar y tiempo, a todas y cada una de ellas les agradezco ya que en su mayoría aún se encuentran a mi lado acompañándome en los logros, fracasos, alegrías y tristezas de cada día y espero así sea siempre. A todos ustedes gracias por hacer de mí una mejor persona con todas las experiencias vividas y las que nos quedan por vivir.

A mi abuela **Francisca Silva** por ser el pilar de la familia, y a pesar de ya no estar con nosotros siempre nos brindó su cariño, amor y apoyo, por ser una de las razones que me motivo a alcanzar este logro en la vida.

A mi mamá **Adriana Bobadilla**, por enseñarme el valor de la paciencia, por estar a mi lado cada día en cada situación, por dejarme aprender de mis errores y a la vez ayudarme a corregirlos este logro también es tuyo mami te amo.

A mi madre **Marcela Mercado** por el gran ejemplo de perseverancia, dedicación y superación que la han caracterizado siempre, por todo ese cariño incondicional y lo ánimos que día a día me ha dado.

A mi tía **Gaby Bobadilla** por ser más que mi tía, mi amiga incondicional, por todos sus consejos y la inmensa confianza y amor que me ha brindado cada segundo de mi vida.

A mis hermanos **Fernanda y Emilio** por apoyarme y acompañarme todos estos años y compartir todas esas hermosas experiencias que hemos vivido juntos, las lecciones de vida que me han dado y a mi herma Fer en especial por traer a este mundo a ese pequeño ángel.

A mi ángel **Abril Cupido** por venir a unir a la familia, por ser la razón de mi alegría, por ti y para ti es este logro mi bebe hermosa mi pequeña sobrinita

A todos mis amigos, pero en especial a:

A **Pedro Callejas** porque me ayudaste mucho con la realización de este trabajo y en general siempre me apoyas, con tu compañía fue más fácil realizar todos y cada uno de los experimentos gracias por esas tardes de gordear con papas y refresco para poder inspirarnos a terminar la tesis, siempre tendrás en mí a una amiga incondicional.

A **Fernando Vázquez** por la hermosa amistad que desde el día que lo conozco me has brindado, por ser tan sincero conmigo en muchos aspectos y ayudarme

una infinidad de veces, y que a pesar de no vernos con tanta frecuencia la amistad perdura.

A **Adrián Betancourt** por animarme y apoyarme siempre y sobre todo en una de las decisiones que hasta ahora ha sido de las más importantes, por ser ese gran amigo y enseñarme el verdadero significado de la amistad.

A **Clemente Bastamente y Ángel Oscoy** por ser siempre mis amigos incondicionales en las buenas en las malas y en aquellas situaciones en las que siempre se requiere el apoyo de las personas que te aprecian, por todas esas ocasiones que hemos compartido juntos.

A **Jafet Ostos** por ser uno de mis mejores amigos, por ser siempre tan linda persona y mantenernos unidos jugando tocho (aunque nunca fuimos muy buenos que digamos) y divertirnos tanto, por todas esas pláticas que tuvimos y dejarme conocer a esa hermosa persona que eres.

A **Arturo Santoyo** por formar parte de esta gran experiencia en la universidad, por su gran amistad, de ti aprendí que no hay nada que pueda detenernos que a veces las cosas pasan de la peor manera pero aun así debemos seguir adelante.

A **Karen Ramírez** por llegar a mi vida en el momento indicado, y brindarme todo su cariño, paciencia y apoyo, por ayudarme a superar varios obstáculos y alentarme cada día a superarme un poco más y que a pesar de varias dificultades aún seguimos unidas.

Al **Doctor Adrián M Amaro Villeda** por permitirme realizar el presente trabajo bajo su guía, apoyarme y brindarme su tiempo y ayuda de manera incondicional,

También agradezco al maestro **Agustín Ruiz, Balbina Ojeda, y Benjamín Beltrán** por su amistad, consejos y esos ánimos que nunca faltaron cada vez que los necesite

Y por último pero no menos importante a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater aquella que me dio la oportunidad de ser una profesionista y la cual me ha obsequiado las mejores experiencias de mi vida y con la cual estaré agradecida siempre.

Si el camino es demasiado fácil tal vez no sea el correcto, lo que en verdad vale la pena en la vida siempre requerirá mayor esfuerzo.

Tania Bobadilla

ÍNDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i>	iii
<i>HIPOTESIS</i>	v
<i>OBJETIVOS</i>	v
ANTECEDENTES	1
1.1 Diagramas de fases	2
1.1.1 Fases y microconstituyentes	2
1.1.2 Diagrama Fe- Fe ₃ C (Cementita)	5
1.1.3 Diagrama Fe-C (grafito)	7
1.2 Carbono equivalente	8
1.3 Hierros Colados	8
1.4 Clasificación de los Hierros	9
1.4.1 Hierro blanco	9
1.4.2 Hierro gris	9
1.4.3 Hierro dúctil	11
1.4.4 Hierro vermicular	13
1.5 Aplicaciones de hierros colados	13
1.6 Elementos aleantes en los hierros	14
1.7 Formación de carburos	15
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1 Hierros dúctiles	17
2.1.1 Clasificación de los hierros dúctiles	17
2.1.2 Hierros dúctiles ferríticos	18
2.1.3 Hierros dúctiles perlíticos	18
2.1.4 Hierros Dúctiles Ferrítico – Perlítico	18
2.1.5 Hierro Dúctil Martensítico	20
2.1.6 Hierro Dúctil Austenítico	20
2.2 Hierros ADI	20
2.3 Hierros CADI	21
2.4 Tratamiento de Austempering	22
2.5 Horno de inducción sin núcleo	23
2.6.1 Inoculación	25
2.6 Efectos de elementos de aleación	28

2.7 Efectos de los elementos aleantes	31
2.8 Caracterización de hierro dúctil	34
2.8.1 Tipo de carbono grafito	35
2.8.2 Nodularidad	36
2.8.3 Densidad de nódulos	36
2.8.4 Tamaño de esferoide	37
2.8.5 Evaluación de matriz	38
2.9 Análisis térmico	40
2.10 Velocidades de enfriamiento	41
2.11 Influencia de un tercer elemento en la temperatura eutéctica de los hierros	43
DESARROLLO EXPERIMENTAL	47
3. Descripción	48
3.2 Elaboración de termopares tipo K	50
3.3 Corazones	50
3.4 Balance de carga	51
3.5. Moldeo	56
3.6. Técnica de fusión	57
3.7 Adquisición de datos para Curvas de enfriamiento	58
3.8 Preparación metalográfica y microscopía óptica	59
RESULTADOS	64
4.1 Composición química	65
4.2.1 Caracterización de carbono grafito	67
4.3 Evaluación de Matriz	77
4.4 Cuantificación de carburos	79
4.3 Análisis Térmico	83
CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	93
Anexo A	96
Anexo B	113
Anexo C	131
Anexo D	141

INTRODUCCIÓN

Las puntas de excavadora para maquinaria de construcción y minería deben de tener un alto desempeño y cumplir ciertos requerimientos como resistencia al desgaste debido a que están sometidas a alta fricción con una diversidad de materiales como concreto, diferentes tipos de suelos, rocas diversas y hasta metales, también deben de tener alta resistencia al impacto ya que estas puntas normalmente se utilizan para retirar material, impactan sobre la superficie de los materiales mencionados anteriormente, otra propiedad importante que deben tener este tipo de piezas es alta tenacidad debido a los esfuerzos a la que debe de estar sometida. Las puntas de excavadoras se fabrican normalmente de aceros aleados, como son los aceros al manganeso (12%-14%Mn). Estos aceros al manganeso cumplen con las necesidades del mercado de la industria de la construcción y minería, pero con el desarrollo de nuevos materiales o materiales que tal vez ya existían pero que no tenían una aplicación como tal por ser considerados como material de rechazo por obtener microestructuras no deseables, actualmente se están desarrollando los hierros CADI (Carbide Austempered Ductile Iron), estos hierros pueden competir con los aceros al manganeso. Para obtener piezas de hierro CADI se tienen dos etapas, la primera etapa es fabricar las piezas con altos porcentajes de carburos directamente de colada con adiciones de elementos aleantes que provocan un incremento en la precipitación de carburos aleados y ledeburíticos durante la solidificación. La segunda etapa consiste en realizar un tratamiento de austemperizado para controlar la disolución de carburos y dejar en la matriz el porcentaje de carburos requerido. Esto permite obtener un hierro nodular con alto contenido de carburos con una matriz ausferrítica que va a tener alta resistencia al desgaste, alta resistente al impacto y con una buena tenacidad. Los hierros nodulares con alto contenido de carburos se fabrican también en hornos de inducción como los aceros al manganeso,

solo que los hierros tienen un punto de fusión más bajo (1350°C) y el refractario que se usa es ácido en lugar de usar un refractario básico para la fabricación de los aceros el cual tiene un mayor costo y el consumo de energía es mayor por su punto de fusión de los aceros (1550°C). Esto hace competitivo la fabricación de puntas de excavadora de hierro CADI.

En estudios previos se fabricó hierro nodular usando elementos formadores de carburos como el cromo y el vanadio obteniendo piezas tipo bloque "Y". Con la información obtenida de estos estudios previos, en el presente trabajo se fabricó una placa modelo para obtener piezas de puntas para excavadora, las piezas se fabricaron por el proceso de moldeo en verde y la fusión se realizó en un horno de inducción de capacidad de 100 Kg. En este trabajo se estudió el efecto que tiene el cromo, como primera variable, de 1.5% y 2.0%Cr, dejando constante la concentración de Vanadio en 0.5%V. Otra variable que se manejo es el nivel de inoculación de 0.03%, 0.12%, 0.25% y 0.4%Si. Para obtener los porcentajes de carburos requeridos en el hierro nodular antes del tratamiento de austemeperezado. Los moldes fabricados por el proceso de moldeo en verde se instrumentaron con termopares tipo K, en cuatro secciones de diferente espesor, y mediante un adquisidor de datos conectados a una computadora se obtuvieron curvas de enfriamiento locales, por medio de dichas curvas se vió el efecto de las velocidades de enfriamiento para relacionarlas con el porcentaje de carburos presentes en cada sección de las piezas. Las puntas para excavadora obtenidas por fundición fueron evaluadas por metalografía óptica cuantitativa en sus diferentes secciones para determinar la distribución de la fracción de carburos presentes en las piezas y relacionarlas con las curvas de enfriamiento.

HIPOTESIS

Un incremento en el porcentaje de Cromo (1.5-2.0%) y Vanadio (0.5%) en Hierros nodulares promoverá la formación de carburos aleados en un rango de 20-25%, el cual puede variar en función del nivel de inoculación y del enfriamiento local de la pieza, asociado a la temperatura eutéctica.

OBJETIVOS

- Fabricar puntas para excavadoras de hierro nodular aleado con cromo y vanadio para obtener altos contenidos de carburos precipitados.
- Determinar el efecto que tiene el contenido de Cromo y Vanadio en la fracción de carburos local en una pieza de punta para excavadora de hierro nodular y su efecto en la temperatura eutéctica.
- Determinar el efecto que tiene el nivel de inoculación en un hierro nodular aleado con Cromo y Vanadio en la fracción de carburos local en una pieza de punta para excavadora y su efecto en la temperatura eutéctica.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES



1.1 Diagramas de fases

Los diagramas de fase son una herramienta, en el que se puede determinar la composición química, temperatura y las fases presentes, considerando un enfriamiento al equilibrio o fuera de el para su elaboración (diagrama estable o metaestable respectivamente). La principal utilidad de estos diagramas es la predicción de las fases y microconstituyentes que se formarán durante la solidificación del metal líquido con un enfriamiento según sea el caso, en el diagrama estable, metaestable o combinado, así como las transformaciones que se pueden obtener en fase sólida en base a la composición de la aleación.

Existen diferentes tipos de diagramas de fases como lo son; binarios (2 elementos), ternarios (3 elementos diferentes) y cuaternarios (4 elementos diferentes), dentro de los binarios tenemos a uno de los diagramas más utilizados en la industria metalúrgica siendo el diagrama Fe-C, el cual cuenta con dos variantes, el diagrama estable (Fe-C grafito) y el diagrama metaestable (Fe-Fe₃C).

1.1.1 Fases y microconstituyentes

Fase: Se considera como una porción homogénea que presenta características físicas y mecánicas uniformes, así como una estructura cristalina única (ferrita: BCC).

Dentro de las fases presente en los diagramas de fases Fe-C, se encuentran:

Ferrita: Esta fase es la forma estable a temperatura ambiente de la solución sólida α (alfa), la cual exhibe una estructura cristalina BCC



(cubica centrada en el cuerpo), al presentar una dureza aproximada de 90 HBN (Dureza Brinell) es considerada una fase blanda. La máxima solubilidad es de 0.025%C a 723 °C, y disuelve sólo 0.008%C a temperatura ambiente. ^[1]

Austenita (Fe- γ): Es una solución sólida de carbono en hierro gamma puede contener desde 0 a 1.7%C y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros y hierros se encuentran formados por cristales de austenita cuando se calienta por encima de las temperaturas críticas A_{c3} o A_{cm} . Es un constituyente inestable a la temperatura ambiente. ^[2]

Grafito: Forma elemental del carbono es relativamente blando, en los hierros colados puede precipitar en forma de hojuelas, esferoides o vermiculos dependiendo el tipo de hierro, en los cuales sirven como auto lubricante así como también amortigua las vibraciones y brinda resistencia a altas temperaturas.

El grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, disminuye el desgaste por fricción por roce de componentes en piezas de máquinas y motores, ya que en cierto modo actúa como un lubricante. También mejora la maquinabilidad y reduce las contracciones durante la solidificación. Cuando se presenta en forma de esferoides, se incrementa la resistencia y la tenacidad en comparación con los hierros grises. Por ello estas fundiciones tienen mayor resistencia y porcentajes de elongación, que las fundiciones grises ordinarias. ^[1]

Microconstituyente: Son aquellas unidades presentes a nivel microscópico que son formadas a partir de una fase o como producto de una reacción y que a su vez forman y caracterizan a un material.



Las tres reacciones más importantes en el diagrama Fe-C son:

- Reacción peritectica



- Reacción eutéctica



- Reacción eutécticoide



Perlita: Microconstituyente eutécticoide formado por láminas alternadas de ferrita y cementita ($\text{Fe}-\alpha - \text{Fe}_3\text{C}$) Las propiedades que presente la perlita dependerá del interlaminado que posea ya que se cuenta tanto con perlita fina como con perlita gruesa, presenta una resistencia de 80 kg/mm^2 y un alargamiento de 15% aproximadamente.

Ledeburita: Este microconstituyente se forma durante el enfriamiento de las fundiciones a $1145 \text{ }^\circ\text{C}$. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada. La ledeburita no es estable a temperatura ambiente, debido a que durante el enfriamiento se convierte en cementita y perlita.

Ledeburita transformada: La ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones, sin embargo, se pueden conocer las zonas donde existió por el aspecto eutéctico que presenta la cementita y perlita



en las cuales se transformó durante el enfriamiento, dichas zonas son llamadas pseudoledeburita o ledeburita transformada. ^[1]

Cementita: Es un carburo de hierro (Fe_3C) que contiene 6.67% de C y 93.33% de Fe, este microconstituyente se considera el más duro y frágil en los hierros, teniendo una dureza superior a 68 Rockwell C.

1.1.2 Diagrama Fe- Fe_3C (Cementita)

También llamado diagrama metaestable es el más utilizado en cuanto aceros o hierros blancos se refiere, esto debido a que el carbono se encuentra ligado al hierro en forma de Fe_3C (Cementita), las fases y microconstituyentes se enlistan a continuación y se expresan en la Figura 1.1

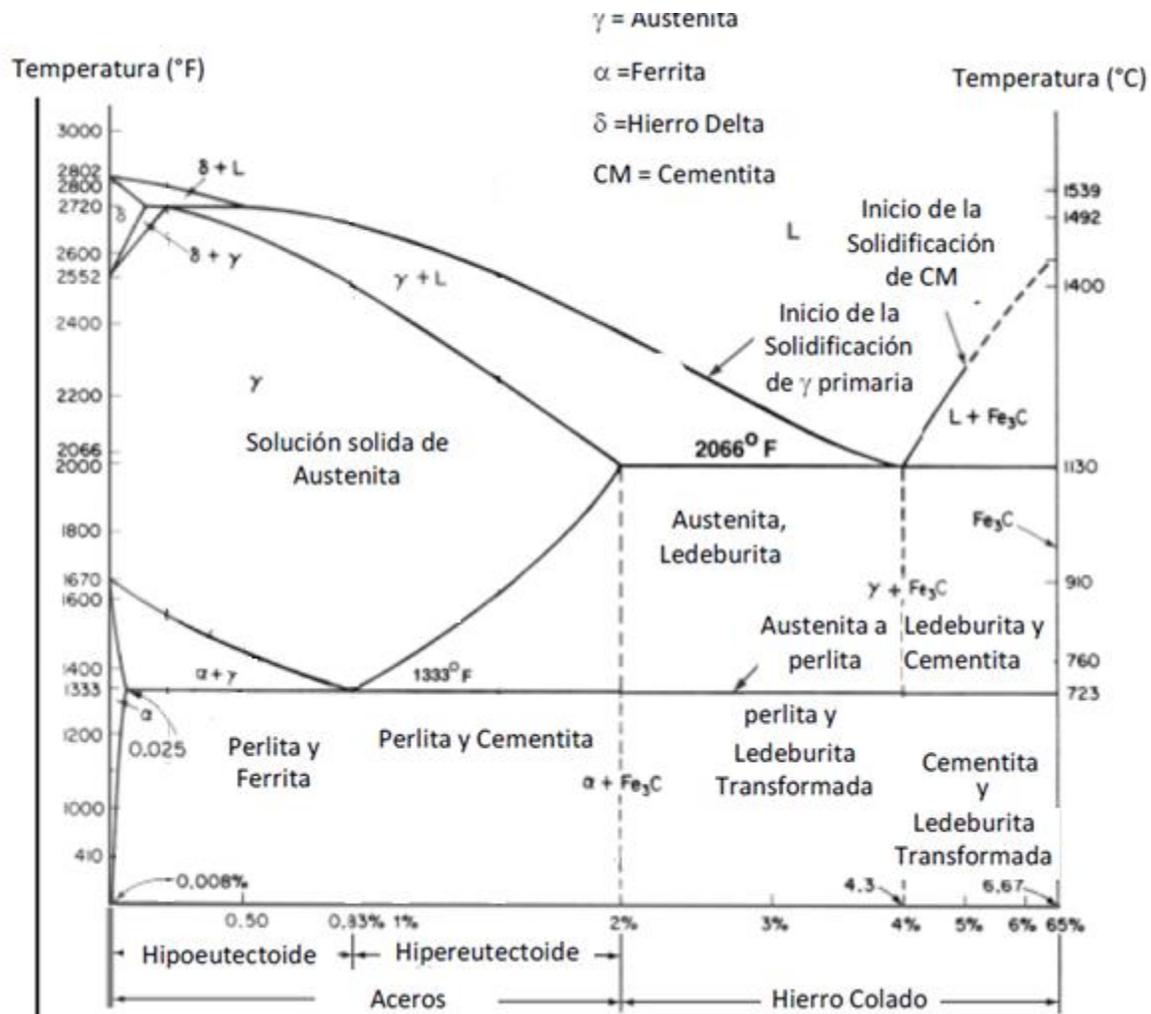


Figura 1.1 Diagrama de Fases Metaestable (Fe-Fe₃C)^[2]

Durante la formación de cementita, los átomos de hierro no necesitan difundir lejos de donde nuclean, así la formación de cementita es sencilla, por lo que se considera como una fase. ^[3]

La cementita, manteniéndose a altas temperaturas en un tiempo prolongado, se descompondrá de la siguiente manera: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$ grafito, lo que permite la formación de carbono grafito. Esto es evidencia de que la velocidad de enfriamiento no puede ser demasiado pequeña; ya que se encuentran en equilibrio relativo, es por ello que recibe el nombre de diagrama metaestable.



1.1.3 Diagrama Fe-C (grafito)

El diagrama Fe-C (grafito) como se observa en la Figura 1.2, es utilizado cuando se habla de hierros colados debido a que es en ellos donde por el alto contenido de carbono así como por la presencia de otros elementos como el Si, Mg, Ca, Cu, Al, se obtiene el carbono grafito libre.

Las temperaturas de la transformación eutéctica y eutectoide presentan una variación con respecto a las reportadas para un diagrama metaestable así también las líneas solidus y liquidus son ligeramente mayores y se desplazan hacia la izquierda, en el diagrama estable encontraremos como fases: ferrita y grafito.

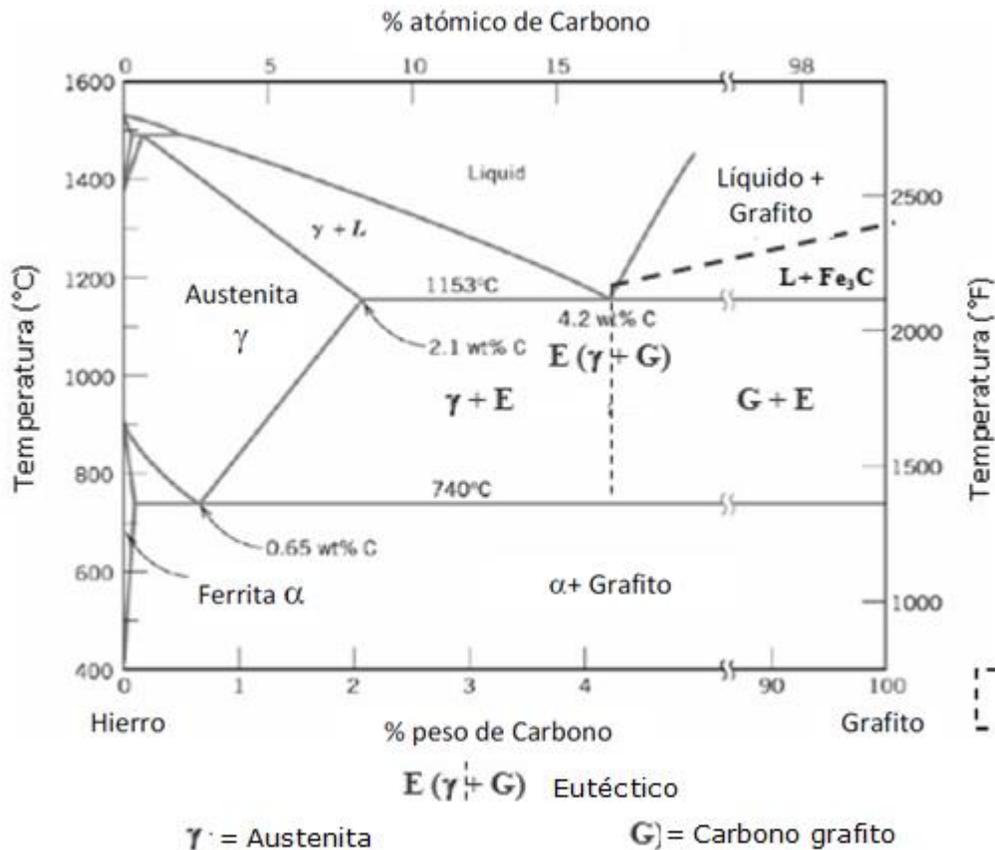


Figura 1.2 diagrama de fases estable para Fe-C (grafito).



1.2 Carbono equivalente

El concepto de carbono equivalente (CE) es utilizado en los hierros colados siendo una herramienta de gran utilidad en fundición, debido a que el estudio del diagrama Fe-C se facilita al considerar el efecto de otros elementos y de esta manera no utilizar un diagrama ternario; su influencia cuantitativa se da en relación al % carbono y % silicio. En los hierros nodulares el carbono equivalente debe ser de aproximadamente 4.5% esto debido a que con ese valor se obtiene un esferoide de buena calidad y se previene significativamente la formación de carburos. [4]

Matemáticamente el carbono equivalente se define como:

$$CE = \%C_T + 0.3(\%Si) + 0.33(\%P) - 0.027(\%Mn) + 0.4(\%S) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

CE = Carbono Equivalente

$\%C_T$ = Porcentaje de Carbono total en la aleación

$\%Si$ = Porcentaje de Silicio en la aleación

$\%P$ = Porcentaje de Fosforo en la aleación

$\%Mn$ = Porcentaje de Manganeso en la aleación

$\%S$ = Porcentaje de Azufre en la aleación

1.3 Hierros Colados

Las aleaciones ferrosas se dividen principalmente en dos grupos aceros (bajo contenido de carbono) y hierros colados (altos contenidos de carbono).

Se les denomina hierros colados a las aleaciones ferrosas que presentan un porcentaje de carbono mayor al 2% y hasta un 6.67%, en ellos podemos encontrar hierros hipoeutéticos (2%C - 4.2%C), eutéticos (4.3% C) e hipereutéticos (4.4%C - 6.67%C) de igual forma



que en los aceros se basaran en el contenido de carbono presente. Los hierros colados son realmente un sistema ternario sin embargo son estudiados en un diagrama binario ya que es de más fácil manejo, esto se logra gracias a que la influencia de los otros elementos como el silicio son contemplados en el cálculo de lo que se conoce como carbono equivalente.

1.4 Clasificación de los Hierros

Los hierros colados están clasificados de la siguiente forma:

1. Hierros Blanco
2. Hierros Gris
3. Hierro dúctil (hierro esferoidal)
4. Hierro Vermicular

1.4.1 Hierro blanco

Todos los hierros reciben su nombre debido a sus características físicas, microestructurales o mecánicas, en el caso del hierro blanco se debe a su microestructura debido a que el carbono esta combinado totalmente en forma de carburo de hierro y el color de la fractura es blanca y brillante, su composición química va de 1.8% hasta 3.6% de carbono, sus propiedades mecánicas no son las mejores ya que es extremadamente duro y a su vez demasiado frágil, por lo cual no es maquinable, estas características son la causa de que sea una de las aleaciones de Fe menos utilizadas.

1.4.2 Hierro gris

La razón por la cual este hierro recibe su nombre es debido al color gris que presenta su fractura. A diferencia de un hierro blanco, el hierro



gris presenta en su microestructura al carbono en su forma de grafito libre lo que proporciona como resultado propiedades adecuadas de aplicación ingenieril y totalmente diferentes a las de un hierro blanco. La mayoría de los hierros grises son hipoeutéticos (2%C – 4.2%C) el carbono grafito puede presentarse de diversas maneras ya sea en placas, hojuelas ó rosetas.

La obtención del carbono grafito libre se ve afectado por la velocidad de enfriamiento ya que a velocidades de enfriamiento rápidas se favorecerá la obtención de un hierro blanco; esto es, el carbono se encontrara en forma de carburo de hierro por otro lado a velocidades de enfriamiento intermedias la obtención de un hierro moteado será la que presenta mayor probabilidad de obtenerse, en la cual una fracción del carbono se encontrará de forma libre como grafito en forma de hojuelas y el resto estará en forma de carburo de hierro, a bajas velocidades de enfriamiento no se obtienen carburos de hierro y predominan las hojuelas de carbono grafito libre, sin embargo estas pueden presentar diversas formas que se observan en la Figura 1.3 y las cuales son establecidas en la norma ASTM A 247. [5]

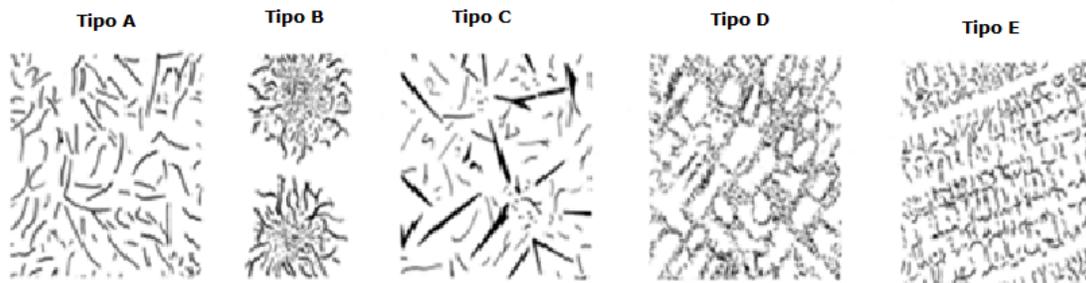


Figura 1.3 Tipos de hojuelas en las que se presenta el carbono grafito libre en un hierro gris. [5]



El grafito tipo A es el deseado ya que las hojuelas se presentan en forma aleatoria, y también presenta una mejor resistencia al desgaste.

El grafito tipo B conocido como roseta, es el resultado de un rápido enfriamiento, por lo general se da en piezas delgadas o puede ser ocasionado por una baja inoculación.

El grafito tipo C son placas de grafito, se obtiene en hierros hipereutecticos, los cuales presentan una mayor resistencia al choque térmico.

El grafito tipo D y E se da por una alta velocidad de enfriamiento, en ambos se presenta una segregación interdendrítica. En el grafito tipo D se adquiere una orientación aleatoria de las hojuelas de carbono grafito mientras que en el grafito tipo E dicha orientación es preferencial.

1.4.3 Hierro dúctil

Recibe su nombre debido a la forma en la cual se encuentra el carbono grafito en forma de esferoides, y es gracias a ello y dependiendo del grado de hierro presenta un cierto porcentaje a la elongación (2% al 16% de elongación). El hierro dúctil se obtiene a partir de diversos tratamientos al metal líquido, sin embargo uno de los elementos que juega un papel fundamental en la formación de esferoides es el Magnesio (Mg) el cual debe encontrarse en forma residual a partir del 0.04%-0.06%, la formación de esferoides también puede ser obtenida por la adición de tierras raras o elementos alcalinotérreos los cuales actúan sobre el metal líquido como desoxidantes, desulfurantes y estabilizadores de carburos.



La microestructura que se presenta en el hierro dúctil es de esferoides de carbono grafito libre, en ellos se pueden obtener matrices perlíticas, ferríticas o una combinación de ambas. En la Figura 1.4 se observa un hierro dúctil con una matriz perlítica-ferrítica. [1]

En este tipo de hierros se debe considerar el efecto negativo del azufre el cual no debe exceder el 0.015% ya que este elemento al entrar en contacto con el Mg forma sulfuro de magnesio (MgS), por lo cual el Mg residual puede no alcanzar el porcentaje necesario para la formación de los esferoides.

La nomenclatura utilizada para nombrar a los hierros dúctiles es la siguiente XXX - XX - XX, los 3 primeros dígitos son referentes a la resistencia a la tracción los 2 siguientes son el valor del límite elástico que presenta la aleación estas dos propiedades están expresadas en ksi y por último los 2 dígitos siguientes hacen referencia al % elongación, estos requerimientos son dados por la norma A 536 de la ASTM.

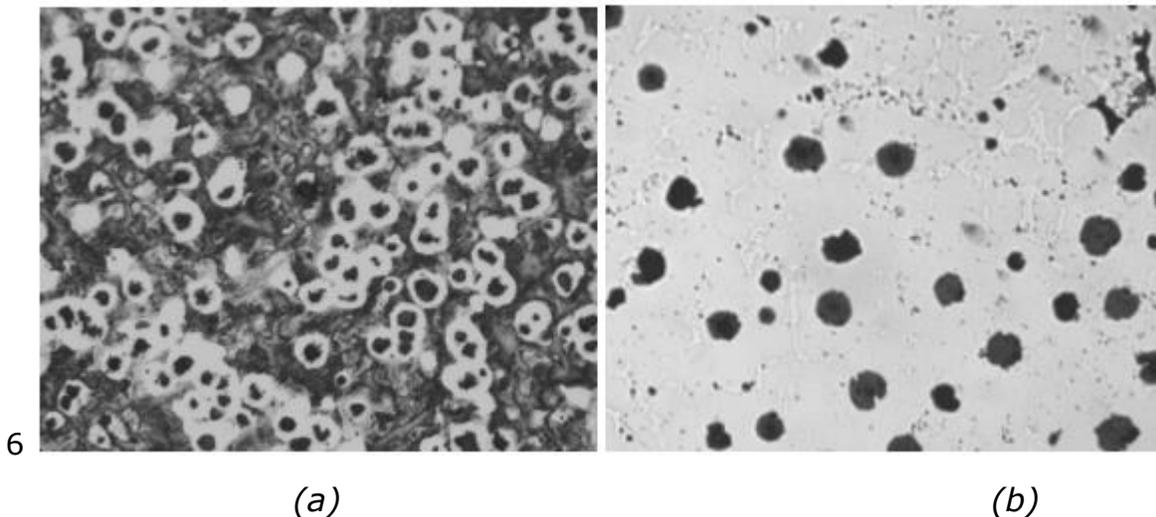


Figura 1.4 Hierro dúctil (a) Metalografía con ataque, con ferrita alrededor de los esferoides y una matriz perlítico-ferrítica (b) Metalografía sin ataque, presencia del carbono grafito libre en forma de esferoides.



1.4.4 Hierro vermicular

En este tipo de hierro el carbono grafito precipita en forma vermicular o de gusano, se encuentra en un punto intermedio entre el hierro gris y el hierro nodular.

Su morfología que recibe el nombre de vermiculos tiene forma de gusano ya que es alargada y redonda en las puntas, sin embargo, no todo el carbono grafito se presenta en esta forma de vermiculos, ya que una pequeña fracción precipita en forma de esferoides perfectamente formados.

Este tipo de hierro se obtiene principalmente por un bajo porcentaje de magnesio residual o debido a un periodo de tiempo prolongado desde el tratamiento de nodularización hasta el momento de la colada.

1.5 Aplicaciones de hierros colados

El hierro blanco es utilizado en partes de maquinaria para el proceso de materiales abrasivos, rodillos para trenes de laminación y zapatas de frenos en carros de ferrocarril. En el caso de los hierros grises se pueden emplear en motores, bases y superficies de máquinas que estén sometidas a desgaste y carcasas de motores eléctricos.

Las aplicaciones típicas del hierro dúctil (grafito esferoidal) las podemos encontrar en el área automotriz en partes para suspensiones, transmisiones, sistemas de dirección y algunas piezas del motor, en el sector agrícola se pueden emplear para tractores, como en tuberías se utiliza en bombas y válvulas sujetas a altas presiones y temperatura. En muchos otros componentes como engranajes, tuercas, ejes, componentes



hidráulicos que operan a alta presión tales como, émbolos, guías, camisas, válvulas hidráulicas, placas, etc.

El hierro vermicular posee propiedades de amortiguamiento y térmicas semejantes a las del hierro gris, una resistencia y rigidez similar a la del hierro dúctil. Mientras que el hierro maleable es empleado en equipos de ferrocarril y en varios tipos de herrajes.

1.6 Elementos aleantes en los hierros

Una de las clasificaciones que se tiene para estos elementos se da en función de su poder grafitizante o en su defecto el poder de blanqueado que presenta cada uno, dicha clasificación se presenta en la Figura 1.5

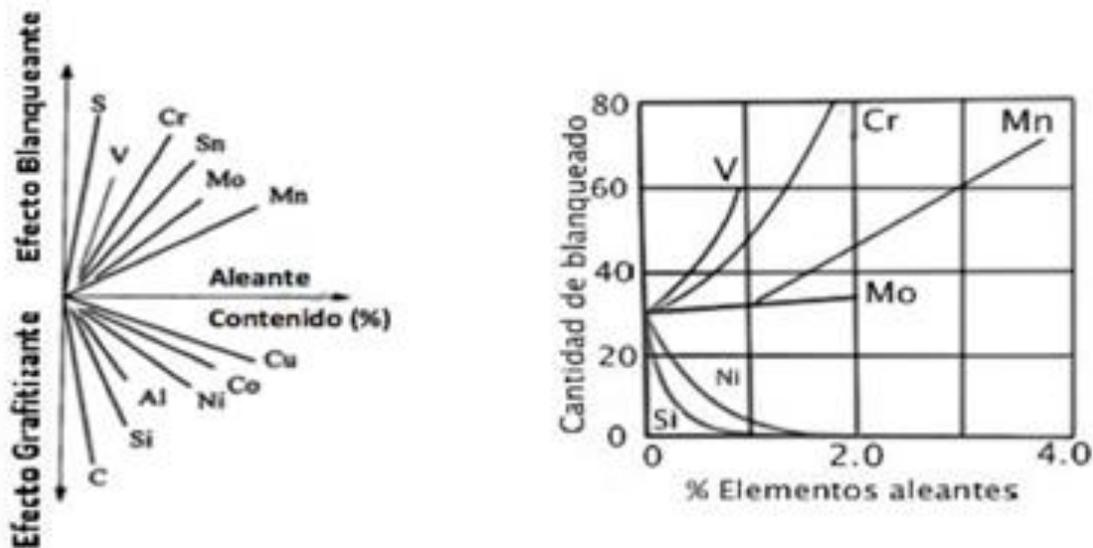


Figura 1.5 Efecto que presenta cada elemento en un Hierro ya sea como grafitizante o como elemento formador de carburos (blanqueador).

Los elementos de aleación presentes en los hierros y aceros son: el Carbono, Silicio, Manganeso, Fósforo y Azufre, se conocen así debido a su presencia en cualquier hierro, sin embargo, su porcentaje varía dependiendo al porcentaje en el cual están presentes se puede determinar



el tipo de matriz o la aparición de defectos cuando se tienen en porcentajes elevados. El principal elemento de aleación para cualquier tipo de la aleación ferrosa es el carbono ya que en el caso de los hierros colados es el que se encontrara en mayor porcentaje.

Los elementos aleantes son elementos que se añaden al metal líquido para modificar microestructuras, inhibir el efecto de otro elemento dentro de la aleación o incrementar propiedades. Debido a que estos elementos modifican la temperatura eutéctica estable (TEE) y la temperatura eutéctica metaestable (TEM). Teniendo como ejemplo de algunos elementos aleantes al: Cromo, Vanadio, Molibdeno, Cobre, Níquel y Titanio.

1.7 Formación de carburos

La formación de carburos en fundiciones de hierro está influenciada por dos factores: el termodinámico y el cinético.

El factor termodinámico se vincula con la variación de la composición química que es originado por la micro segregación que ocurre durante la solidificación, favorecido por la presencia de elementos formadores de carburos.

El factor cinético hace referencia al hecho de que una alta velocidad de enfriamiento tiende a una fundición blanca (con carburos ledeburíticos y libres), mientras que un enfriamiento lento favorece la formación de Carbono grafito. [6]

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS



2.1 Hierros dúctiles

Un hierro dúctil es caracterizado por los dos tratamientos al metal líquido que se le realizan los cuales son nodularización y la inoculación (temprana y tardía).

El carbono equivalente para este hierro se encuentra entre 4.4% y 4.7% los valores altos son usados en piezas que presentan un bajo espesor esto se realiza con la finalidad de evitar un blanqueamiento en dicha zona por consiguiente el valor más bajo de este rango es utilizado para piezas de espesores gruesos ya que al disminuir su velocidad de enfriamiento el blanqueado se ve abatido.

Además de los tratamientos que lo conforman también es característico de este tipo de hierro las propiedades que presenta ya que en comparación a un hierro gris este tiene mayor dureza, alto módulo de elasticidad y presenta una mayor tenacidad; esto es provocado por la presencia del carbono grafito en forma de esferoides y a su menor distorsión dentro de la red cristalina en comparación a la provocada por las hojuelas formadas en el hierro gris.

2.1.1 Clasificación de los hierros dúctiles

En cuanto a la composición química las diferencias que presentan los hierros dúctiles con respecto a los hierros grises son los porcentajes de P, S y Mg. El Mg es el elemento responsable de dar al carbono grafito libre la forma esferoidal, con respecto a otros elementos como el Cu y Mn su porcentaje dentro de los hierros estabilizan diferentes tipos de matriz y así se da la clasificación de los hierros dúctiles.

Hierros dúctiles:

- Ferrítico



- Perlítico
- Perlítico –Ferrítico , Ferrítico- Perlítico
- Martensítico
- Austenítico
- Austemperizado

2.1.2 Hierros dúctiles ferríticos

En esta primera clasificación el carbono grafito que se encuentra en forma de esferoides se verá en una matriz de ferrita por lo cual presentará las siguientes propiedades.^[7]:

- Alta Ductilidad
- Alta Resistencia al Impacto
- Buena Maquinabilidad

2.1.3 Hierros dúctiles perlíticos

En esta aleación los esferoides se encontrarán una matriz de perlita (Ferrita + Cementita) por lo cual para obtener este tipo de matriz es recomendable que el cobre no sobrepase un máximo de 2.5%Cu, por el tipo de matriz las propiedades que presentan estos hierros son las siguientes:

- Relativamente Duros
- Moderada Resistencia al Impacto
- Buena Maquinabilidad
- Poca Conductividad Térmica

2.1.4 Hierros Dúctiles Ferrítico – Perlítico

En esta aleación los esferoides se encuentran en una matriz combinada entre ferrita y perlita esta es una de las aleaciones más



comunes entre los hierros dúctiles. Puede ser nombrada como hierro dúctil Ferrítico - Perlítico o Perlítico – Ferrítico, la diferencia radica en que el micro constituyente que se encuentre en mayor cantidad en la matriz será nombrado primero. Sin ver la microestructura pero conociendo la composición química se puede conocer qué tipo de matriz presenta el hierro, el elemento que nos indica dicho efecto es el Mn con la siguiente relación:

$$\%Mn = 0 - 0.15 \text{ (100\% Ferrítico)}$$

$$\%Mn \geq 0.4 \text{ (100\% Perlítico)}$$

En este tipo de hierros dúctiles se obtiene una microestructura típica llamada comúnmente "Ojo de Buey" Figura 2.1, esto debido que a simple vista el esferoide en conjunto con la matriz son muy similares a un ojo, este efecto se da debido a que la ferrita es muy afín al esferoide ya que la ferrita como se sabe tendrá un bajo contenido de carbono.

Sus propiedades por consiguiente se encontrarán entre las de un hierro dúctil ferrítico y un hierro dúctil perlítico, por otro lado también presenta características especiales como por ejemplo que es el de menor costo de fabricación dentro de los hierros dúctiles [15].

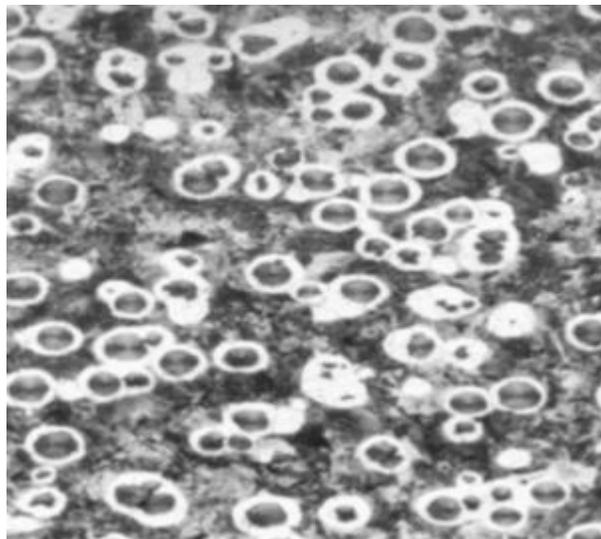


Figura 2.1 hierro dúctil con matriz perlítico –ferrítico, se aprecian los "ojo de buey" formados alrededor de los esferoides [8].



2.1.5 Hierro Dúctil Martensítico

Este presenta una mayor dureza y fragilidad propiedades características del microconstituyente martensita, por esta razón el hierro dúctil martensítico solo es utilizado si está acompañado de un tratamiento térmico de temple ya que dicho tratamiento proporciona a la aleación una alta resistencia mecánica, una dureza aceptable que oscila entre 250-300 HB (Dureza Brinell) y también una alta resistencia a la corrosión.

2.1.6 Hierro Dúctil Austenítico

Presenta diversas propiedades por las cuales son comúnmente utilizados entre ellas se encuentra; buena resistencia mecánica, resistentes a la corrosión, resistencia dimensional a altas temperaturas y propiedades magnéticas. Dentro de la clasificación de los hierros se cuenta con dos subdivisiones los hierros colados (obtenidos directamente por colada): blanco, gris, dúctil y vermicular y los hierros obtenidos a partir de tratamientos térmicos: maleable, ADI (austempering ductile iron), CADi (carbide austempering ductile iron). En el capítulo I se definieron los hierros colados, por lo que en este apartado se puntualiza la formación de los hierros obtenidos a través de tratamiento térmico.

2.2 Hierros ADI

El Hierro ADI (Austempering Ductil Iron) es un hierro dúctil, aleado o no, tratado térmicamente cuya matriz contiene ferrita acicular y austenita con alto carbono donde la presencia de ambos microconstituyentes es llamado ausferrita este tipo de hierros son la segunda aleación de la familia de los hierros obtenida a partir de un tratamiento térmico.



Su primera aparición se dio en la década de 1950, pero no fue sino hasta 1970 cuando se dieron a conocer las especificaciones para la fabricación y tratamiento de los hierros ADI por la ASTM A 897-90.

Para su fabricación se toman como base a los hierros dúctiles, y posteriormente dicho hierro es sometido a un tratamiento térmico de austenización que será seguido por un tratamiento llamado austemperizado. La implementación más importante para esta aleación se ha dado en la industria automotriz las razones de esto son las siguientes:

Reducción de costos: un Hierro ADI tiene un menor costo en comparación a los aceros, una pieza de acero VS una pieza de hierro ADI se da en favor al segundo ya que este al formarse a partir de un hierro obtenido por colada su costo es menor al maquinado de una pieza de acero.

Reducción en Peso: Las piezas fabricadas con Hierros ADI son hasta un 10% más ligera que las fabricadas con Acero. ^[9].

2.3 Hierros CADI

Una de las últimas evoluciones del hierro dúctil son los hierros CADI (Carbide Austempering Ductile Iron), primero se obtiene el hierro dúctil con un alto porcentaje de carburos directamente de colada, para posteriormente realizar un tratamiento térmico de austemperizado. Su gran utilidad radica en su resistencia al desgaste combinada con la tenacidad que se puede obtener dependiendo de su matriz, es por ello que puede competir contra aceros aleados con tratamiento térmico de revenido. Como su nombre lo indica este tipo de hierros tendrá una fracción de carburos preferentemente aleados debido a la estabilidad que presentan al realizar el tratamiento térmico de austemperizado, dicha



fracción debe mantenerse controlada ya que no es factible producir desmedidamente dichos carburos. La mayor aplicación de los Hierros CADI se da en la industria de agricultura, por qué se utiliza en placas de desgaste, puntas para excavadora etc. Una de las ventajas que presenta el Hierro CADI en comparación al hierro ADI es la alta resistencia a la abrasión debido a la microestructura obtenida que consiste de una cantidad controlada de carburos en una matriz ausferrítica y la presencia de esferoides de grafito. El proceso de fabricación es similar al que se realiza en un hierro dúctil en cuanto a tratamientos al metal líquido así como a su ajuste de composición y las ferro aleaciones utilizadas, con la diferencia de que en el caso del Hierro CADI se agregan elementos aleantes que favorecen la formación de Carburos como el cromo, molibdeno, vanadio o titanio.

2.4 Tratamiento de Austempering

Este tratamiento es la razón de la existencia y utilidad de los hierros ADI y CADI, el cual iniciará con un tratamiento de austenización, el cual consiste en someter a la aleación a un calentamiento isotérmico con la finalidad de transformar toda su microestructura en austenita esto se logra con temperaturas que están en el rango de 850°C- 950°C, una vez que se logre el objetivo de tener únicamente austenita como fase se procederá a un enfriamiento en un baño de sales el cual se encontrará entre 350°C -500°C. En la Figura 2.2 se ejemplifica el ciclo a seguir durante un tratamiento de autemperizado.

Durante estos tratamientos se dan como resultado dos etapas:

- *Etapa 1 Transformación Parcial de Austenita*

Austenita \longrightarrow Ferrita Acicular + Austenita

- *Etapa 2 Descomposición de Austenita Metaestable*



Austenita \longrightarrow Ferrita + Carburos

Para realizar este tratamiento se debe tener controladas todas las variables que actúan sobre el como son; La composición química, la calidad metalúrgica de la aleación (nodularidad, matriz, densidad de esferoides), el tiempo del tratamiento de austenización (definido por el espesor de la pieza), la temperatura y tiempo del tratamiento isotérmico^[10].

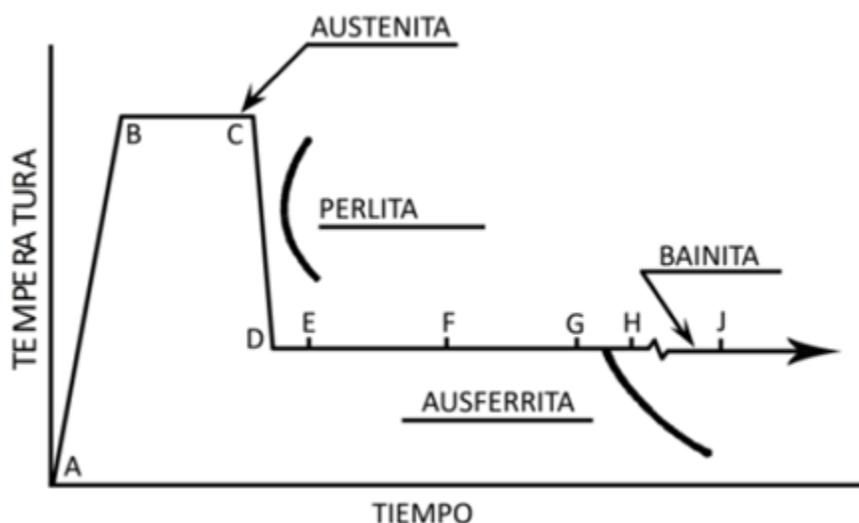


Figura 2.2 Diagrama del Ciclo para un tratamiento de Austemperizado ^[10].

2.5 Horno de inducción sin núcleo

El horno sin núcleo consta de un crisol totalmente rodeado de una bobina de cobre, enfriada por agua, a través de la cual pasa la corriente que genera el campo magnético, lo que calienta el crisol y funde el metal en su interior. Sin embargo al tener baja temperatura en la superficie no posee la conductividad necesaria para fusionar la escoria.



Dado que se presenta una fuerte acción de agitación electromagnética durante el calentamiento por inducción este tipo de horno tiene la ventaja de agregar nuevas cargas al metal mientras está en funcionamiento.

En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de este tipo de horno señalando sus principales componentes.

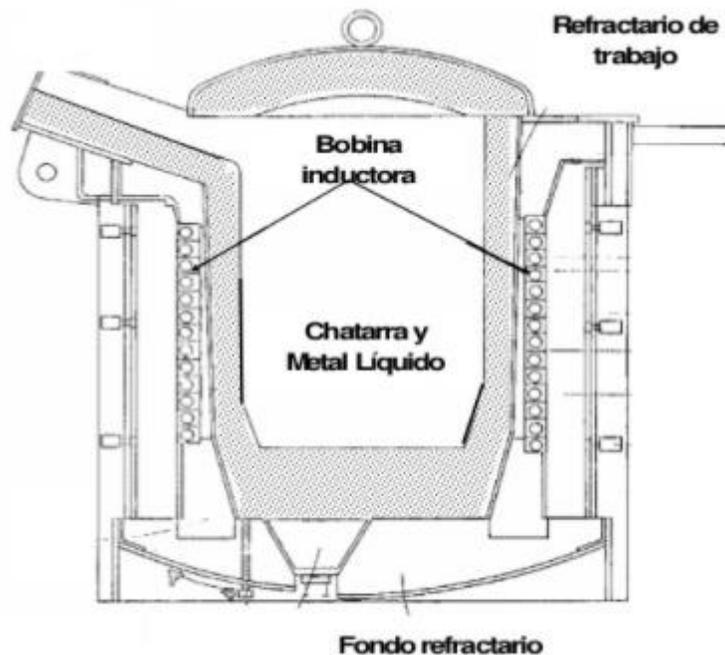


Figura 2.3 Horno de inducción sin núcleo donde se muestran sus principales componentes.

2.6 Tratamientos del metal líquido

Como ya se ha hecho mención el hierro dúctil cuenta con dos tratamientos al metal líquido el más característico y por lo cual recibe dicho nombre es la nodularización ya que gracias a este tratamiento es como se logra que el carbono grafito que aparecía en los hierros grises en forma de hojuelas esta vez tome la forma de esferoides. El tratamiento



de inoculación no siendo menos importante es necesario para lograr centros de nucleación y se dé la precipitación del carbono grafito y así evitar que el carbono presente en la aleación en forma de carburos dentro de la microestructura.

2.6.1 Inoculación

La inoculación en un hierro dúctil es uno de los tratamientos al metal líquido que consta de adicionar Fe-Si del cual su composición oscila entre 75-85% Si y que además contiene pequeñas cantidades de calcio y aluminio aproximadamente 1%. Su adición tiene como finalidad favorecer la precipitación de carbono grafito por lo cual este tratamiento reduce el efecto de blanqueado (formación de carburos), en el caso del hierro dúctil el tratamiento de inoculación promueve un aumento en la precipitación de esferoides.

El aluminio y calcio que se encuentran en el inoculante cumplen la función de generar centros de nucleación para la precipitación de carbono grafito en forma de esferoides, los que presentan menor eficiencia son aquellos que contienen una mayor cantidad de aluminio en comparación a la cantidad de calcio, sin embargo los que contiene prácticamente la misma cantidad de estos elementos presentan una mayor eficiencia.

La clasificación de los inoculantes es muy general

- Simples: Calcio, Bario, Estroncio, Cerio y Aluminio
- Complejos: base Fe-Si los cuales contienen pequeñas cantidades de los inoculantes simples

Los elementos que se consideran inoculantes simples juegan un papel sumamente importante, ya que prácticamente el tratamiento de inoculación se da por ellos, los cuales actúan de la siguiente manera; Al



ser introducidos en el baño metálico su poca o casi nula solubilidad dentro de él da como resultado la formación de zonas desulfuradas o desoxidadas, durante este proceso una parte del elemento de inoculación es consumido y el resto reacciona formando Carburos (CaC_2 , BaC_2 , SrC_2) puesto que los parámetros de la estructura cristalina son similares a la del grafito, los carburos por consecuencia actúan como nucleadores de carbono grafito, así pues cuan mayor sea el número de partículas de carburos mayor será la cantidad de lugares de nucleación.

El aluminio por el contrario no forma carburos, con este elemento se forma Al_2O_3 , pero el efecto dentro del baño metálico prácticamente es el mismo.

Si estos elementos (inoculantes simples) son los principales encargados de la nucleación por qué utilizar Fe-Si, El Si como tal proporciona zonas locales desoxidadas que facilitan la formación de carburos y así puedan cumplir su función de inoculantes.

Inoculación temprana: es aquella que se realiza en el vaciado del metal líquido de horno- olla

Inoculación tardía: este tipo de inoculación puede realizarse durante el vaciado de metal líquido de la olla – molde ó colocar el inoculante directamente en el molde antes de verter el metal líquido

2.6.2 Nodularización

Este tratamiento al metal líquido puede llevarse a cabo de diferentes formas, es por ello que dichos procesos se dividen en 5 grupos o métodos

- I. Método de Olla
- II. Métodos continuos o semicontinuos
- III. Método en el molde
- IV. Por convertidores



V. Método de procesos presurizados

En el grupo I, método de olla se encuentra una subdivisión: sandwich, olla abierta y tapón poroso. El método sandwich es utilizado en el presente trabajo. La olla debe presentar una relación entre la altura y el diámetro de la misma que estas pueden ser de 1.5:1 y hasta 3:1, la ferroaleación es colocada en un compartimento en el fondo de la olla, el cual debe tener un ancho que sea igual a un tercio del diámetro y una altura equivalente a un sexto del diámetro. La ferroaleación es recubierta por una capa de material sólido, el cual tiene la finalidad de retardar la reacción con el Mg, con ello se logra un mayor rendimiento que se da entre el 40% y 50%. Para lograr precipitar el carbono grafito en forma de esferoides, se requiere de un magnesio residual entre el 0.03% y 0.04%, por ello se deben de tener en cuenta para el cálculo de adición de Mg, aquel que se volatiliza, el que reaccionara con el azufre, el que se oxida y el residual para así cumplir con el requerimiento del porcentaje del magnesio residual. A continuación en la Figura 2.4 se muestra las dimensiones de la olla.

Entre las principales ventajas del método de sándwich se encuentra:

1. Bajo costo de inversión
2. Flexibilidad

Mientras que algunas desventajas son:

1. La eficiencia de Magnesio es muy baja
2. Se debe sobrecalentar el metal líquido para compensar el enfriamiento que se tendrá al entrar con el nodulizante, se debe tener en cuenta que a mayor temperatura la eficiencia disminuye.

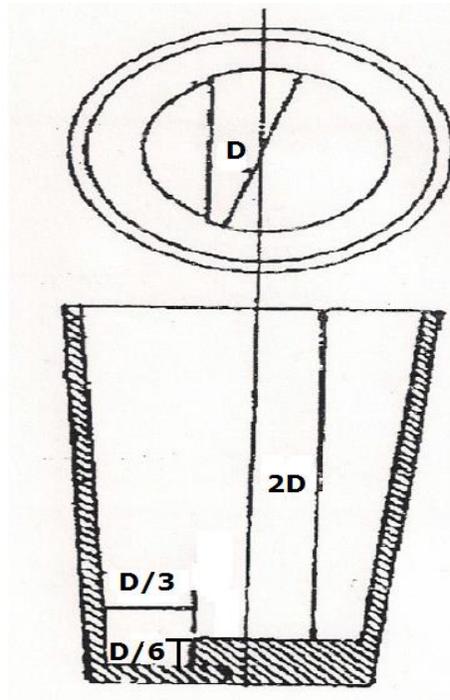


Figura 2.4 Diagrama representativo de las dimensiones necesarias de una olla utilizada en el método sandwich.

2.6 Efectos de elementos de aleación

Uno de los principales elementos de aleación en los hierros colados es el carbono, un porcentaje se encuentra en forma de carbono grafito, mientras que el resto se disuelve en fases presentes o en la formación de carburos estables durante la solidificación.

El efecto que se presenta en la microestructura dependerá de la cantidad de cada elemento con la que se cuente como por ejemplo:

Manganeso: Se presenta como estabilizador y refinador de la perlita lo cual ocasiona una reducción de la ductilidad y maquinabilidad, disminuye la actividad del carbono incrementando su solubilidad por lo cual se considera un promotor en la formación de carburos, esto se traduce en un aumento en la dureza del hierro, dicho elemento tiende a disminuir la temperatura crítica superior de austenización lo cual es muy



útil en el tratamiento térmico para la formación de los hierros CADI, en base a sus porcentajes se puede definir la matriz ya que si el contenido es bajo se presentara una matriz ferrítica y se encuentra en altos contenidos la matriz será perlítica.

Silicio: Es un agente grafitizante, siendo el segundo elemento con mayor eficiencia después del C, incrementa la fluidez y favorece la presencia de una matriz ferrítica es por ello que se considera un elemento alfaceno, disminuye el tamaño de las celdas eutécticas obteniendo como resultado una disminución en la formación de carburos, esto depende de la efectividad de la inoculación.

El contenido de Si afecta directamente en las temperaturas eutécticas, aumentando la TEE y disminuyendo la TEM como se ejemplifica en la Figura 2.5 En el caso de las temperaturas eutectoides ambas aumentan con respecto al incremento del porcentaje de Si Figura 2.6 [11]

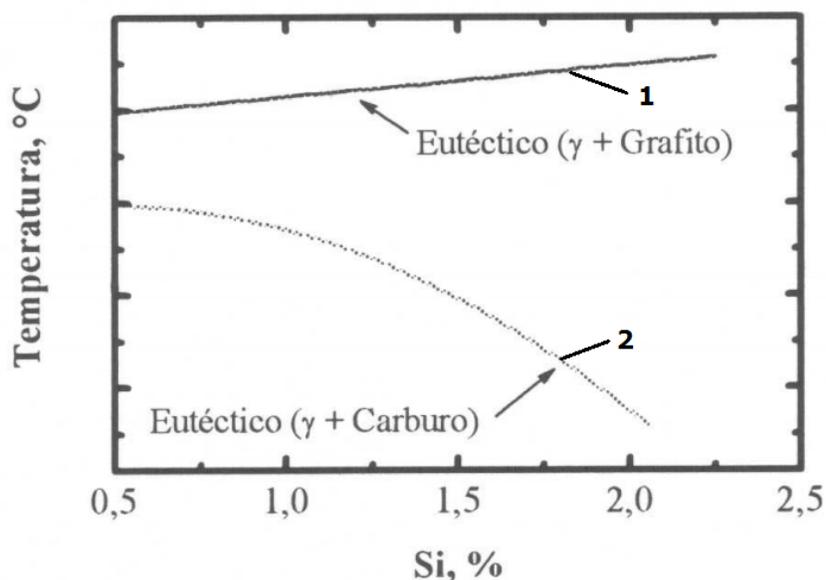


Figura 2.5 Efecto del Si en temperaturas eutécticas 1) Temperatura eutéctica estable 2) Temperatura eutéctica metaestable [12].

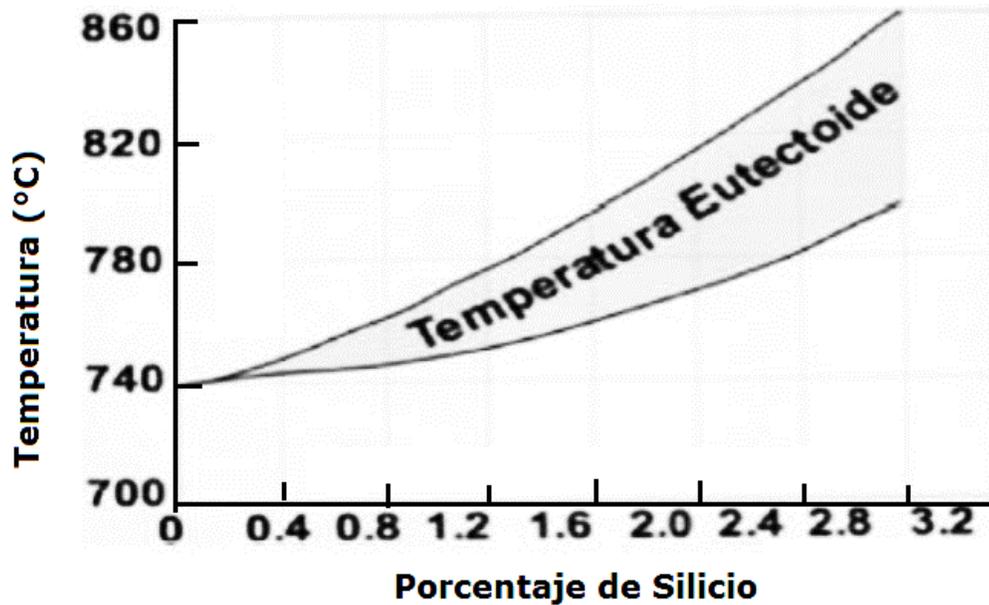


Figura 2.6 Efecto del Si en la temperatura eutéctica. [11]

Existen tres factores críticos en la formación de un hierro nodular: potencial de nucleación, composición química y velocidad de enfriamiento. Las dos primeras se ven involucradas con la eficiencia de la grafitización, controladas a partir del porcentaje de inoculación. Y la velocidad de enfriamiento determinará la ruta de solidificación a seguir por el diagrama estable o metaestable.

Algunos efectos negativos que presenta disminuye su resistencia al impacto, los niveles elevados Si y C tienen que estar controlados para evitar un exceso, teniendo como consecuencia la flotación de los mismos y un incremento en la cantidad de escoria.

Azufre: Cuando este elemento se encuentra en exceso tiende a formar sulfuros de hierro (FeS) compuesto intermetálico de bajo punto de fusión que puede ocasionar fisuras y fragilidad en caliente, también promueve la formación de carburos por ello obstaculiza la grafitización. En los hierros nodulares su concentración se debe mantener en niveles menores a 0.015% para evitar una nodularidad deficiente y disminución



en la eficiencia del magnesio por ello el tratamiento de desulfuración previo al de nodularización es tan importante si se cuenta con un alto contenido de azufre ya que es sumamente perjudicial porque reduce la fluidez y provoca rechupes en las piezas obtenidas por fundición.

Fósforo: contenidos mayores del 0.1% provocan fragilidad debido a que precipita la fase esteadita (Fe_3P) cercana a los límites de grano. Presenta un efecto pobre sobre la relación grafito/Cementita pero brinda mayor fluidez indirectamente esto debido al bajo punto de fusión.

Por dichas características es que los elementos de aleación están estrictamente controlados dentro de la clasificación de los hierros y los rangos de composición son muy cerrados.

2.7 Efectos de los elementos aleantes

Magnesio: De este elemento depende directamente la obtención de los hierros nodulares, es el encargado de definir la morfología que presenta el carbono grafito en la microestructura ya que a niveles menores de 0.01%Mg se obtendrá grafito en forma de hojuela (Hierro Gris) entre 0.01 y 0.03%Mg el grafito estará en forma de vermiculos (Hierro Vermicular) y con más de 0.035%Mg esferoides de carbono grafito libre (Hierro Nodular) Figura 2.7 esto es debido a que altera el mecanismo de solidificación disminuyendo la tensión superficial del baño metálico lo cual permitirá que los precipitados de carbono grafito crezcan en geometrías termodinámicamente más estables los cuales son los esferoides, su importancia también considera su comportamiento como desulfurante y desoxidante lo cual resulta en la formación de óxidos y sulfuros de Mg que presentan una baja densidad y solubilidad.

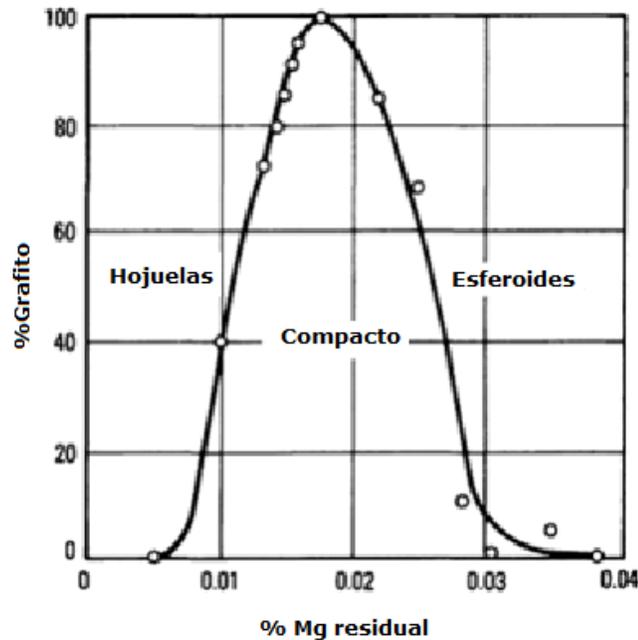


Figura 2.7 Influencia del Magnesio residual en la morfología del carbono grafito libre [4]

Cromo: Dicho elemento es de carácter alfégeno, tiene la característica de estabilizar la perlita de forma similar al Manganeso, mediante un incremento en la solubilidad del C en austenita, produciendo una perlita fina con ello aumenta el contenido de cementita dentro de la perlita y suprime la formación de carbono grafito, el cromo presenta una fuerte segregación durante el periodo de solidificación por dicho efecto es que se considera un fuerte formador de carburos, dichos carburos presentan enlaces muy fuertes con el carbono por lo cual se consideran carburos con alta estabilidad [1].

El cromo se segrega durante la solidificación promoviendo así la formación de carburos en las últimas zonas donde se lleve a cabo la solidificación, esto es causado porque los átomos de Cr pueden substituir a los de Fe. Los carburos de Cromo formados son Cr_3C (estructura ortorrómbica), Cr_7C_3 (estructura pseudo-hexagonal).



Aumenta el número de nódulos y la resistencia a la abrasión, mientras que sus efectos negativos son que tiende a formar subenfriamientos y un efecto sinérgico con el Mn.

Vanadio: es otro elemento estabilizador de la perlita con dicho elemento se forman carburos como VC o V_4C_3 , dicho efecto se presenta debido a que el vanadio causa un incremento en la temperatura eutéctica metaestable (TEM) y una disminución en la temperatura eutéctica estable (TEE). El vanadio forma carburos que presentan una mayor dureza en comparación a los obtenidos por la adición de cromo. El efecto que presentan los diferentes elementos aleantes y de aleación sobre las temperaturas eutécticas estable y metaestable se presenta en la Figura 2.8.

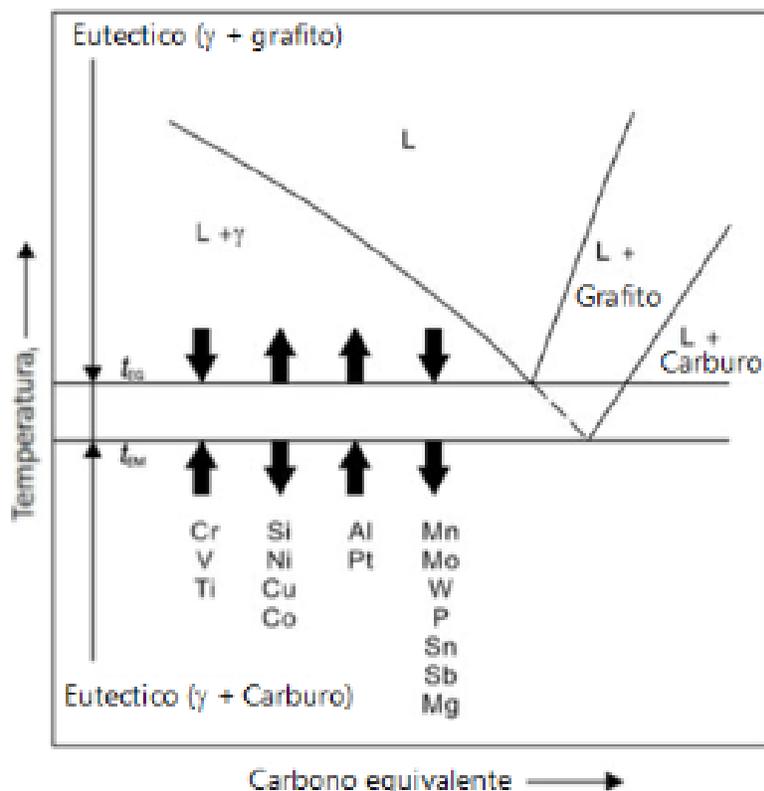


Figura 2.8 Efecto de los elementos aleantes sobre las TEM y TEE



En la Tabla 2.0 se presentan algunos de los elementos que pueden estar presentes en un hierro dúctil y los efectos que tienen sobre él.

Tabla 2.0 Se presentan los elementos y sus efectos sobre un hierro dúctil. ^[13]

<i>Elemento</i>	Efecto
<i>Cobre</i>	Elemento perlitizante.
<i>Estaño</i>	Cambia la forma del carbono grafito (esferoidal a laminar) y estabiliza la perlita.
<i>Plomo</i>	Elemento que en cantidades mayores al 0.005%, afecta la nodularidad.
<i>Calcio</i>	Utilizado en cantidades moderadas favorece a la precipitación de esferoides, en exceso disminuye nodularidad y favorece la formación de carburos.
<i>Boro</i>	Elemento indeseable que provoca esferoides irregulares y forma carburos.
<i>Aluminio</i>	Un contenido superior al 0.13%, disminuye nodularidad.
<i>Níquel</i>	Favorece grafitización y favorece la formación de perlita

2.8 Caracterización de hierro dúctil

Para caracterizar un hierro colado la AFS (American Foundrymen's Society), ha elaborado un atlas metalográfico en el cual se muestran imágenes que se consideran patrones para realizar una evaluación de algunos aspectos como: Tipo de carbono grafito, densidad de esferoides/mm², nodularidad, etc.



2.8.1 Tipo de carbono grafito

El carbono grafito se puede clasificar de acuerdo a su forma conforme a la norma ASTM A247-67 R98, donde las formas que presenta son: grafito laminar u hojuela (FG), grafito esferoidal (SG), grafito compacto o vermicular (CG) y grafito maleabilizado (TG) dicha clasificación está representada en la Figura 2.10.

a)

ASTM A 247 -67	ISO/R 945-1969 (Equiv.)	DESCRIPCIÓN
I	VI	Grafito esferoidal
II	VI	Grafito esferoidal imperfectamente formado
III	IV	Grafito Maleabilizado
IV	III	Grafito compacto
V	II	Grafito en forma de cangrejo
VI	V	Nódulos en forma de irregular abierta
VII	I	Grafito en forma de hojuela

b)

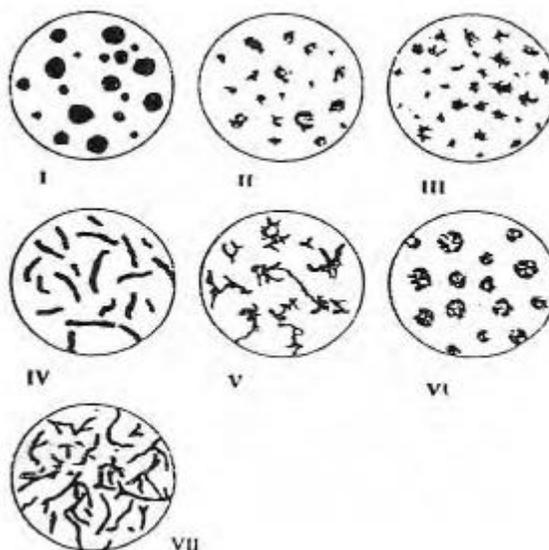


Figura 2.10 a) Descripción y nomenclatura para la caracterización del carbono grafito b) Formas de grafito para clasificar a los hierros colados vista a 100x [14].



2.8.2 Nodularidad

La nodularidad es una característica de suma importancia en las fundiciones de hierro dúctil, definida como la semejanza que muestran los precipitados de carbono grafito con la forma esférica, entre más cercana sea se considerará más cercana al 100%. En la Figura 2.11 se observa el patrón con el cual se puede evaluar el porcentaje de nodularidad presente en un hierro nodular.

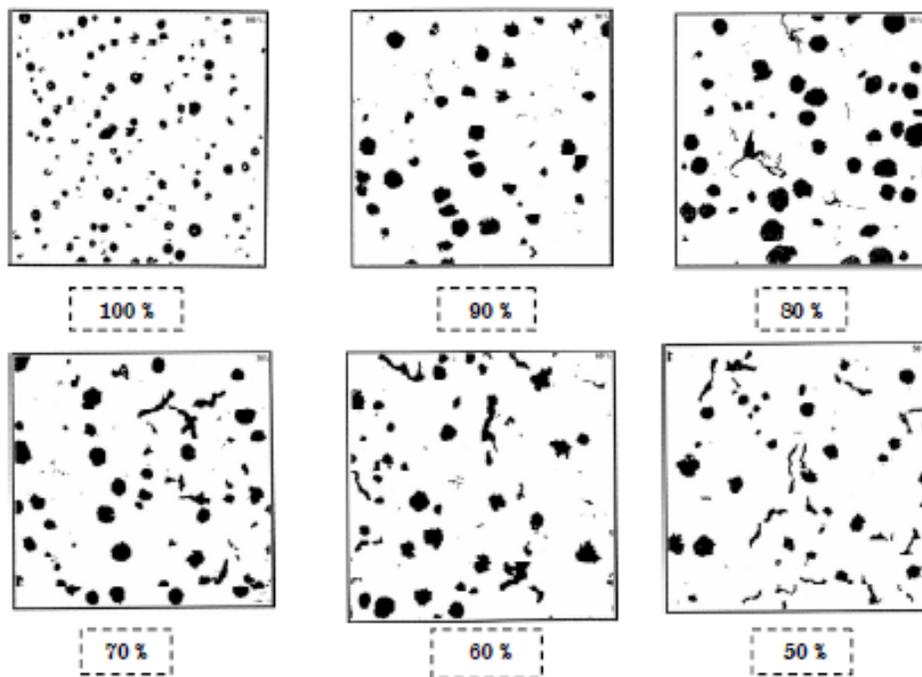


Figura 2.11 Porcentaje de nodularidad en hierros dúctiles.

2.8.3 Densidad de nódulos

Esta característica se basa en el número de esferoides encontrados, por unidad de área (1 mm^2) vistas a $100\times$, esta densidad se incrementa conforme el espesor de la pieza es más pequeño, consecuencia de una mayor velocidad de enfriamiento durante la solidificación. En la Figura 2.12 se muestra el patrón elaborado por la AFS.

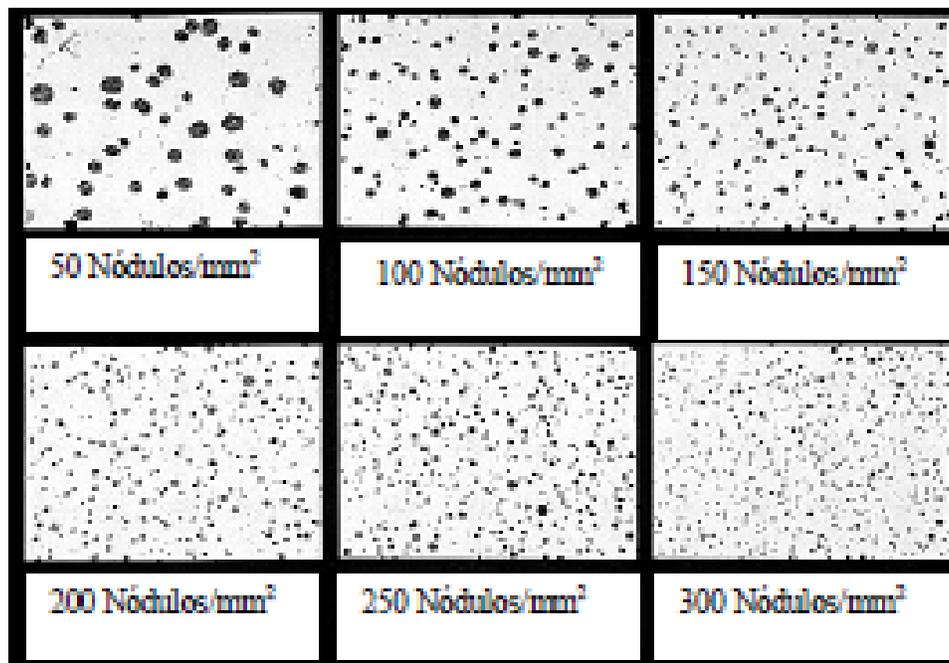
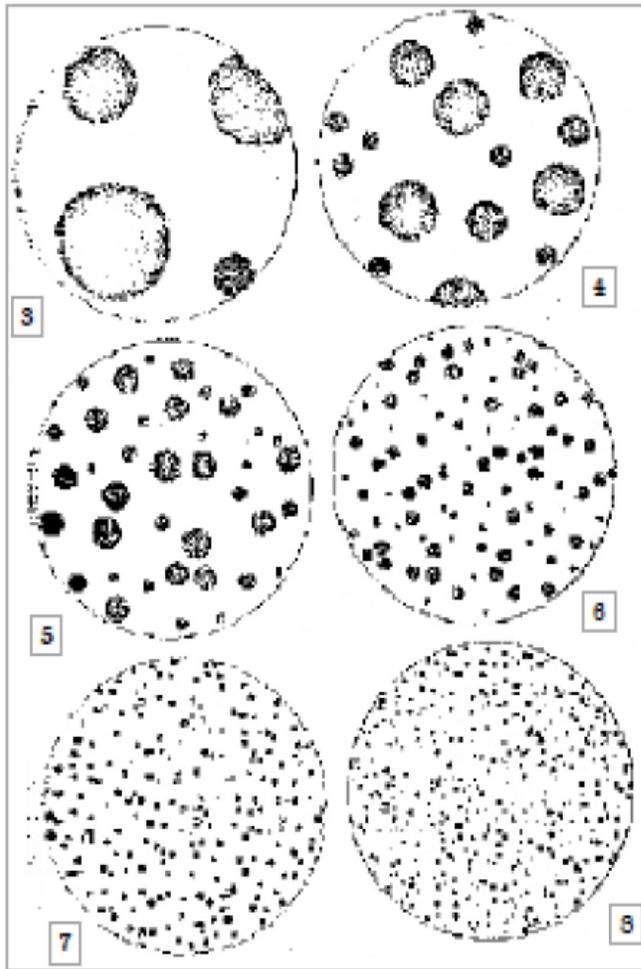


Figura 2.12 Patrones propuestos por la AFS para la evaluación de densidad de nódulos

2.8.4 Tamaño de esferoide

El tamaño de esferoide de grafito al igual que las características anteriores está clasificado por la AFS, la cual los identifica mediante una numeración que va del 1-8 siendo el 1 el de mayor tamaño y el 8 es aquel esferoide con el menor tamaño presentado como se muestra en la Figura 2.13.



Tamaño	Dimensión máxima (mm ²) 100x
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

Figura 2.13 Patrones propuestos por la AFS para la evaluación del tamaño de esferoide

2.8.5 Evaluación de matriz

También se proponen patrones para evaluar el porcentaje de las fases presentes (ferrita y perlita) que constituyen la matriz, como se muestra la Figura 2.14

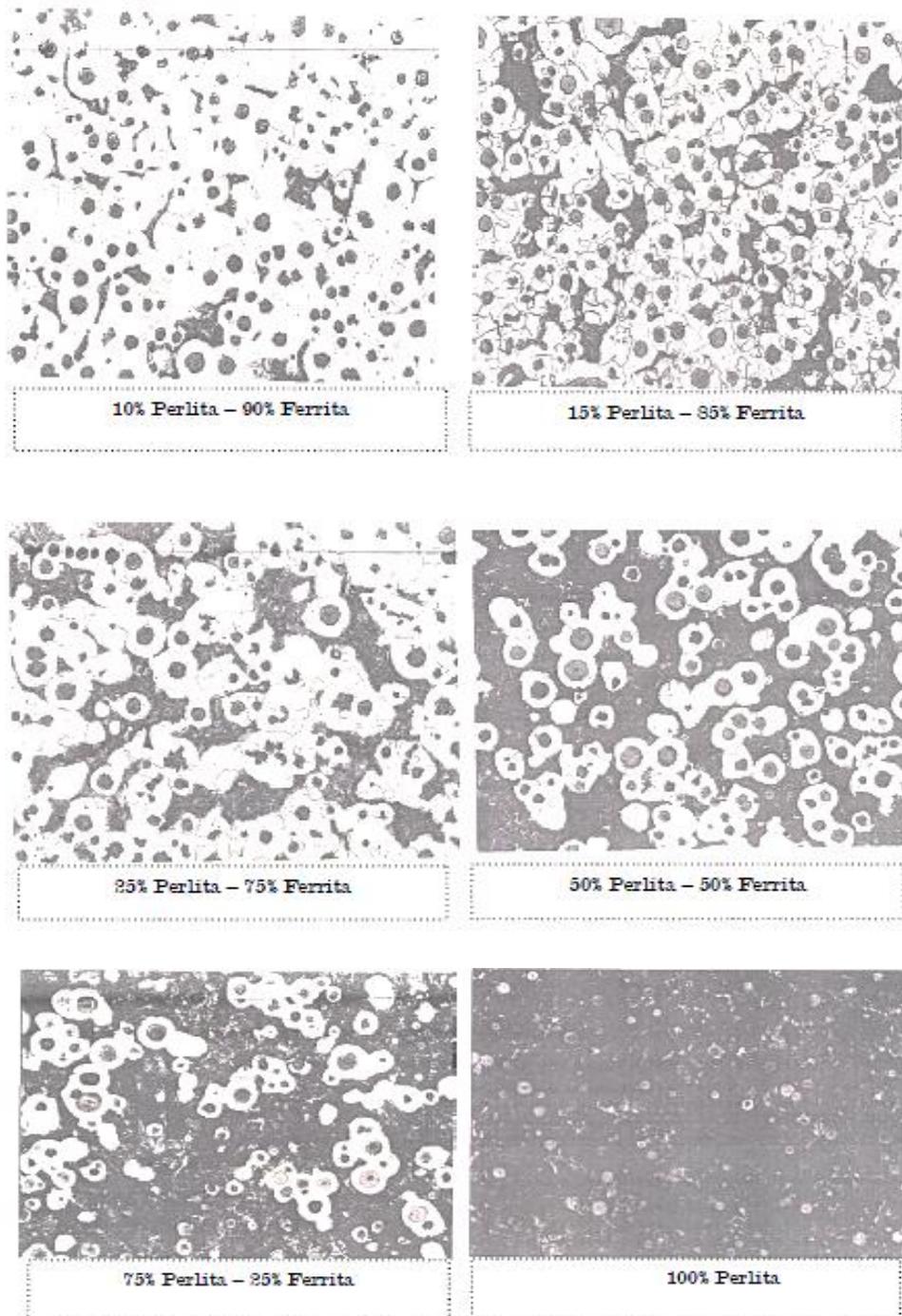


Figura 2.14 Patrones propuestos por la AFS para la evaluación de matriz.



2.9 Análisis térmico

Es una metodología que tiene como finalidad predecir el grado previsto de modificación que sufre una aleación de composición específica a partir de los cambios de temperatura que se presentan durante la solidificación.

Dicho análisis se realiza colocando un termopar en una posición precisa dentro de un molde que contiene una muestra de metal fundido, y se registra la temperatura en función del tiempo en el que solidifica la muestra, al gráfico representativo de dicho proceso se le conoce como curvas de enfriamiento.

Las curvas de enfriamiento al proporcionar el historial térmico de una aleación brindan información como el inicio de la solidificación, el cual viene dado por un cambio en la pendiente de dicha curva de enfriamiento así como también transformaciones de fase que estarán presentes en la aleación, dichas curvas están estrictamente relacionadas con los diagramas de fase, ya que con un análisis térmico es como estas herramientas tan útiles fueron obtenidas Figura 2.15

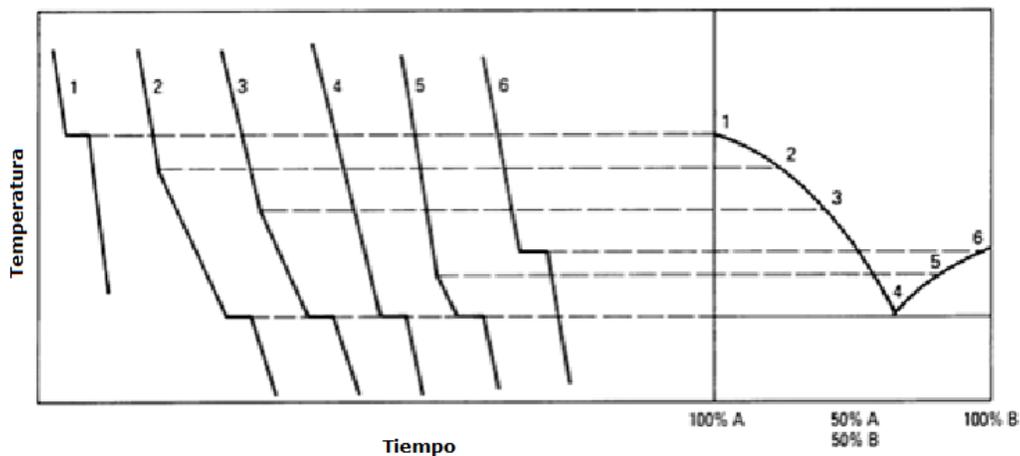


Figura 2.15 Relación entre las curvas de enfriamiento y el diagrama de fases. [4]



Al realizar un análisis térmico consta de dos elementos importantes la curvas de enfriamiento y el diagrama de fases con ellos podemos determinar si un hierro tendrá la presencia de carburos o no, sin la necesidad de observar la microestructura al microscopio, esto es posible ya que el primero nos refleja las condiciones de enfriamiento del hierro y al sobreponerlo con el segundo se puede conocer la ruta de solidificación que presente, de esta manera se determina si el hierro sigue el diagrama estable o el metaestable.

2.10 Velocidades de enfriamiento

La tendencia de solidificación de un hierro, se encontrara interrelacionada con la velocidad de enfriamiento que experimente la pieza obtenida por colada, esta velocidad a su vez presentara una relación directa con la geometría de la pieza, tipo de moldeo, y la composición química. La importancia de la velocidad de enfriamiento radica en su influencia sobre la microestructura de los hierros, ya que a una mayor velocidad de enfriamiento un hierro presentara una tendencia a formar carburos lo cual indica que el hierro se regirá por el diagrama metaestable, por el contrario si esta es muy baja se favorecerá la presencia de carbono grafito libre lo cual indica que el hierro se comportara según el diagrama estable.

Toda la información acerca de las velocidades de enfriamiento y sus consecuencias en un hierro se ve representado en las curvas de enfriamiento las cuales constan de 4 zonas de interés: Inicio de la solidificación, subenfriamiento, máxima recalcancia, fin de la solidificación Figura 2.16. En los hierros colados es de suma importancia mantener estas temperaturas bajo un control estricto ya que se ven



afectadas fácilmente por la composición y la velocidad de enfriamiento lo que se traduce en una microestructura diferente aun teniendo la misma composición.

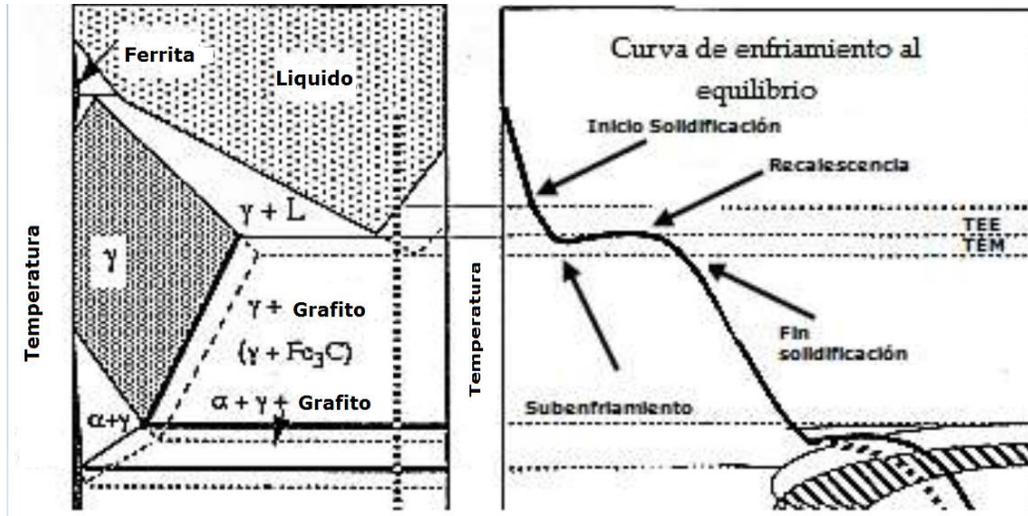


Figura 2.16 Ejemplo de una curva de enfriamiento para un hierro hipereutético. [13]

La presencia o ausencia de carburos en un hierro es fácilmente identificable sobre una curva de enfriamiento ya que para un hierro gris el sub enfriamiento, la máxima recalescencia y el final de la solidificación se encontrarán por debajo de la TEE (Temperatura eutéctica estable) pero al mismo tiempo los 3 puntos deben mantenerse por encima de TEM (Temperatura eutéctica metaestable), ya que con ello se garantizará la ausencia de carburos dentro de la microestructura. Si alguno de estos tres puntos se encuentra por debajo de la TEM arrojará como resultado un tipo de hierro diferente, por ejemplo si se quiere obtener un hierro moteado el sub enfriamiento y/o el fin de la solidificación se debe encontrar por debajo de TEM, en el caso de que los tres puntos se encuentren por debajo de la TEM se obtendrá como resultado un hierro blanco o en su defecto un hierro con una alta fracción de carburos esto se muestra en la Figura 2.17.

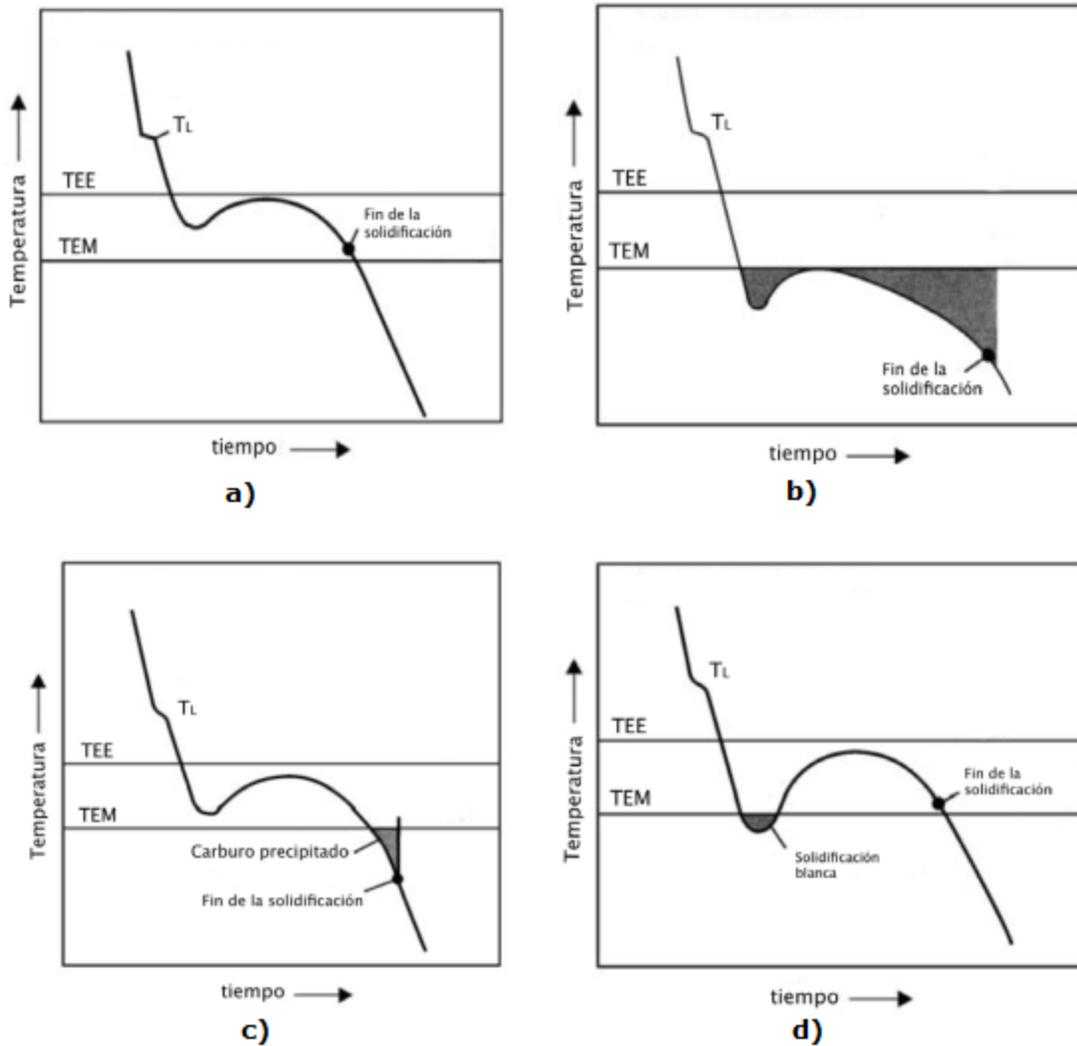


Figura 2.17 a) Curva típica de la solidificación de un hierro gris. b) Curva típica de la solidificación de un hierro blanco. c) Curva típica de la solidificación de un hierro moteado. d) Curva típica de la solidificación de un hierro gris

2.11 Influencia de un tercer elemento en la temperatura eutéctica de los hierros

Los diferentes elementos que pueden incluir los hierros como elementos de aleación o aleantes presentan un efecto sobre el intervalo que se tiene entre la TEE y TEM aumentándolo o disminuyéndolo dependiendo el elemento y el carácter de gamagenos o alfégenos que



cada uno presenta, lo cual a su vez impacta sobre la cantidad de microconstituyente eutéctico y eutécticoide que se obtendrá y la máxima solubilidad que presentara el C en la austenita la influencia que presenta cada elemento se relaciona en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Influencia de un tercer elemento en el cambio de temperaturas eutécticas en el diagrama de Fe-C , modificada. [5]

Elemento	Máxima solubilidad de C en austenita		Eutectoide °C/wt%X		Eutectico °C/wt%X	
	Metaestable (E)	Estables (E')	Metaestable (E)	Estables (E')	Metaestable (E)	Estables (E')
Silicio	-10 a 15	2.5	8	0-30	-10 a 20	4
Cobre	-2	5.2	---	-10	-2.3	5
Aluminio	-14	8	10	10	-15	8
Níquel	-4.8	+4	-20	-30	-6	4
Cromo	7.3	--	15	8	7	---
Magnesio	3.2	-2	-9.5	-3.5	3	-2
Vanadio	6.8	---	15	---	6-8	---
Fosforo	-180	-180	---	6	-37	-30

Es a partir de ello que estos elementos se clasifican de la siguiente manera Figura 2.18

- a) Fuertes grafitizadores: Incrementan TEE y abaten TEM en este grupo encontramos al Si, Al, Ni y Cu.
- b) Débiles grafitizadores: Abaten ambas temperaturas sin embargo aumentan el intervalo entre TEE-TEM efecto que provocan el P y As.
- c) Fuertes estabilizadores de carburos: decrecen la TEE pero aumentan TEM; Cr, V, y Mn.
- d) Débiles estabilizadores de carburos: disminuyen ambas temperaturas eutécticas Mo y W.

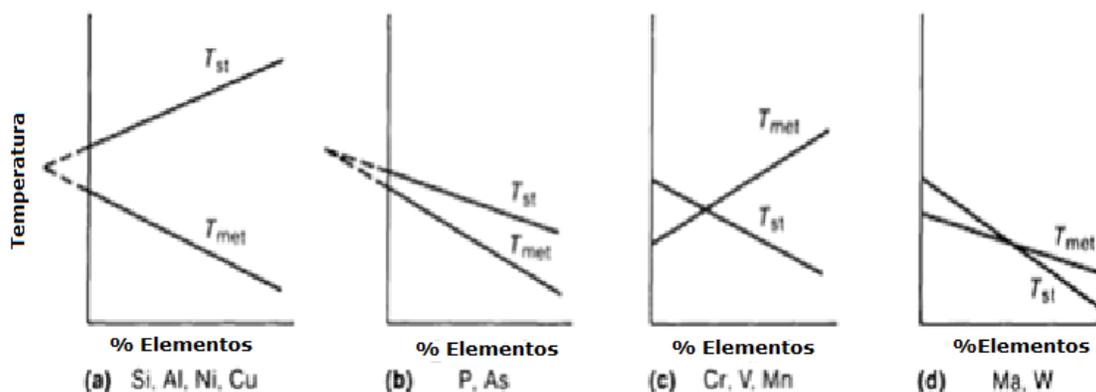


Figura 2.18 Clasificación de la influencia de un tercer elemento en el sistema Fe-C-X estable y meta estable (a) Grafitizadores fuertes. (b) Grafitizadores débiles. (c) Fuertes estabilizadores de carburos. (d) Estabilizadores de carburos débiles. [15]

Los tres elementos que se estudian en el presente trabajo son el Cr, V y Si el efecto que se ha obtenido de diversos estudios realizados previamente arrojan como resultados los siguientes efectos de estos elementos sobre la temperaturas eutécticas tanto estable como metaestable.

Los coeficientes de equilibrio de partición (f_X) que determinan la influencia de un tercer elemento sobre las temperaturas del sistema Fe-C estable y metaestable se presentan en la Tabla 2.2 [16]

Tabla 2.2 Coeficientes de equilibrio de partición de los elementos que influyen en las temperaturas TEE y TEM.

Elemento	Coeficientes de equilibrio de partición	
	Metaestable	Estable
Silicio (Si)	-10 a 20	4
Cobre (Cu)	-2.3	5
Aluminio (Al)	-1.5	8
Manganeso (Mn)	3	-2
Cromo (Cr)	7	--
Vanadio (V)	6.8	--



Las Temperatura Eutéctica Estable (TEE) y la Temperatura Eutéctica Metaestable (TEM) se calculara a partir de las siguientes ecuaciones.^[16]

$$TEE = 1154^{\circ} + \%Si * f_{Si} + \%Mn * f_{Mn} + \%Cr * f_{Cr} + \%Cu * f_{Cu} + \%Al * f_{Al} \quad \text{Ec. 2}$$

$$TEM = 1148^{\circ} + \%Si * f_{Si} + \%Mn * f_{Mn} + \%Cr * f_{Cr} + \%Cu * f_{Cu} + \%Al * f_{Al} \quad \text{Ec. 3}$$

%X = porcentaje de elemento en el hierro

%f X = Coeficiente de equilibrio de partición

CAPÍTULO III

DESARROLLO

EXPERIMENTAL



En este capítulo se describe de manera explícita la metodología experimental utilizada para el desarrollo del presente trabajo.

3. Descripción

Se fabricaron puntas para excavadora con una aleación de Hierro Nodular Grado 100-70-03 aleado con 0.5%V y 1.5 y 2.0 % Cr con diferentes niveles de inoculación 0.03, 0.12, 0.25 y 0.4 %Si el diseño experimental se ejemplifica en la Tabla 3.0 para ello se utilizó un horno de inducción sin núcleo, así como también chatarras de hierro y acero, para el ajuste de composición química en el horno, así como también para los tratamientos al metal líquido (inoculación temprana y tardía, Nodularización) se utilizaron diferentes ferro aleaciones (Fe-75%Si, Fe-60%Cr, Fe-80%V, Fe-64%Mn, Fe-45%Si-6%Mg), recarburante y Cu electrolítico. El proceso de moldeo en verde fue el establecido para la elaboración de los moldes, la mezcla de arena utilizada fue ajustada al 10% de bentonita Sódica y 2.5% de humedad, los corazones requeridos se elaboraron con arena Shell de los cuales se colocaron 2 por cada molde. Los moldes se instrumentaron mediante la instalación de 4 termopares tipo K por molde y mediante un adquisidor de datos y una PC, se obtuvieron los datos correspondientes a las curvas de enfriamiento a diferentes espesores de la punta para excavadora.

Tabla 3.0 Relación de composición de los elementos aleantes de Cr y V, niveles de inoculación y cortes realizados a las 8 piezas estudiadas.

Punta	Inoculación % base Si	%Cr	%V	Zonas			
1	0.03	1.5	0.5	1	2	3	4
2	0.12	1.5					
3	0.25	1.5					
4	0.4	1.5					
5	0.03	2					
6	0.12	2					
7	0.25	2					
8	0.4	2					



3.1 Fabricación de la placa modelo y prueba de moldeo

Como parte inicial del presente trabajo se realizó la elaboración de la placa modelo para la fabricación de las puntas para excavadora la cual fue vaciada en aluminio con una Aleación A-356 sin tratamiento, posterior al desmoldeo se realizó un desbaste con esmeril para eliminar desniveles y con la rectificadora neumática (Mototool) marca ADIR con 20.000 RPM Figura 3 Se eliminaron imperfecciones cercanas a la pieza que el esmeril no pudo eliminar, para ello se utilizaron 2 diferentes fresas de metal marca TENAZIT los cuales se muestran en la Figura 3.1.



Figura 3. Rectificadora Neumática (Mototool) Marca ADIR



Figura 3.1 Fresas de Carburo de Tungsteno Marca TENAZIT

Una vez terminada la placa modelo se realizaron las pruebas de moldeo pertinentes con arena de sílice AFS 40-45, con 10% de Bentonita



Sódica y 2.5% Humedad para corroborar que no se presentara ningún problema al realizar el molde, tanto en los ángulos de salida como en la forma final de la punta para excavadora como se observa en la Figura 3.2.

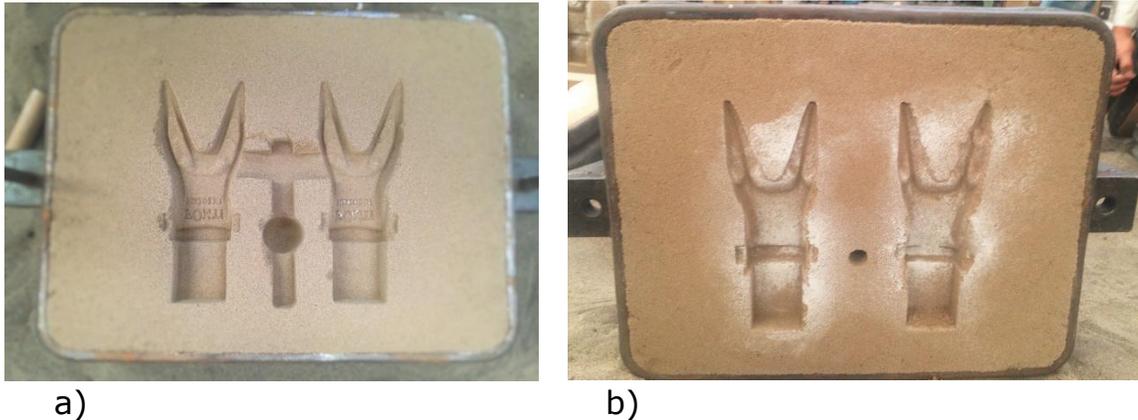


Figura 3.2 Se presenta los resultados de la prueba de moldeo: a) Parte moldeada en el drag, b) Parte moldeada en el Cope

3.2 Elaboración de termopares tipo K

Los termopares tipo K utilizados se armaron con alambres de chromel y alumel de calibre 20 recubiertos con bifilares cerámicos.

Una vez armados se soldaron en las puntas para realizar la unión requerida. En las puntas se aplicó pintura de zirconio para proteger el termopar de las altas temperaturas.

3.3 Corazones

Los corazones utilizados fueron elaborados a partir de arena Shell como se observa en la Figura 3.3., durante el proceso de elaboración de la placa modelo, también se realizó la elaboración de la caja para corazones, la cual contó con botadores; lo que permitió su fabricación con mayor rapidez.



Figura 3.3 Corazones de arena Shell para la punta para excavadora

3.4 Balance de carga

Se realizó el balance de carga para la elaboración del Hierro Nodular con carburos (CDI) como si fuera para un hierro grado 100-70-03 como se observa en la Tabla 3.2 La base de cálculo utilizada es de 100Kg para poder calcularlo en función de la capacidad de la olla. En el caso de la fabricación de la punta para excavadora se utilizaron 45 Kg ya que esta es la capacidad de la olla utilizada, el cálculo del tratamiento al metal líquido (Inoculación tardía) se realizó con una base de cálculo de 7Kg ya que este es el peso de las dos puntas para excavadora y el sistema de colada que se obtienen por molde.

Se realizaron 4 fusiones, con dos variaciones en el nivel de cromo y manteniendo el nivel de vanadio en 0.5% así como 4 variaciones en el nivel de inoculación dando como resultado, la relación presentada en la Tabla 3.1



Tabla 3.1 Relación de las variaciones realizadas en cada fusión.

	Fusión 1	Fusión 2	Fusión 3	Fusión 4
%Cr	1.5	2.0	2.0	1.5
% Inoculación	0.03	0.03	0.25	0.25
	0.12	0.12	0.40	0.40

Cada fusión contó con un nivel de inoculación temprana constante y 4 diferentes niveles de inoculación tardía

- Inoculación Temprana :0.05%
- Nivel 1, Inoculación Tardía de 0.03% base Si
- Nivel 2, Inoculación Tardía de 0.12% base Si
- Nivel 3, Inoculación Tardía de 0.25% base Si
- Nivel 4, Inoculación Tardía de 0.40% base Si

Tabla 3.2 Composición por norma ASTM para una Hierro Nodular Grado 100-70-03

%C	%Si	%Mn	%Cu	%Cr	%Mg	%P	%S
3.5-3.8	2.2-2.7	0.60 Max	0.20-0.50	0.10 Max	0.045	0.05 Max	0.015 Max

Tabla 3.3 Composición requerida para la Elaboración del Hierro (CDI)
** Dependerá del nivel de Cr con el que se desee trabajar 1.5, 2.0%Cr

%C	%Si	%Mn	%Cu	%Cr	%V	%Mg	%P	%S
3.84	2.45	0.60 Max	0.35	**	0.5	0.045	0.05 Max	0.015 Max

Para el tratamiento de nodularización se utilizó noduloy R-6 el cual contiene 45.43%Si y 6.42%Mg el método utilizado para este tratamiento al metal líquido es el de sandwich. En la Tabla 3.4 se presentan las composiciones de las chatarras utilizadas.

Tabla 3.4 Composición química de cada una de las chatarras utilizadas durante las 4 fusiones.

Material	%C	%Si	%P	%S	%Mn	%Cu	%Cr	%Mg



Chatarra 1 Hierro	3.601	2.329	0.018	0.0095	0.60	0.179	0.048	0.0492
Chatarra2 Acero (Tubo)	0.06	0.03	0.012	0.010	0.53	0.06	0.057	0.0
Chatarra 3 Acero (Troquel)	0.056	0.03	0.018	0.013	0.162	0.16	---	---

Cálculos para la Adición de Fe-Si-Mg

$$\%Mg = \frac{\%Mg\ deseado}{\%Mg\ Recuperado \times 0.01} + \%S = \frac{0.045}{45 \times 0.01} + 0.010 = 0.11\% Mg$$

$$Kg\ Fe - Si - Mg = \frac{100 * 0.11\%}{6.42\%} = 1.71Kg\ Fe - Si - Mg$$

Cantidad de Silicio aportada por el Nodulizante

$$KgSi = \frac{45.43\% * 1.7Kg\ Fe - Si - Mg}{100\%} = 0.77KgSi$$

Cantidad de Silicio que se debe tener en el Horno de inducción

$$\%Si_{en\ el\ Horno} = Q_{requerida} - Q_{Nodulizante} - Q_{inoculación}$$

$$\%Si_{en\ el\ Horno} = 2.45 - 0.77 - 0.05 - 0.05 = 1.58\%Si$$

El Silicio se tomó como elemento crítico dentro del balance de carga, esto con la finalidad de mantenerlo controlado durante todo el proceso de fusión.

Elemento crítico Si

$$CH1 + CH2 = 100\ Kg$$

$$CH1 = 100 - CH2$$

$$1.58\%Si = CH1 \left(\frac{2.329}{100} \right) + CH2 \left(\frac{0.03}{100} \right)$$

$$1.58\%Si = (100 - CH2) * \left(\frac{2.329}{100} \right) + CH2 \left(\frac{0.03}{100} \right)$$

$$1.58\%Si = 2.329 - 0.02329CH2 + 0.0003CH2$$



$$CH2 = \frac{1.58 - 2.329}{0.02299} = 32.57$$

$$CH1 = 100 - CH2 = 100 - 32.57 = 67.43$$

Los elementos aportados por cada una de las chatarras se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Elemento} = \text{Kg de Chatarra} * \left(\frac{\text{elemento en la chatarra}}{100} \right) = \text{Kg del Elemento}$$

Mediante el balance se determinó los porcentajes de cada chatarra, en la Tabla 3.5, se presenta los kilogramos aportados por cada chatarra para cada elemento, la chatarra 3 fue empleada únicamente como cubierta del Noduloy en el método sandwich.

Tabla 3.5 Se presentan los Kg por elemento que aporta cada una de las chatarras utilizadas

Elemento	Chatarra 1 (Hierro)	Chatarra 2 Acero Tubo	Chatarra 3 Acero Troquel
C	1.092	0.00699	0.00084
Si	0.7067	0.00349	0.00045
P	0.005461	0.00139	0.00027
S	0.002882	0.00116	0.00019
Mn	0.18204	0.06174	0.00243
Cu	0.054308	0.00699	0.00240
Cr	0.014563	0.00664	---
Mg	0.014927	---	---

Las ferroaleaciones utilizadas para el ajuste de composición en el horno se presentan en la Tabla 3.6 el inoculante es el mismo que se utilizó tanto para el ajuste de silicio en el horno como para la inoculación temprana y tardía:

Tabla 3.6 Composición química de las ferroaleaciones y sus eficiencias

	%C	%Si	%Mn	%Cu	%Cr	%Mg	%V	Eficiencia
Fe-75%Si	--	75	---	---	---	---	---	98



Fe-64%Mn	--	---	64	---	---	---	---	99
R-6 Noduloy	---	45.43	---	---	--	6.42	---	45
Recarburante	99.8	---	---	---	---	---	---	99.8
Cu	---	---	---	99.8	---	---	---	99
Fe-80%V	---	---	---	---	---	---	80	100
Fe-60%Cr	---	---	---	---	60	---	---	100

Cálculo para el Ajuste de Carbono

$$\text{Recarburante} = (C_{\text{requeridos}} - C_{\text{aportado}}) * \text{Eficiencia}$$

$$\text{Recarburante} = 3.84 - 1.100 = 2.739$$

$$\frac{2.739 * 45}{100} = 1.2325 * \frac{100}{99.8} = 1.2350 \text{ Kg de Recarburante}$$

Calculo para el ajuste de Mn

$$\text{Fe} - 64\% \text{Mn} = (Mn_{\text{requeridos}} - Mn_{\text{aportado}})$$

$$\text{Fe} - 64\% \text{Mn} = 0.60 - 0.24906 = 0.3509$$

$$\frac{0.3509 * 45}{100} = 0.1579 * \frac{100}{64} = 246.75 \text{ gr de Fe-64\%Mn}$$

Calculo para Inoculación Temprana (0.05%Si)

$$Si_{\text{requerido}} = \text{Capacidad olla} * \%Si$$

$$Si_{\text{requerido}} = 45 \text{kg} * \frac{0.05}{100} = 0.0225 \text{KgSi}$$

$$\text{Fe} - 75\% Si_{\text{requerido}} = \text{Kg } Si_{\text{requeridos}} * \text{Contenido de Si} * \text{Eficiencia}$$

$$\text{Fe} - 75\% Si_{\text{requerido}} = 0.0225 \text{ KgSi} * \frac{100}{75} * \frac{100}{98} = 30.61 \text{g Fe} - 75\% Si$$

Calculo para Inoculación tardía de 0.03, 0.12, 0.25 y 0.4 %Si

$$Si_{\text{requerido}} = \text{Capacidad del molde} * \%Si$$

$$Si_{\text{requerido}} = 7 \text{kg} * \frac{0.03}{100} = 0.0021 \text{KgSi}$$

$$\text{Fe} - 75\% Si_{\text{requerido}} = \text{Kg } Si_{\text{requeridos}} * \text{Contenido de Si} * \text{Eficiencia}$$



$$Fe - 75\%Si_{requerido} = 0.0021 KgSi * \frac{100}{75} * \frac{100}{98} = 2.857 gr Fe - 75\%Si$$

- Inoculación tardía 0.03%Si = 2.857 gr Fe-75%Si
- Inoculación tardía 0.12%Si = 11.428 gr Fe-75%Si
- Inoculación tardía 0.25%Si = 23.80 gr Fe-75%Si
- Inoculación tardía 0.4%Si = 38.09 gr Fe-75%Si

Cálculo para el ajuste de Vanadio

$$\frac{45 Kg - 100\%}{X - 0.5\%} = 0.225Kg$$
$$0.225Kg V * \frac{100}{80} = 0.281Kg Fe - 80\%V$$

Cálculo para el ajuste de Cromo

$$\frac{45 Kg - 100\%}{X - 1.5\% **} = 0.675Kg$$
$$0.225Kg Cr * \frac{100}{60} = 1.125Kg Fe - 60\%Cr$$

**Este cálculo dependerá del nivel de cromo que se trabajó 1.5 ó 2.0%Cr

3.5. Moldeo

Los moldes utilizados fueron fabricados por el proceso de moldeo en verde cada uno presentó una demanda aproximada de arena de 80Kg por molde. En las fusiones uno y dos se manejaron los niveles de inoculación de 0.03 y 0.12 %Si por lo tanto en las fusiones tres y cuatro se utilizaron los niveles de 0.25 y 0.4%Si por lo que se obtuvieron 3 moldes de cada nivel, cada molde demandó 2 corazones de arena shell, esto se puede apreciar en la Figura 3.4



Figura 3.4 Molde de arena de punta para excavadora con corazones de arena Shell.

3.6. Técnica de fusión

La técnica de fusión empleada para el desarrollo del presente trabajo fue la siguiente, tomando en cuenta que todos los moldes termopares y adquisidores estaban previamente listos:

1. *Balance de Carga (presentado en el apartado 3.4.)*
2. *Acondicionamiento y limpieza de la chatarra a utilizar*
3. *Acondicionamiento y limpieza del Horno de Inducción*
4. *Secuencia de carga (chatarra de hierro, chatarra de acero)*
5. *Escorificar y toma de temperatura en el horno*
6. *Composición química preliminar*
7. *Ajuste de carga con las ferroaleaciones necesarias*
8. *Alcanzar la temperatura de trabajo requerida 1510°C*
9. *Composición química*
10. *Lectura de la temperatura de colada y proceder a realizar el vaciado a la olla*



11. *Escorificar y realizar tratamiento al metal líquido (nodularización e inoculación temprana)*
12. *Checar la temperatura de vaciado*
13. *Vaciado a moldes y realizar post inoculación (punta 1 y 2 en molde, 3, 4, 7, 8 a mano, 5 y 6 dispositivo de inoculación)*
14. *Obtención de las curvas de enfriamiento*
15. *Enfriamiento de las piezas*
16. *Desmolde, cepillado y limpieza de las piezas*

3.7 Adquisición de datos para Curvas de enfriamiento

La adquisición de datos se realizó con dos adquisidores y su respectivo software, instalado en dos computadoras diferentes para la adquisición simultanea de dos niveles inoculación: 0.03 - 0.12 % Si y 0.25 - 0.4 % Si. Se obtuvieron 23 curvas de enfriamiento totales, dándonos como resultado la siguiente relación:

- 1.5%Cr, 0.5%V Inoculación 0.03% Si: 4 Curvas de Enfriamiento
- 1.5%Cr, 0.5%V Inoculación 0.12% Si: 4 Curvas de Enfriamiento
- 1.5%Cr, 0.5%V Inoculación 0.25% Si: 4 Curvas de Enfriamiento
- 1.5%Cr, 0.5%V Inoculación 0.40% Si: 4 Curvas de Enfriamiento
- 2.0%Cr, 0.5%V Inoculación 0.03% Si: 3 Curvas de Enfriamiento
- 2.0%Cr, 0.5%V Inoculación 0.12% Si: 4 Curvas de Enfriamiento
- 2.0%Cr, 0.5%V Inoculación 0.25% Si: 0 Curvas de Enfriamiento
- 2.0%Cr, 0.5%V Inoculación 0.40% Si: 0 Curvas de Enfriamiento

Se colocaron cuatro termopares tipo K en el molde de arena, en diferentes zonas de la punta para excavadora, con la finalidad de tener diferentes velocidades de solidificación, en la Figura 3.5 Se observa la posición de cada uno de los termopares.

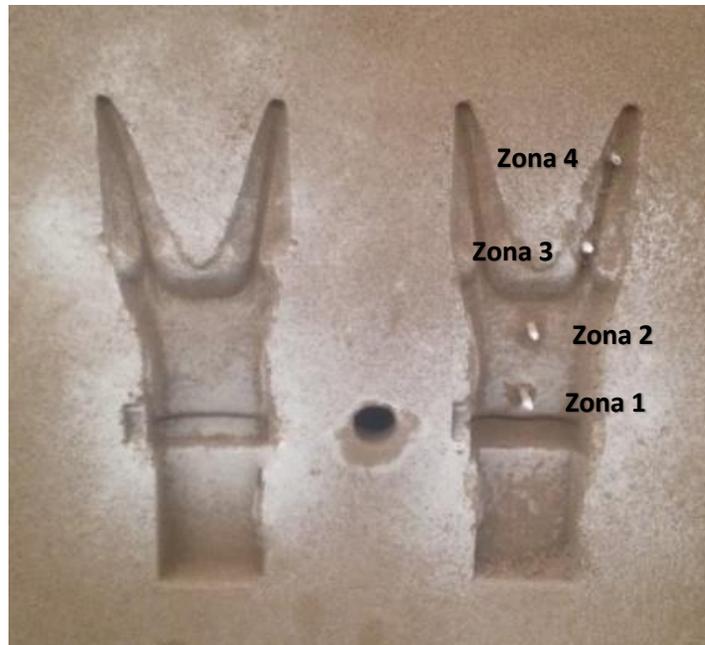


Figura 3.5 Se muestra la posición que tuvieron los termopares para la obtención de las curvas de enfriamiento, los termopares se numeran de abajo hacia arriba siendo el 1 el más cercano al corazón y el 4 el de la punta.

3.8 Preparación metalográfica y microscopía óptica

Se obtuvieron 8 puntas para excavadora por fundición Figura 3.6 con diferentes porcentajes de Cr (1.5% y 2.0%) y distintos niveles de inoculación (0.03, 0.12, 0.25 y 0.4%Si), para su fácil análisis cada punta de excavadora fue seccionada en las zonas donde se colocaron los termopares para el análisis térmico se obtuvieron 4 zonas (1, 2, 3 y 4) de estudio por cada punta obtenida, la muestra de cortes se presenta en la Figura 3.7



Figura 3.6 Muestra un ejemplo de las puntas para excavadora obtenidas por fundición de hierro nodular con carburos aleados de Cr y V.

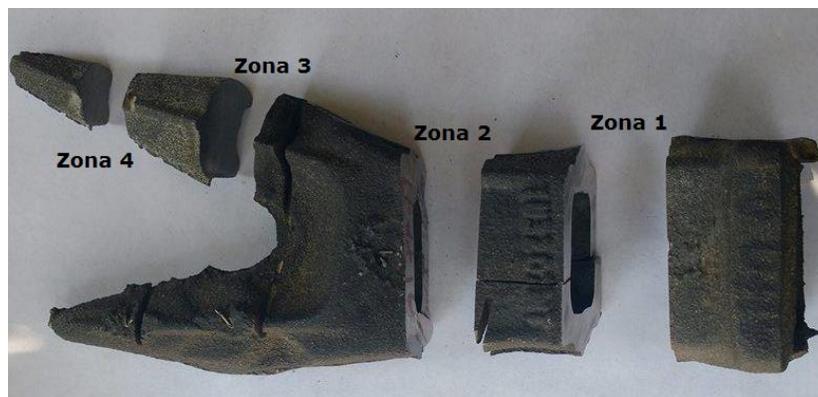
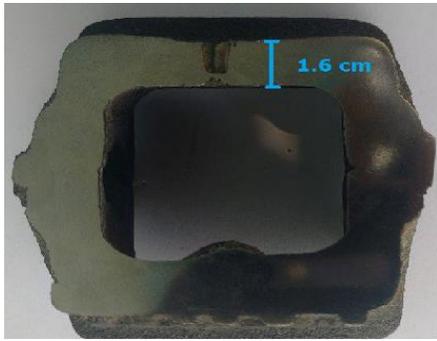


Figura 3.7 Muestra los cortes realizados y las zonas de cada una de las 8 puntas para excavadora

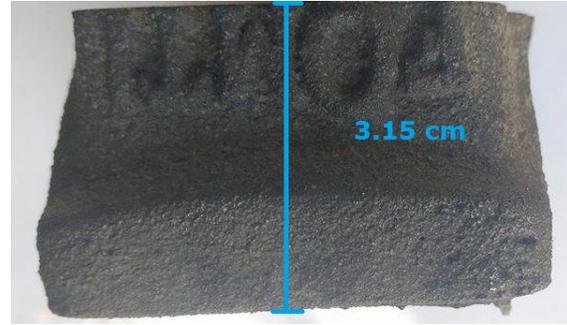
Una vez realizados los cortes se tomaron las medidas a las 32 piezas resultantes y calculando el promedio de dichas medidas se obtiene la relación ejemplificada en la Figura 3.8

Vista frontal

Vista lateral



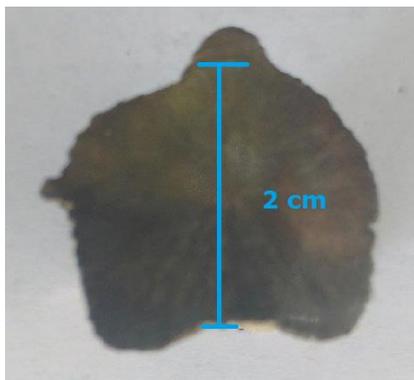
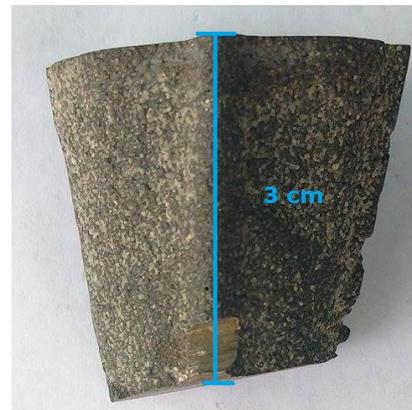
Zona 1



Zona 2



Zona 3



Zona 4



Figura 3.8 Se muestran las medidas del espesor de cada zona de estudio donde se colocaron los termopares que conforman a la punta de excavadora



Al finalizar las mediciones de cada zona, se procedió a la preparación metalográfica iniciando por el desbaste con lijas (80, 100, 120, 240, 320, 400 y 600) posterior a esto se realizó el pulido de las piezas con un paño fino y utilizando alúmina de 1 micra como agente abrasivo, una vez obtenido el acabado a espejo en cada una de las piezas se procedió a la captura de imágenes para su caracterización y evaluación.

En primera instancia se asignaron 3 puntos con las letras A, B y C, en los cuales se realizaron las tomas de imágenes esto con la finalidad de hacer un barrido en cada una de las piezas, dicho proceso se efectuó por duplicado para así tener un análisis homogéneo, la asignación de dichos puntos se encuentra representada en la Figura 3.9 y fue utilizada para el análisis de carbono grafito (esferoide de grafito), clasificación de matriz y cuantificación de carburos.

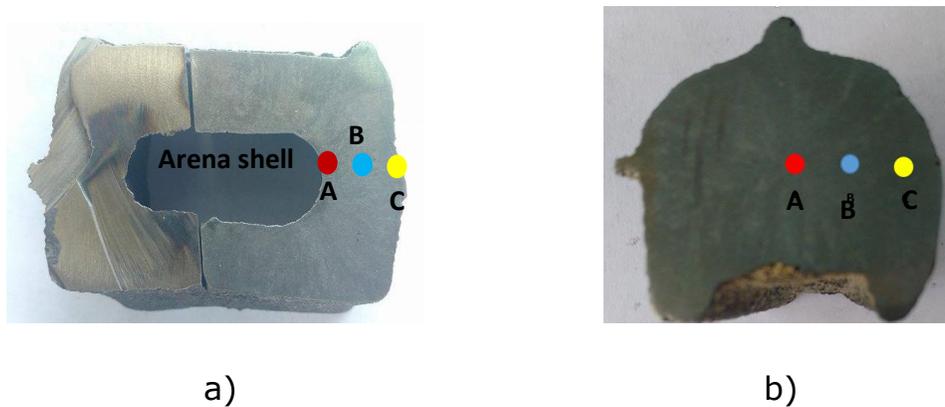


Figura 3.9 Puntos a analizar mediante microscopía óptica a) Representación del barrido en la zona 1 y 2 de la punta para excavadora b) representación del barrido en la zona 3 y 4 de la punta para excavadora.

Las piezas fueron primeramente observadas al microscopio sin ataque y con aumentos de 100X para realizar la caracterización de



carbón grafito de acuerdo a los patrones AFS de lo cual se evaluó densidad y tamaño de nódulos así como nodularidad.

Posteriormente se realizó un ataque con nital 3 por un periodo de 6 segundos y se evaluó el tipo de matriz que presentó el hierro nodular con carburos aleados con Cr y V, por último se preparó una solución de 4%HF 10%HNO₃ y el resto agua destilada en relación volumen/volumen, con dicho reactivo se efectuó el revelado de carburos esto se logró con un ataque de 5 segundos.

Las imágenes se obtuvieron mediante el microscopio óptico de marca Olympus, este a su vez estuvo complementado con el software y cámara de marca Infinity, la cuantificación del porcentaje de carburos y carbón grafito a analizar se realizó con el software Image Pro Plus.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la elaboración del presente proyecto dividiéndose en resultados y análisis metalográficos, térmicos y químicos.

Del desarrollo experimental realizado se fabricaron 8 puntas de excavadora por fundición con diferentes porcentajes de Cr (1.5% y 2.0%), V (0.5%) y distintos niveles de inoculación (0.03, 0.12, 0.25 y 0.4%Si), en la Tabla 4.0 se presenta la relación de cada punta que fue seccionada en 4 zonas.

Tabla 4.0 Relación de composición de los elementos aleantes de Cr y V, niveles de inoculación y cortes realizados a las 8 piezas estudiadas.

Punta	Inoculación % base Si	%Cr	%V	Zonas			
1	0.03	1.5	0.5	1	2	3	4
2	0.12	1.5					
3	0.25	1.5					
4	0.4	1.5					
5	0.03	2					
6	0.12	2					
7	0.25	2					
8	0.4	2					

4.1 Composición química

La composición química mostrada en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 en comparación con lo establecido por la ASTM Tabla 3.2, indican que las composiciones obtenidas se encuentran dentro del rango señalado para la fabricación de un hierro nodular 100-70-03, asegurando que el hierro obtenido por fundición se encuentra dentro de la clasificación de los hierros nodulares, lo cual es de suma importancia como primer etapa en la fabricación de un hierro CADI.



Tabla 4.1 Composición química del hierro nodular en punta 1 y 2 aleado con 1.5%Cr y 0.5%V.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%V	%Mg	%Al
3.768	2.231	0.575	0.0186	0.013	1.501	0.36	0.4462	0.0512	0.0203

Tabla 4.2 Composición química del hierro nodular en punta 3 y 4 aleado con 1.5%Cr y 0.5%V

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%V	%Mg	%Al
3.681	2.332	0.573	0.02	0.0168	1.549	0.3387	~0.493	0.0541	0.0191

Tabla 4.3 Composición química del hierro nodular en punta 5 y 6 aleado con 2.0%Cr y 0.5%V

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%V	%Mg	%Al
3.909	2.453	0.553	0.025	0.0263	1.881	0.322	0.4087	0.0647	0.0186

Tabla 4.4 Composición química del hierro nodular en punta 7 y 8 aleado con 2.0%Cr y 0.5%V

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%V	%Mg	%Al
3.558	2.353	0.567	0.018	0.0140	1.897	0.3139	~0.46	0.0393	0.0181

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados de carbono equivalente, que fueron obtenidos mediante la Ec. 1

Tabla 4.5 Porcentaje de carbono equivalente experimental (% CE) en cada punta en relación con el % Cr, % V y %Si en post-inoculación.

No. de punta	% Cr - %V	Inoculación % base Si	% CE
1	1.5-0.5	0.03	4.44
2		0.12	4.46
3		0.25	4.45
4		0.4	4.49
5	2.0-0.5	0.03	4.65
6		0.12	4.68
7		0.25	4.33
8		0.4	4.38



4.2.1 Caracterización de carbono grafito

Como punto de partida se observa el efecto que se tiene sobre el carbono grafito por las diferentes variables y la interrelación que existe entre ellas, ya que juegan un papel importante en las características que presenta el carbono en forma de esferoide como: % carbono grafito, nodularidad, densidad de esferoides y tamaño de esferoide.

En la Tabla 4.7 se presentan los promedios obtenidos para la caracterización de carbono grafito, mediante patrones visuales se realiza la caracterización correspondiente, en la cual se obtiene su densidad de nódulos, nodularidad y tamaño de nódulos esto a partir de las imágenes metalográficas a 100X adquiridas de la observación en el microscopio óptico de las 32 zonas de estudio, estos resultados son el promedio resultante a partir del barridos realizado en cada una de las zonas de estudio, los datos numéricos del barrido así como las metalografías correspondientes se presentan en el Anexo A.

Se observa que los valores de nodularidad se encuentran dentro del rango establecido, entre el 80%-100% para ser considerado un hierro nodular. Las puntas 1, 2, 7 y 8 caen dentro del rango determinado de Mg residual, es importante mantenernos dentro de este ya que podemos observar en la Tabla 4.6, las puntas 7 y 8 poseen una mayor nodularidad teniendo un valor 0.0393 % Mg residual y un porcentaje de nodularidad de 90%-100%, en comparación con el resto, ya que un valor superior al rango de Mg invierte el efecto del mismo, favoreciendo la formación de carburos y deformando los esferoides ya existentes, lo cual se traduce en una disminución de 80%-100% en la nodularidad en el resto de las puntas.



Tabla 4.6 Temperatura de colada y % de Mg residual en puntas para excavadora relacionando niveles de inoculación

% Cr - % V	No. De punta	% de inoculación	% Mg residual	Temperatura de colada (°C)
1.5 - 0.5	1	0.03	0.0512	1391
	2	0.12		
	3	0.25	0.0541	1375
	4	0.4		
2.0 - 0.5	5	0.03	0.0647	1403
	6	0.12		
	7	0.25	0.0393	1360
	8	0.4		

La densidad y tamaño de nódulos son dos características que presentan una interrelación con la temperatura de colada del metal líquido, ya que si esta se encuentra aproximada a 1482°C la densidad de nódulos presentara un incremento, mientras que el tamaño sufrirá una disminución considerable, caso contrario si la temperatura de colada se encuentra aproximada a 1316°C la densidad de nódulos aumenta.^[17]

El efecto del magnesio residual sobre la densidad se puede apreciar claramente realizando la comparación entre las puntas 5-8 de la Tabla 4.7. de igual forma se muestra un incremento de densidad aproximado de 50 nod/mm², ya que el %Mg_r tiene un valor de 0.0647% en las puntas 5-6, con base en los fundamentos teóricos este comportamiento es correcto ya que al salir del rango establecido de %Mg_r (0.04%-0.06%) favorece la formación de carburos primarios. En las puntas 1-4 no se aprecia una variación considerable ya que ambos valores están cercanos al 0.05%Mg_r y a su vez entre ellos.



En cuanto al tamaño de nódulos, se ve afectado directamente por la temperatura de colada (T_c), donde al comparar las puntas 3-4 ($T_c=1403^\circ\text{C}$) con las puntas 7-8 ($T_c=1360^\circ\text{C}$) las cuales presentan la diferencia más notoria en cuanto a temperaturas, se observó que a una menor T_c el tamaño del nódulo es más pequeño con un valor entre 6-7, este efecto es a consecuencia de una velocidad de enfriamiento mayor en el metal líquido, caso contrario a una T_c de 1403°C el tamaño de nódulo presente es mayor teniendo un valor entre 5-6 según los patrones AFS.



Nodularidad					
Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
<u>1</u>	0.03 %Si	80	80	100	100
<u>2</u>	0.12 %Si	80	90	90	100
<u>3</u>	0.25 %Si	90	90	80	90
<u>4</u>	0.4 %Si	90	80	90	100
Densidad de nódulos (Nod/mm²)					
Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
<u>1</u>	0.03 %Si	50	100	150	150
<u>2</u>	0.12 %Si	200	50	100	150
<u>3</u>	0.25 %Si	150	150	100	250
<u>4</u>	0.4 %Si	150	100	150	150
Tamaño de nódulos ()					
Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
<u>1</u>	0.03 %Si	5	5	6	7
<u>2</u>	0.12 %Si	6	5	6	6
<u>3</u>	0.25 %Si	6	6	6	6
<u>4</u>	0.4 %Si	7	6	6	6

a) Resultados de puntas con 1.5% y 0.5%V con diferentes niveles de inoculación

Nodularidad					
Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
<u>5</u>	0.03 %Si	80	80	90	100
<u>6</u>	0.12 %Si	90	100	90	100
<u>7</u>	0.25 %Si	100	90	90	100
<u>8</u>	0.4 %Si	100	100	90	100
Densidad de nódulos (Nod/mm²)					
Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
<u>5</u>	0.03 %Si	50	100	100	100
<u>6</u>	0.12 %Si	100	100	150	200
<u>7</u>	0.25 %Si	200	100	200	250
<u>8</u>	0.4 %Si	150	150	150	150
Tamaño de nódulos ()					
Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
<u>5</u>	0.03 %Si	6	5	5	5
<u>6</u>	0.12 %Si	6	5	5	6
<u>7</u>	0.25 %Si	7	6	6	7
<u>8</u>	0.4 %Si	6	6	6	7

b) Resultados de puntas con 2.0% y 0.5%V con diferentes niveles de inoculación

Tabla 4.7 Evaluación de carbono grafito en un hierro nodular con carburos en puntas para excavadora comparando con diferentes niveles de inoculación, elementos aleantes de cromo y vanadio



Los resultados presentados a continuación exponen la relación de composición química de la variación de 1.5 – 2.0 % Cr, 0.5 % V y los cuatro niveles de inoculación (0.03, 0.12, 0.25 y 0.4%Si), utilizados así como los promedios generales de porcentajes de carbono grafito derivados de la Tabla 4.9 y carbono equivalente por punta, se presentan en la Tabla 4.8 con ello se definen las variables que afectan la calidad metalúrgica de las puntas de excavadora fabricadas, ya que solo se tenían en consideración aquellas planteadas en el diseño experimental (niveles de inoculación, % Cr y % V) sin embargo se ven implicadas en los resultados otras como: temperatura de colada, carbono equivalente, geometría de la pieza, % Mg residual y temperaturas eutécticas las cuales modifican el porcentaje de carburos y carbono grafito.

Tabla 4.8 Promedio general de carbono grafito y % carbono equivalente en relación con % Cr, %V y niveles de inoculación.

% Cr - % V	% inoculación	% CE	Promedio % Carbono grafito
1.5 – 0.5	0.03	4.44	4.12
	0.12	4.46	4.93
	0.25	4.45	7.10
	0.4	4.49	5.80
2.0 – 0.5	0.03	4.65	4.64
	0.12	4.68	6.05
	0.25	4.33	6.00
	0.4	4.38	5.00

En las piezas con 1.5%Cr y 0.5%V, presenta un incremento en el promedio de carbono grafito al aumentar los niveles de inoculación, ya que el efecto del ferro-silicio genera una mayor cantidad de centros de nucleación en el baño metálico durante la solidificación. Sin embargo en la punta con un nivel de inoculación de 0.4 % Si, el efecto de este no es eficiente pues el método de inoculación utilizado (manual) provoca variaciones durante la experimentación debido al grado de error asociado (error humano y distinto tiempo de incorporación). La variación del CE es



despreciable sobre el efecto de la precipitación de carbono grafito, ya que prácticamente se mantiene constante (4.44 y 4.49 de CE).

Caso contrario en las puntas fabricadas con 2% Cr y 0.5%V donde el valor de CE tiene una variación 0.3% teniendo valores de 4.6 y 4.3%, dicho efecto es a consecuencia de la diferencia en los porcentajes de carbono total derivados de los análisis químicos realizados, ya que las puntas fueron fabricadas en diferentes fusiones, por lo cual el valor de porcentaje de carbono total en cada una de ellas no es el mismo, aun cuando se encuentra en los límites del rango marcado por las ASTM para un hierro nodular 100-70-03, esto afecta directamente al CE ya que su valor está cercano a la composición eutéctica teniendo como consecuencia una disminución en la precipitación de carbono grafito, aunado a que se presentaron problemas en las puntas con el mayor porcentaje en los niveles de inoculación el cual no se incorporó totalmente durante la post-inoculación, al realizar el desmoldeo se apreció el brillo y desprendimiento del inoculante localizado a la superficie de las puntas.

La relación obtenida para el porcentaje de carbono grafito por zona se presenta en la Tabla 4.9 dichos resultados fueron obtenidos a partir del análisis de las metalografías en el software "Image Pro Plus", las imágenes correspondientes a esta figura así como los valores de cada punto analizado se presentan en el Anexo A.

Tabla 4.9 Porcentajes de carbono grafito a diferentes niveles de inoculación en las 4 zonas analizadas.

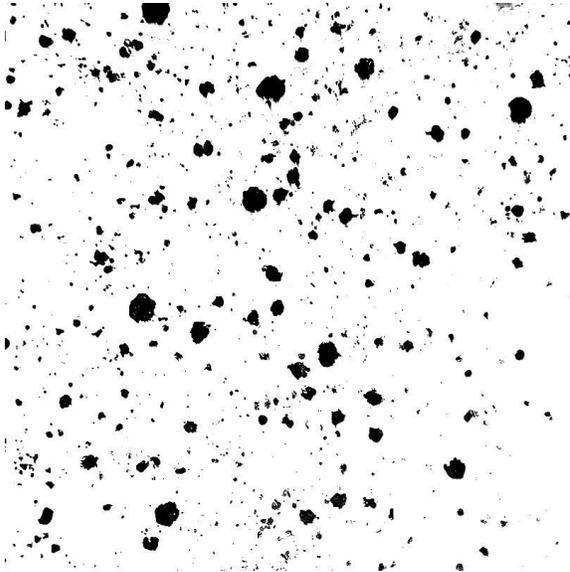
a) Niveles de 1.5%Cr 0.5%V

Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
1	0.03 %Si	5.70	4.89	2.87	3.03
2	0.12 %Si	6.04	5.90	4.26	3.50
3	0.25 %Si	8.25	6.40	5.16	8.57
4	0.4 %Si	4.53	5.75	6.56	6.35

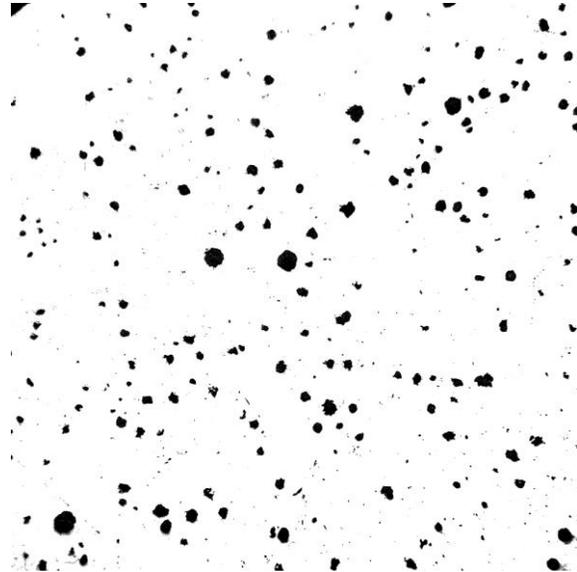
*b) Niveles de 2.0%Cr 0.5%V.*

Punta	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
5	0.03 %Si	4.71	5.50	3.30	5.04
6	0.12 %Si	6.90	6.00	5.32	6.00
7	0.25 %Si	7.46	5.60	4.85	6.00
8	0.4 %Si	6.02	6.72	3.52	3.36

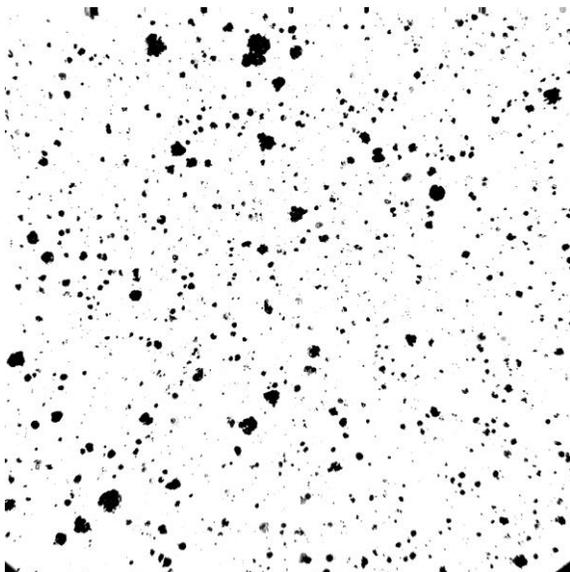
En la Tabla 4.9 se obtuvo el porcentaje de carbono grafito por zona, donde de manera general se observa que las piezas con 1.5 % Cr y 0.5%V tienen un rango de 4.5 a 6.5 % de carbono grafito mientras que las puntas con 2%Cr y 0.5%V están en un rango de 5 a 7 %, solo en la punta 4 (Figura 4) con 0.12%Si 2%Cr-0.5%V se tienen los valores que pueden considerarse homogéneos, en las otras puntas no se presenta dicho efecto lo que nos indica que la inoculación tampoco fue homogénea, y es por ello que en algunas zonas tenemos cantidades de carbono grafito que salen de los rangos descritos anteriormente, tal es el caso de la punta número 8 (Figura 4.1) donde presenta valores entre 3% – 6% de carbono grafito.



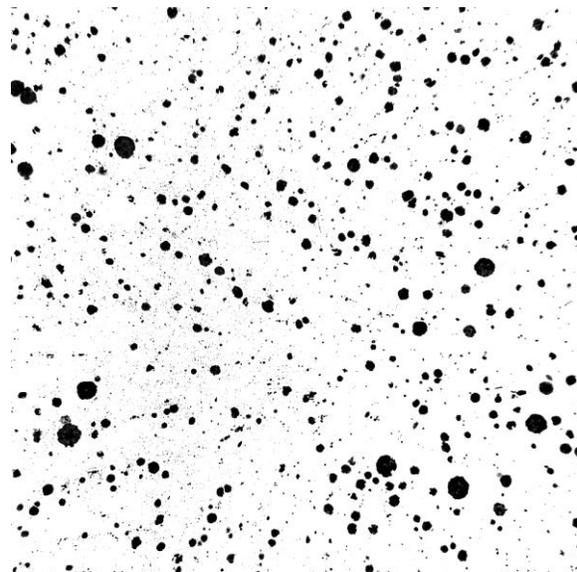
Zona 1



Zona 2

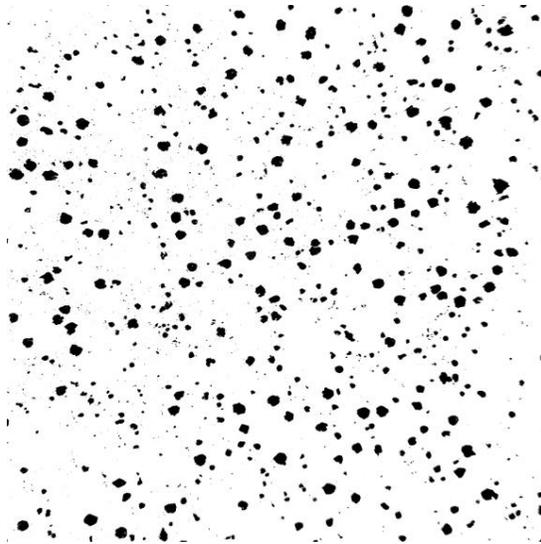


Zona 3

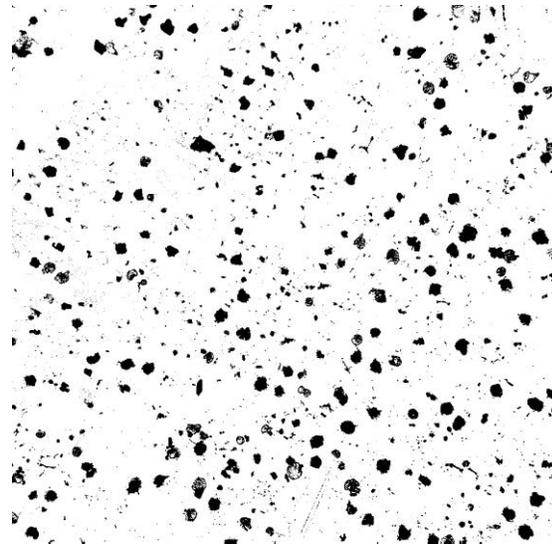


Zona 4

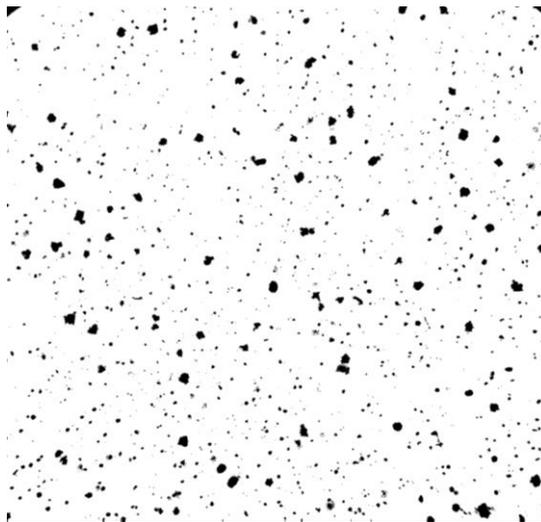
Figura 4 Comparación metalográfica entre las zonas de una punta para excavadora de composición 2.0%Cr, 0.5%V y 0.12%Si en inoculación tardía, donde se observa la presencia de esferoides de carbono grafito



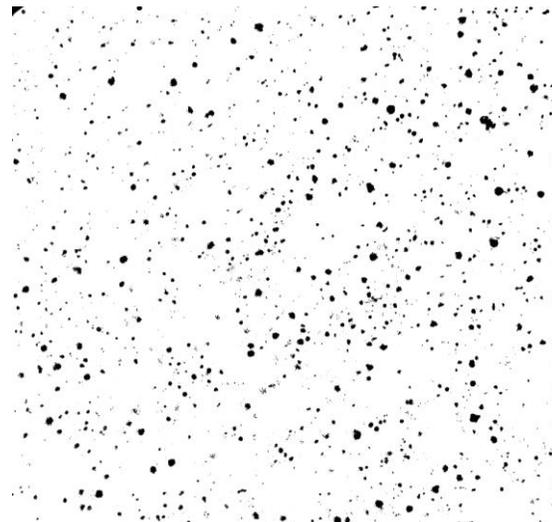
Zona 1



Zona 2



Zona 3



Zona 4

Figura 4.1 Comparación metalográfica entre las zonas de una punta para excavadora de composición 2.0%Cr, 0.5%V 0.4%Si en inoculación tardía, donde se observa la presencia de esferoides de carbono grafito

Analizando, las zonas de menor espesor son las denominadas zona 1 y 2 donde se esperaría una mayor velocidad de enfriamiento y una menor cantidad de carbono grafito en comparación a las zonas 3 y 4 (mayor espesor) sin embargo los resultados no presentan dicha



tendencia, la justificación a ello se fundamentan en la geometría de la pieza, diseño del sistema de colada el cual tiene una sola entrada a cada pieza, estando está en la parte central de la pieza generando gradientes de temperatura a lo largo de la pieza provocando velocidades de enfriamiento diferentes, esto se puede observar en las cuatro zonas donde se colocaron los termopares, en la Figura 4.2 se puede observar como son diferentes los tiempos de solidificación en las cuatro zonas.

Esta tendencia en las velocidades de enfriamiento se puede observar de manera gráfica en la Figura 4.2 donde se aprecia que la zona 4 es la de mayor velocidad de enfriamiento, mientras que la zona 2 es aquella que presenta el efecto inverso.

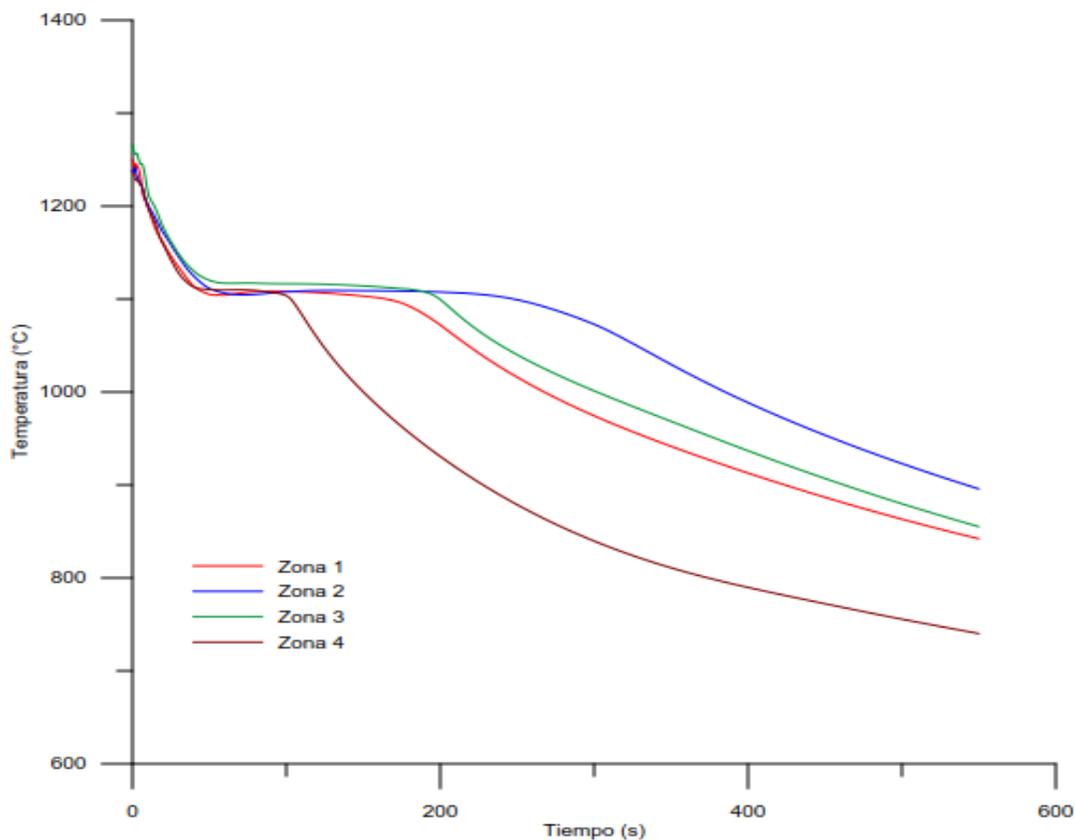


Figura 4.2 Curvas de enfriamiento de las 4 zonas de estudio de una misma punta de excavadora con 1.5%Cr, 0.5%V y 0.4% inoculación



La revisión bibliográfica indica que a un incremento en el porcentaje de Cr, se verá abatido el efecto de los elementos grafitizantes sin embargo esta tendencia no se presenta en los resultados a causa de las diferentes variables involucradas en el proceso.^[1]

Comparando los porcentajes de cromo utilizados podemos observar que la mayor cantidad de carbono grafito se presenta en aquellas puntas con un porcentaje de 2.0%Cr-0.5%V esto debido a que con la presencia de estos elementos formadores de carburos se favorece la presencia de carburos aleados, disminuyendo la tendencia a formar carburos ledeburíticos, esto en unión con las altas velocidades de enfriamiento obtenidas nos ayudan a potencializar el efecto que presentara el cromo y vanadio a la presencia de carbono grafito, lo que se refleja aumento de carbono grafito también hasta cierto grado su características lo cual se discutió con anterioridad.

4.3 Evaluación de Matriz

Una vez evaluado el carbono grafito se aplicó el ataque pertinente con nital 3 para el revelado de la matriz de lo cual se obtienen los resultados presentados en la Tabla 4.10

Tabla 4.10 Evaluación de porcentaje de perlita en la matriz de puntas para excavadora con 1.5% y 2.0% de Cr, 0.5%V y diferentes niveles de inoculación en comparación con patrones AFS

Punta 1.5%Cr, 0.5%V	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
1	0.03	100	100	100	100
2	0.12	100	100	100	100
3	0.25	100	100	100	100
4	0.4	100	100	100	100



Punta 2.0%Cr	Nivel de Inoculación	Zonas			
		1	2	3	4
5	0.03	100	100	100	100
6	0.12	100	100	100	100
7	0.25	100	100	100	100
8	0.4	100	100	100	100

Retomando las Tablas 4.1 a la 4.4 observamos que la composición de Mn se encuentra en un intervalo de 0.55 a 0.57 lo cual en base a los fundamentos teóricos expresa una matriz 100% perlítica a partir de un valor de 0.4% Mn, el efecto de este elemento se ve favorecido por la presencia de Cu, siendo este un elemento perlitizante, el cual se encuentra en la media del rango de composición química establecido por la ASTM.

Un ejemplo de las matrices evaluadas se muestra en la Figura 4.3, el resto se presenta en el Anexo C.

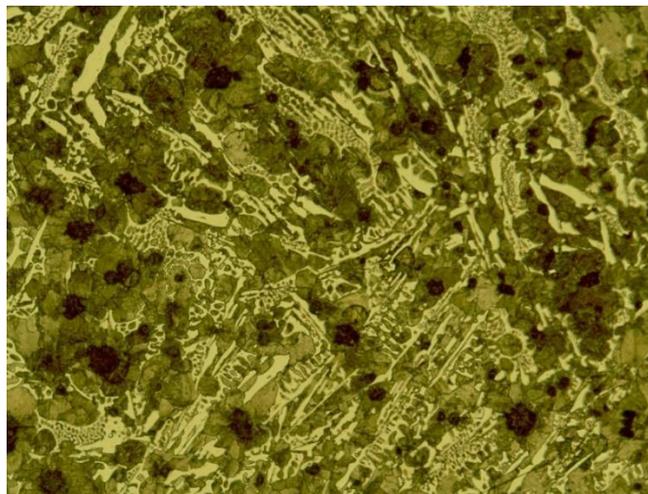


Figura 4.3 Fotografía de punta de excavadora número 7 atacada con nital 3, 2 % Cr, 0.5 % V, 0.25 %Si Inoculación. Zona 3, 100X. Donde se observa una matriz perlítica con la presencia de carburos y algunos esferoides de carbono grafito.



4.4 Cuantificación de carburos

Para la cuantificación del porcentaje de carburos se aplicó el ataque necesario descrito en el desarrollo experimental una vez obtenidas las imágenes a 100X con ayuda del microscopio óptico y el software Infinity, estas fueron tratadas con el software Imagen Pro Plus los promedios obtenidos de los dos barridos realizados se presentan en la Tabla 4.11 las imágenes metalográficas se incluyen en el Anexo B.

Tabla 4.11 Cuantificación general de carburos con software Imagen Pro plus en puntas para excavadora. a) 1.5%Cr y 0.5%V b) 2.0%Cr y 0.5%V

a)

Punta 1.5%Cr	Nivel de Inoculación	Zonas (%Carburos)				Promedio general (% Carburos)
		1	2	3	4	
1	0.03 %Si	27.28	28.25	27.34	32.77	28.91
2	0.12 %Si	31.66	27.72	26.19	28.36	28.48
3	0.25 %Si	28.82	27.47	27.15	28.49	27.98
4	0.4 %Si	34.87	27.00	18.07	29.47	27.35

b)

Punta 2.0%Cr	Nivel de Inoculación	Zonas (%Carburos)				Promedio general (% Carburos)
		1	2	3	4	
5	0.03 %Si	38.69	34.92	25.25	27.09	31.48
6	0.12 %Si	38.35	38.00	27.45	33.12	34.23
7	0.25 %Si	27.16	24.07	32.37	30.78	28.59
8	0.4 %Si	21.79	20.66	27.92	30.15	25.13

En la Tabla 4.11 se puede apreciar que los promedios generales para porcentaje carburos presenta una disminución al aumentar el nivel de inoculación manteniendo el porcentaje de los elementos



blanqueadores (Cr y V) constante, dichos promedios también nos permiten visualizar el incremento en la cuantificación de carburos al aumentar el porcentaje de Cr; sin embargo se debe tomar en cuenta que dichos promedios no distinguen entre los dos tipos de carburos formados ledeburíticos y libres, (aleados y no aleados) (Figura 4.4) ya que el software empleado sólo cuantifica la variación de tonalidades en una escala de grises, dicha identificación se ponderará posterior al tratamiento de Austemperizado que precederá el presente trabajo ya que los carburos ledeburíticos y no aleados al ser inestables se disolverán en dicho tratamiento permaneciendo los carburos aleados debido a la estabilidad que presentan Cr y V.

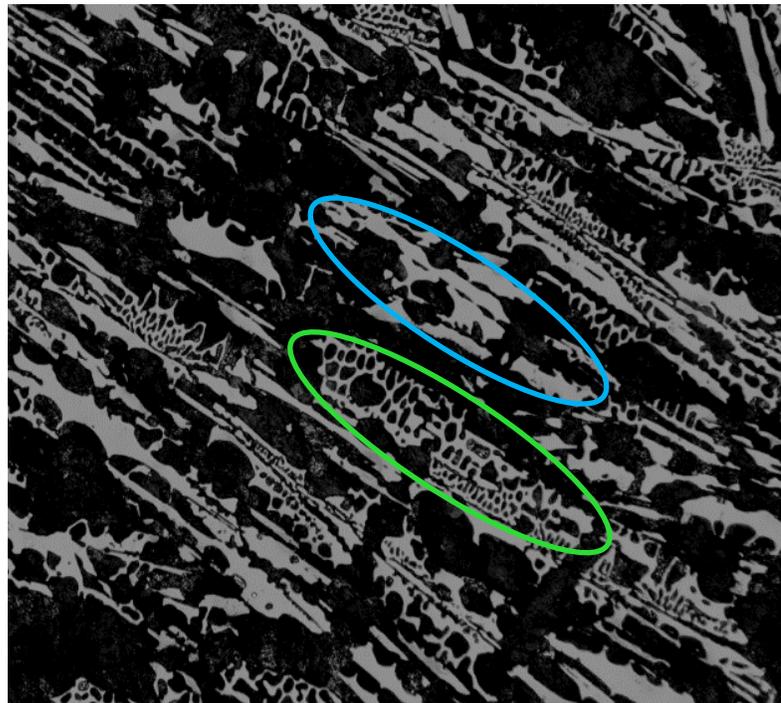


Figura 4.4 Metalografía oscurecida para el revelado de carburos, carburos ledeburíticos (elipse verde) y carburos libres (elipse azul) en una punta con 1.5 % Cr, 0.5 % V y post-inoculación 0.12 % base Si.

Como se ilustra en la Figura 4.4, la morfología es muy característica dependiendo del carburo formado ya que en base a ella podemos apreciar



la presencia de cada uno de ellos, el carburo libre se identifica por su forma laminar mientras que el carburo ledeburítico presenta la morfología característica de la pseudoleburita: perlita libre en un fondo blanco de cementita (Fe_3C).

Realizando una comparación de porcentaje de carburos entre las diferentes zonas de una misma punta, se observa que el porcentaje de carburos que se puede considerar homogéneo se encuentra en la punta número 3 (1.5%Cr, 0.5%V y 0.25% Post-inoculación) ya que el rango de diferencia máxima de carburos en esta punta de excavadora que maneja es aproximadamente de 2%. Aquella punta que presenta la parte contraria a este comportamiento es la identificada con el número 6 (2%Cr, 0.5%V y 0.25% Post-inoculación) ya que el rango de diferencia máxima de carburos en esta punta de excavadora es cercano al 10%. Lo cual no es considerado idóneo porque representa una desproporción muy evidente para una punta de excavadora.

Un dato importante que puede apreciarse es que en un nivel de 1.5%Cr y 0.5%V se reduce el rango de diferencia de porcentaje de carburos que se presenta comparando las cuatro zonas en cada una de las puntas, este rango tiene un valor de 6%, siendo el valor mínimo de 27% y el valor máximo de 33% como se puede observar en la Figura 4.5, mientras que en las puntas con 2%Cr y 0.5%V, el rango es más amplio con valores de hasta 14% de diferencia, siendo el valor mínimo de 24% y el valor máximo de 38% como se puede observar en la Figura 4.6 Por lo que valores de 1.5%Cr y 0.5%V acota los rangos lo que se traduce en un mejor control sobre la calidad metalúrgica de las puntas para excavadora. Se puede observar que para un nivel de 1.5%Cr y 0.5%V, la diferencia mínima en % de carburos fue de 2%, para el nivel de 0.25% de post-inoculación y para un nivel de 2%Cr y 0.5%V, la diferencia



mínima en % de carburos fue de 8%, para el nivel de 0.25% de post-inoculación.

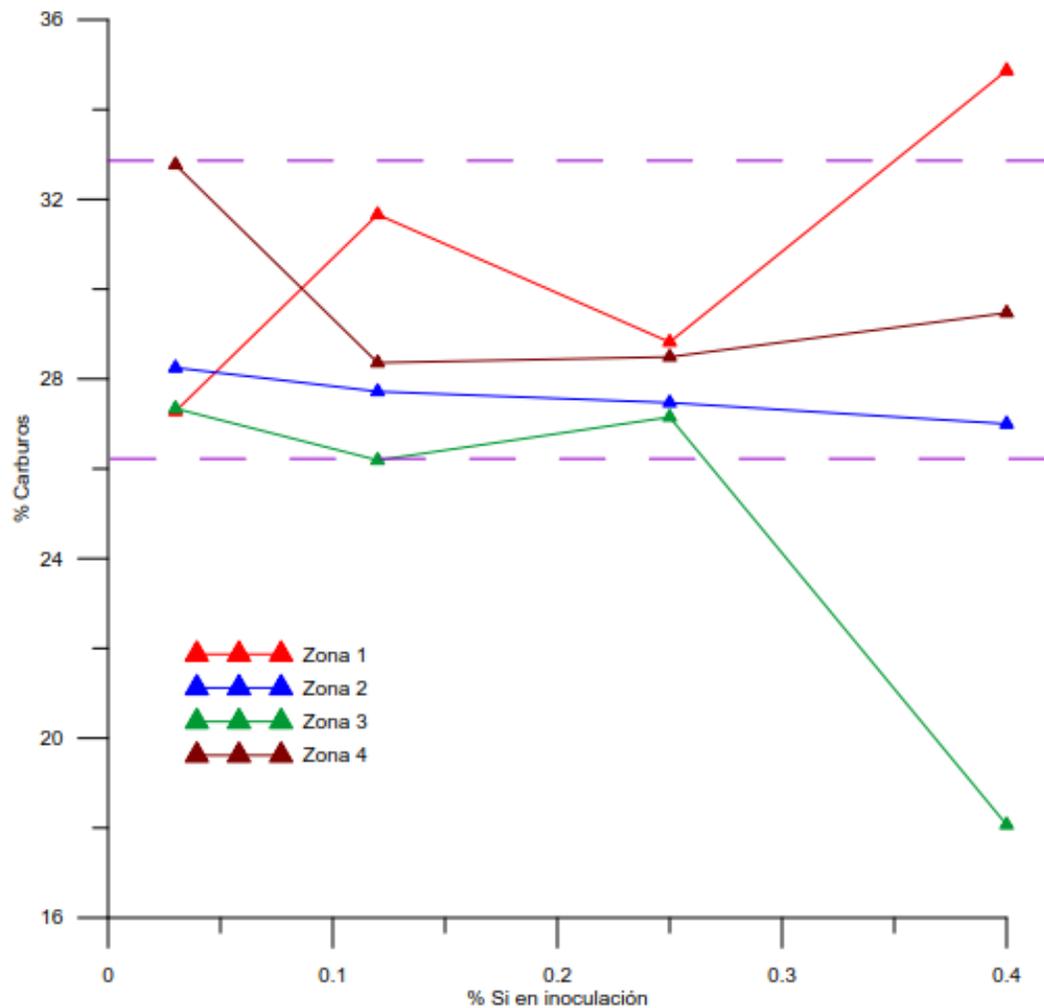


Figura 4.5 Relación de porcentaje de carburos con el nivel de inoculación en cada una de las zonas de las puntas para excavadora con 1.5% Cr - 0.5% V. La Zona punteada representa el rango de carburos (6%), establecido por la composición de Cr.

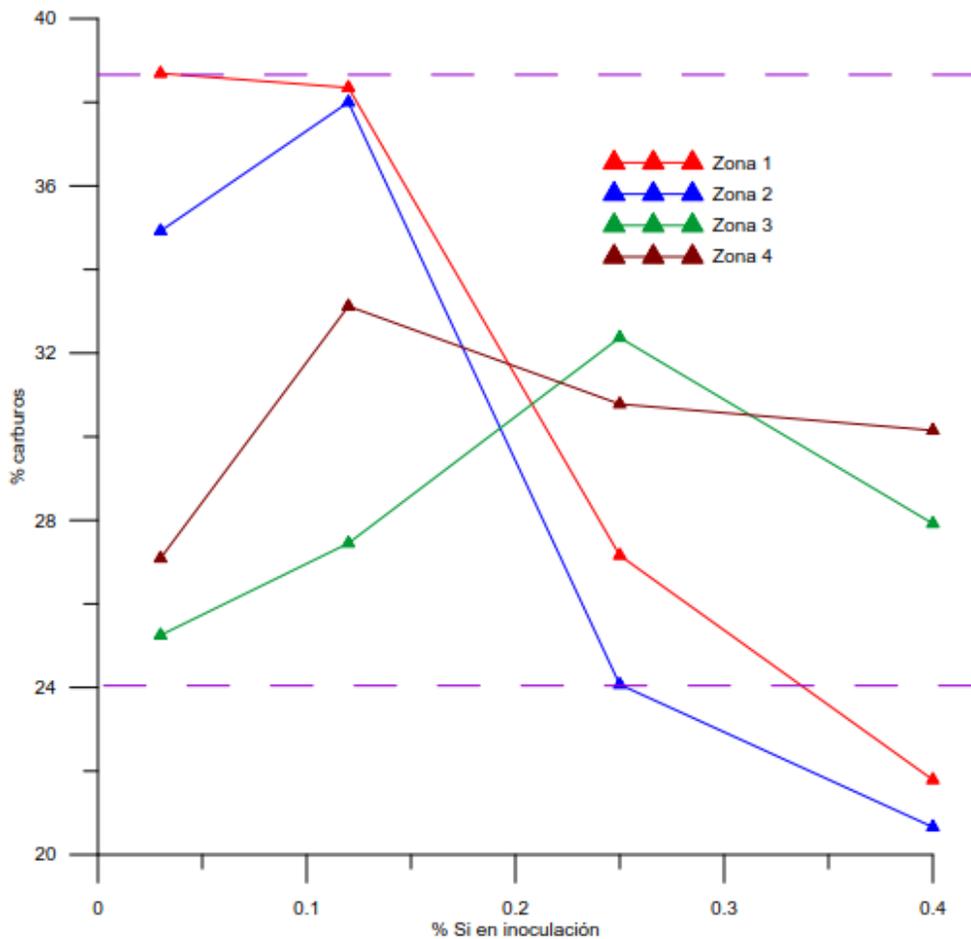


Figura 4.6 Relación de porcentaje de carburos con el nivel de inoculación en cada una de las zonas de las puntas de excavadora con 2.0% Cr - 0.5% V. La Zona punteada representa el rango de carburos (14%), determinado por la composición de Cr.

4.3 Análisis Térmico

Se realizaron los cálculos de las Temperatura Eutéctica Estable Teórica (TEE_T) y la Temperatura Eutéctica Metaestable Teórica (TEM_T) a partir de las EC. 2 y EC. 3, tomando las composiciones químicas de las Tablas 4.1 a la 4.4, los coeficientes de partición (f_x) se presenta en el Tabla 2.2 y considerando una inoculación con una eficiencia del 100%, dichos valores se muestran en la Tabla 4.12 [16]



Tabla 4.12 Muestra las TEM_T , TEE_T y TE_{EXP} para cada zona considerando niveles de Cr, V y post-inoculación

Elemento	% Post-inoculación	TEM_T (°C)	TEE_T (°C)	TE_{exp} (°C)			
				Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Fe-C		1148	1154	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1.5%Cr-0.5%V	0.03	1140.33	1163.86	1089	1112	1109	1109.2
	0.12	1139.43	1164.22	1083	1117	1085	1107
	0.25	1137.88	1165.03	1101	1116	1115	1110
	0.4	1136.38	1165.63	1108	1109	1116	1109
2.0%Cr-0.5%V	0.03	1140.50	1164.58	1103	1105	----	1104
	0.12	1139.60	1164.94	1105	1108	1105	1138
	0.25	1139.88	1164.99	----	----	----	----
	0.4	1138.38	1165.59	----	----	----	----

Los elementos presentes en la composición química del hierro fabricado presentan efectos diferentes sobre TEM y TEE, este trabajo está enfocado en el efecto de Cr, V y niveles de inoculación sin embargo durante el análisis de resultados se puede apreciar el efecto que tienen otros elementos como Mg y Mn.

De manera puntual en la TEM_T se visualiza el efecto de la inoculación al incrementarse su nivel, la temperatura disminuye aproximadamente 1 °C. Los niveles de Mn y Mg al estar en el límite superior del rango establecido por la ASTM, hacen notorio el efecto que tienen sobre dicha temperatura ya que la disminuyen en comparación con la reportada en un diagrama Fe-C (1148°C).



En el caso de TEE_T no se profundiza sobre el efecto de los elementos aleantes (Cr y V) debido a que no se tienen reportados los valores de coeficiente de partición en la literatura, siendo esta similar al compararlas en los niveles de 1.5 y 2.0 % Cr.

Los trabajos anteriores y la literatura describen el efecto del Cr y V sobre TEM_T el cual indica que incrementan dicha temperatura, en los resultados obtenidos en este trabajo no muestran esta tendencia debido a que la diferencia entre niveles de Cr es sólo de 0.5 % esto aunado a que los elementos como Si, Mg y Mn, como ya se mencionó con anterioridad se encuentran en valores que son considerados elevados lo cual se traduce en un efecto del abatimiento del Cr y V por dichas razones, un incremento en 0.5 % Cr no es significativo para la observación del efecto que tiene este elemento sobre la TEM_T

La Tabla 4.13 se logró en base a las curvas de enfriamiento obtenidas (Anexo D), tratando las mismas como se expone en la Figura 4.7, en la cual se señalan las TEE_T , TEM_T , TE_{EXP} y $T_{Subenfriamiento}$, estas con la finalidad de calcular $\Delta T_{Eutético}$ y $\Delta T_{Subenfriamiento}$, siendo calculados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Delta T_{Eutético} &= TEM_T - TE_{EXP} \\ \Delta T_{Subenfriamiento} &= TE_{EXP} - T_{Subenfriamiento}\end{aligned}$$

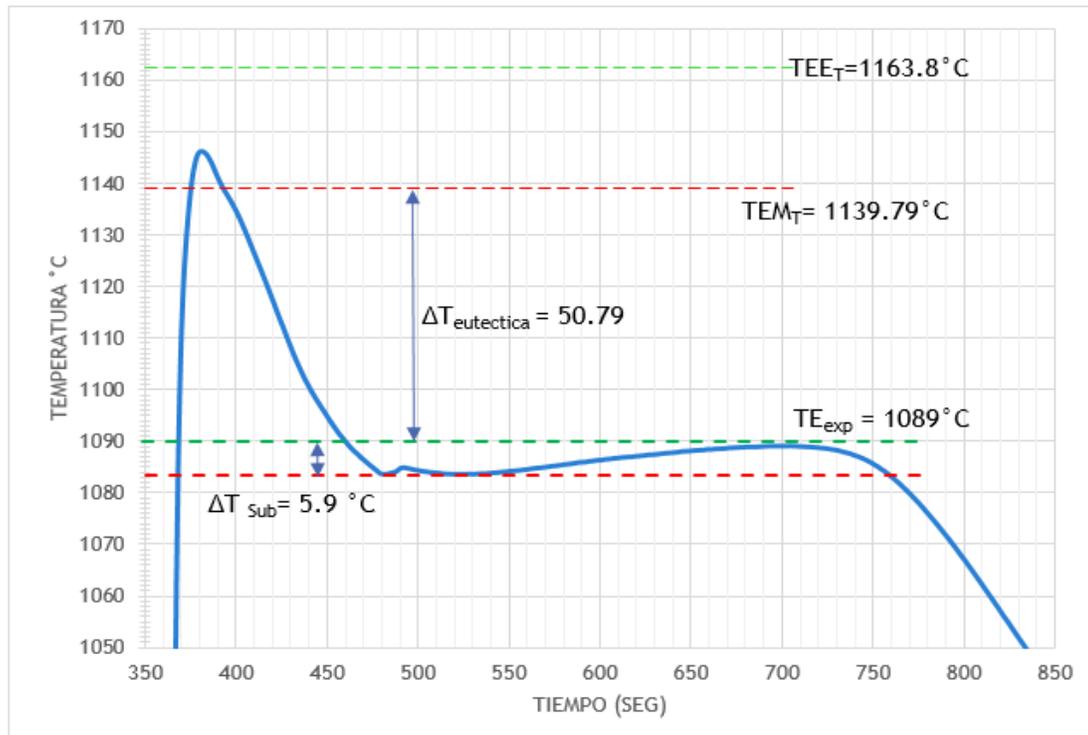


Figura 4.7 Curva de enfriamiento, con post-inoculación 0.12% base Si, 2.0%Cr y 0.5%V obtenida en la zona 2 de la punta para excavadora, se obtiene ΔT_{sub} y TE_{exp}

Tabla 4.13 Muestra la Diferencia entre TEM_T y TE_{EXP} ($\Delta T_{Eut\acute{e}ctico}$), diferencia entre TE_{EXP} y $T_{Subenfriamiento}$ ($\Delta T_{Subenfriamiento}$).

% Cr- %V	Nivel de inoc.	$\Delta T_{Eut\acute{e}ctico}$				$\Delta T_{Subenfriamiento}$			
		Zona							
		1	2	3	4	1	2		
1.5 - 0.5	0.03	51.33	28.33	31.33	31.13	5.9	2	1	1.2
	0.12	56.43	22.43	54.43	32.43	4	0	0	0
	0.25	36.88	21.88	22.88	27.88	3	3	0	0
	0.4	28.38	27.38	20.38	27.38	4	5	0	0
	0.03	37.5	35.5	----	36.5	1.5	0	----	0



2.0- 0.5	0.12	34.6	31.6	34.6	38.6	1.5	0	0	0
	0.25	----	----	----	----	----	----	----	----
	0.4	----	----	----	----	----	----	----	----

De forma puntual los $\Delta T_{\text{Eutéticos}}$ no presentan una diferencia significativa al compararlos entre distintos niveles de Cr y los mismos niveles de inoculación, corroborando con ello que un incremento de 0.5 % Cr no presenta una variación significativa.

Los valores de TE_{EXP} se encuentran por debajo de la TEM_T lo cual investigaciones previas para los hierros catalogan este comportamiento como indicador del blanqueado total en un hierro nodular sin embargo en base a la evidencia metalográfica podemos afirmar que dicho comportamiento no se presenta en los hierros nodulares aleados con Cr y V.

A su vez al realizar una comparación entre $\Delta T_{\text{Subenfriamiento}}$ y la cuantificación de carburos proveniente del análisis metalográfico no se encuentra relación alguna como resultado de la colaboración de los elementos que abaten el subenfriamiento con la finalidad de favorecer la presencia de centros de nucleación para la precipitación de carbono grafito.

A partir de las curvas de enfriamiento obtenidas, éstas se trataron en el software Table Curve 2D v5.01, por medio del cual se lograron los valores de la primera y segunda derivada, posteriormente se graficaron los valores como se muestra en la Figura 4.8.

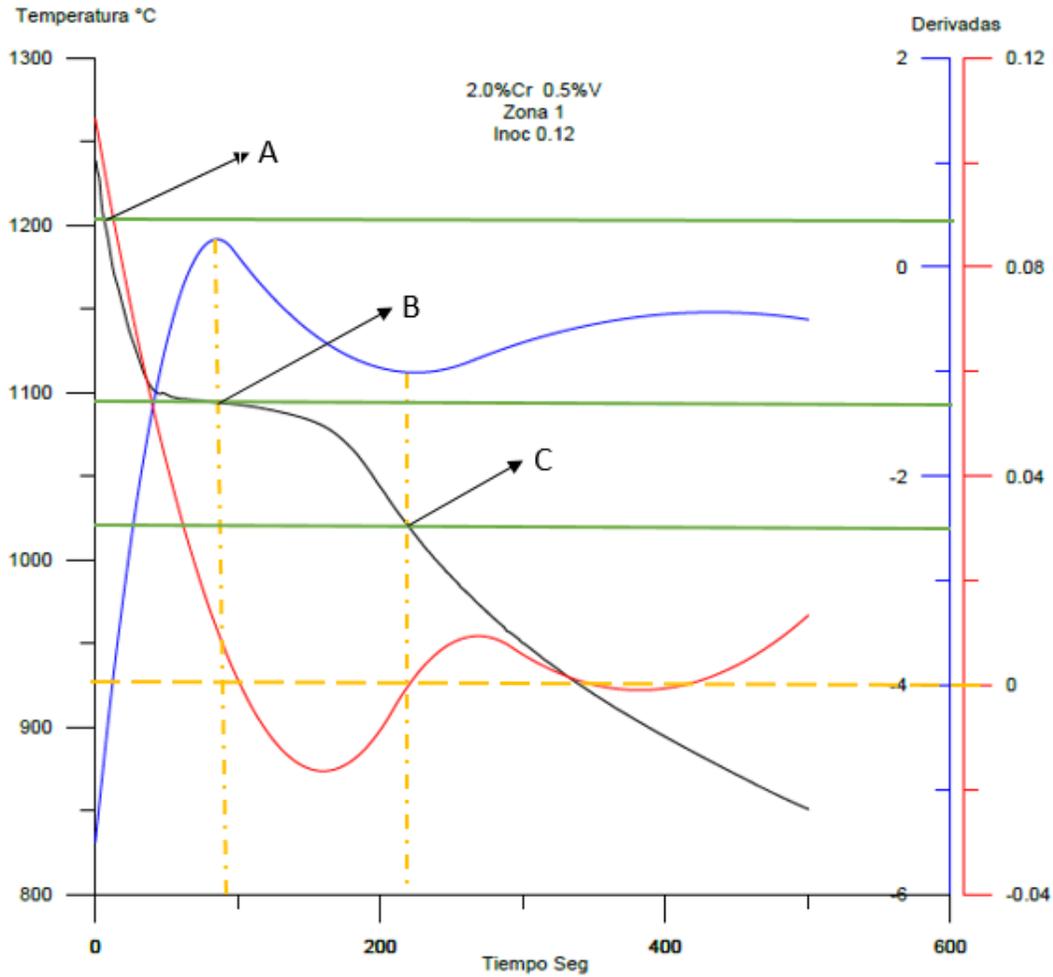


Figura 4.8 Curva de enfriamiento (negro), primer derivada (azul) y segunda derivada (roja) de una punta de excavadora en la zona 2 con 2.0% Cr, 0.5% V y post-inoculación de 0.12%. A) Inicio de la solidificación B) Inicio de la reacción eutéctica C) Final de la reacción eutéctica.

En el punto A se muestra el inicio de la solidificación el cual se observa un cambio en la pendiente de la curva de enfriamiento, el punto B indica el inicio de la reacción eutéctica, valor que corresponde al máximo de la primer derivada y donde la segunda derivada alcanza por primera vez el valor de cero, el punto C revela el final de la reacción eutéctica, siendo el mínimo de la primer derivada donde simultáneamente la segunda derivada obtiene nuevamente el valor de cero.^[12]



En la Tabla 4.14 se muestran los tiempos de solidificación de cada zona, las celdas con **, son aquellas curvas que no cumplen con el criterio de la segunda derivada, esto es que sus puntos críticos (B y C, Figura 4.8) los cuales representan el mínimo y máximo de la primer derivada no coinciden cuando el valor de la segunda derivada intersecta el valor de 0 en el eje de las ordenadas, esto es necesario ya que la finalidad de la segunda deriva es contrastar la variación de la primer derivada. En el Anexo D se muestran las curvas más representativas.

Tabla 4.14 Tiempos de reacción eutéctica (segundos), para las puntas de excavadora en las cuatro zonas.

% Cr - % V	Inoculación % base Si	Zona 1 (s)	Zona 2 (s)	Zona 3 (s)	Zona 4 (s)
1.5-0.5	0.03	217.5	334	212.5	140
	0.12	**	**	227	**
	0.25	215.5	416	**	120
	0.4	209.5	356.5	215	134
2.0-0.5	0.03	209.5	433	**	**
	0.12	206.5	427.5	213	129
	0.25	---	---	---	---
	0.4	---	---	---	---

Como se mencionó en el apartado referente a la caracterización de carbono grafito, aquellas zonas con los tiempos de solidificación mayores (zona 2) de manera general presentan un aumento en el tamaño de nódulo y decremento en la densidad de los mismos, siendo la zona 4 la que presenta un menor tiempo de solidificación y a su vez el efecto opuesto en cuanto a las características del carbono grafito.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES



- ⤴ La composición favorable bajo estas condiciones experimentales para la fabricación de una punta de excavadora es 1.5 % Cr, 0.5 % V y Post-inoculación de 0.25 % para obtener altos % de carburos y homogéneos.
- ⤴ El porcentaje de inoculación es de suma importancia ya que el efecto grafitizante del Si abate parcialmente el efecto blanqueador de Cromo y Vanadio, permitiendo la generación de centros de nucleación para que precipiten carbono grafito en forma de esferoides, y que se formen los carburos estables requeridos.
- ⤴ La geometría y los espesores de la pieza es un factor determinante en los tiempos de solidificación dentro de la pieza afectando directamente a la formación de los carburos aleados y no aleados.
- ⤴ Las puntas fabricadas con 1.5 % Cr – 0.5 % V presentan un mayor control sobre el rango de los porcentajes de carburos obtenidos, siendo este de 6%, para niveles de post-inoculación de 0.03, 0.12 y 0.25% base Si.
- ⤴ La punta que presenta una mayor homogeneidad en porcentaje de carburos fue con 1.5%Cr, 0.5%V y 0.25% Post-inoculación, presentando una variación máxima.
- ⤴ El aumento en el % Cromo en un 0.5 no es significativo para disminuir la Temperatura eutéctica experimental.
- ⤴ El porcentaje de carburos es adecuado ya que el % de carburos en general es ligeramente superior al establecido en la hipótesis, considerando que disminuirá posteriormente con el tratamiento de Austemperizado.
- ⤴ La composición química del hierro nodular experimental se mantuvo dentro de la establecida en la norma, así como el % de magnesio residual, obteniendo una nodularidad de 80% como mínimo.



- ⤴ El diseño del sistema de colada afecta la calidad metalúrgica de la pieza al tener una sola entrada a la misma, ya que se puede observar cómo afecta en los tiempos locales de solidificación.

SUGERENCIAS

- ⤴ Se sugiere la implementación de un método de inoculación adecuado para corroborar el efecto real de una alta inoculación e incrementar la eficiencia en los altos niveles de inoculación (0.4% base Si).

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Apraiz B. J. (1977). "Fundiciones". Madrid, España. editorial Dossat S. A., pp. 12,13, 143-164.
- 2.-Apraiz B.J. (2002) "Tratamientos Termicos de los Aceros", 10ª Edición, editorial Dossat S.A., España pp 107-124
- 3.- Zhou Jiyang. (2009) "Colour Metallography of Cast Iron", Vol. 6 No. 1, China Foundry, Dalian University of Tecnology, China, pp 57-62, 65-66.
- 4.- American Society for Metals (ASM). (1992). "Casting", Vol. 15 . Ohio, USA. Editorial ASM International, Materials park,.
- 5.- American Society for Metals (ASM). (1992). "Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys" Vol. 1. Ohio, USA: Editorial ASM International, Materials park.
- 6.- Juárez Tamayo H. (2013). "Cinética de la disolución de carburos en un hierro nodular aleado con 2.2% de Cr" Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM. CDMX México pp. 30-31, 42-43.
- 7.-Acosta M., Martínez M. (2000). "El tratamiento de los Hierros Nodulares en el Mejoramiento de los Materiales en la Industria Automotriz", publicación Técnica No. 148 del Instituto Mexicano del Transporte. México, pp. 1-57.
- 8.- American Society for Metals (ASM). (1992). """Metallography And Microstructures", Vol. 9" Ohio, USA. Editorial ASM International, Materials park.
- 9.-R Martins, J. Seabra, L. Magalhães. (2007) "Austempered ductile iron (ADI) gears: Power loss, pitting and micropitting", www.sciencedirect.com. Porto, Portugal.
- 10.-Arano L Gabriela, García H. Alejandro, Ruiz T. Agustin. (2012) "Fabricación de una pieza Prototipo de Hierro CADI", Memorias del XVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Salamanca, Guanajuato, México.

- 11.- Walton C. (1971). Gray and Ductile Iron Castings Handbook Gray and Ductile Iron Founder's Society, Cleveland, USA. Pp. 93-133
- 12.- Figuera E., Peroza G. y Rizzo N. (2005) "Diseño de programa computacional para evaluar la solidificación de hierro nodular comercial", Revista Latinoamericana de Metalurgia y materiales. Caracas, Venezuela. Pp. 15-22
- 13.-López Betancourt Adrián F.(2016) "Efecto de Vanadio en la formación de carburos en hierro nodular" Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM. CDMX México.
- 14.-American Foundrymen's Society (AFS),(1984). Inc. "Foundrymen's guide to ductil iron microstructures" Des Plaines, Illinois, USA, pp 1-19,18-21,36-48
- 15.-Mayorga Vergara Alvaro J. (2015) "Análisis térmico de hierros nodulares aleados con Cromo y relación con carburos precipitado" Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM. CDMX, México.
- 16.- M. Sheikholeslami, S.M.A Boutorabi. (2012). "A research on the calculation of graphitization ability of gray cast irons", Iranian journal of materials science & engineering vol9, number 4, Tehran Iran.
- 17.-Goodrich, G.M. (1993). "factors affecting ductile iron nodule count: a literature review" AFS cast iron division quality control committee, Illinois, USA. pp 1031-1037.
- 18.-Laino S., Dommarco R., Sikora J., (2004) "Desarrollo de Fundiciones Nodulares Austemperizadas con Carburos (CADI)", Congreso CONAMET/SAM, La Serena, Chile.

Anexo A

Carbono

Grafito

Metalografías evaluación de carbono grafito



Figura 3.6 Se muestra un ejemplo de las puntas para excavadora obtenidas por fundición de hierro nodular con carburos aleados de Cr y V

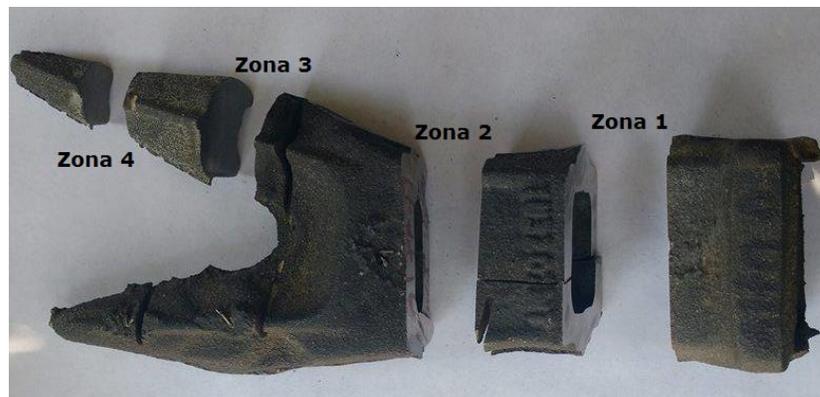


Figura 3.7 cortes realizados a cada una de las 8 puntas para excavadora

En las figuras presentes en este anexo se observa el carbono grafito obtenido en cada una zona de las puntas para excavadora, al pie de cada figura se presenta la evaluación numérica de carbono grafito realizada.



Anexos A

ZONA 1

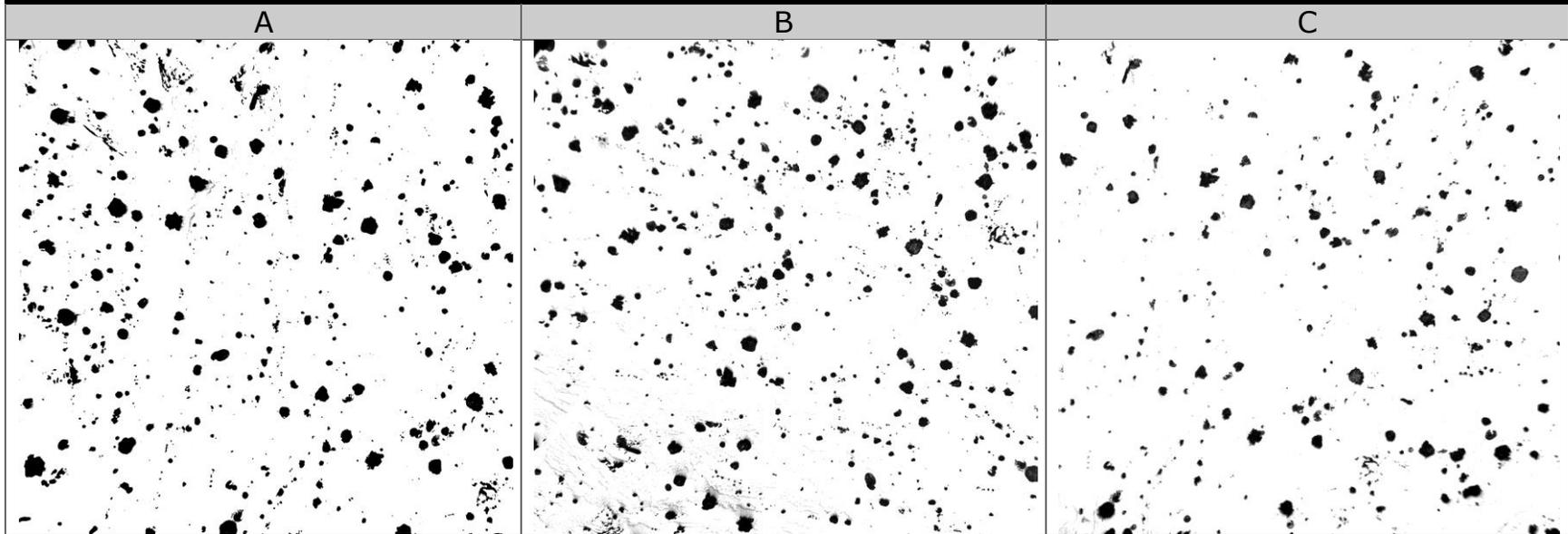


Figura I.- Punta 1 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 6.11% Nodularidad = 80 % Densidad de nódulos= 50 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

ZONA 2

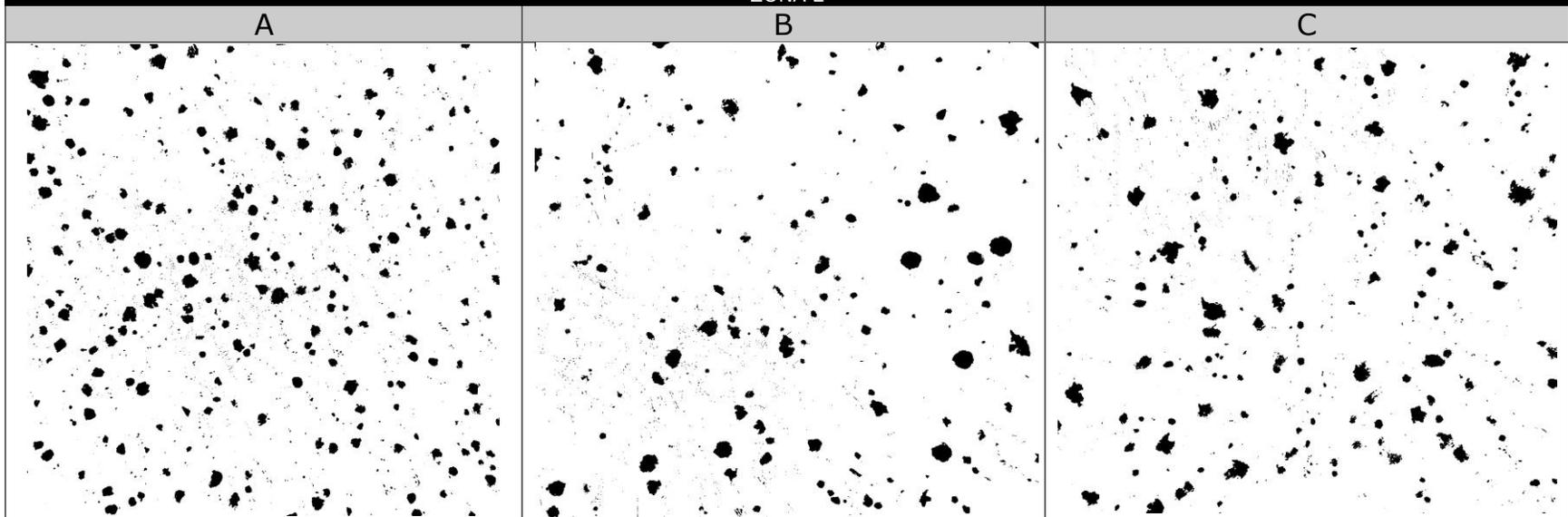


Figura II.- Punta 1 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 5.01% Nodularidad = 80 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

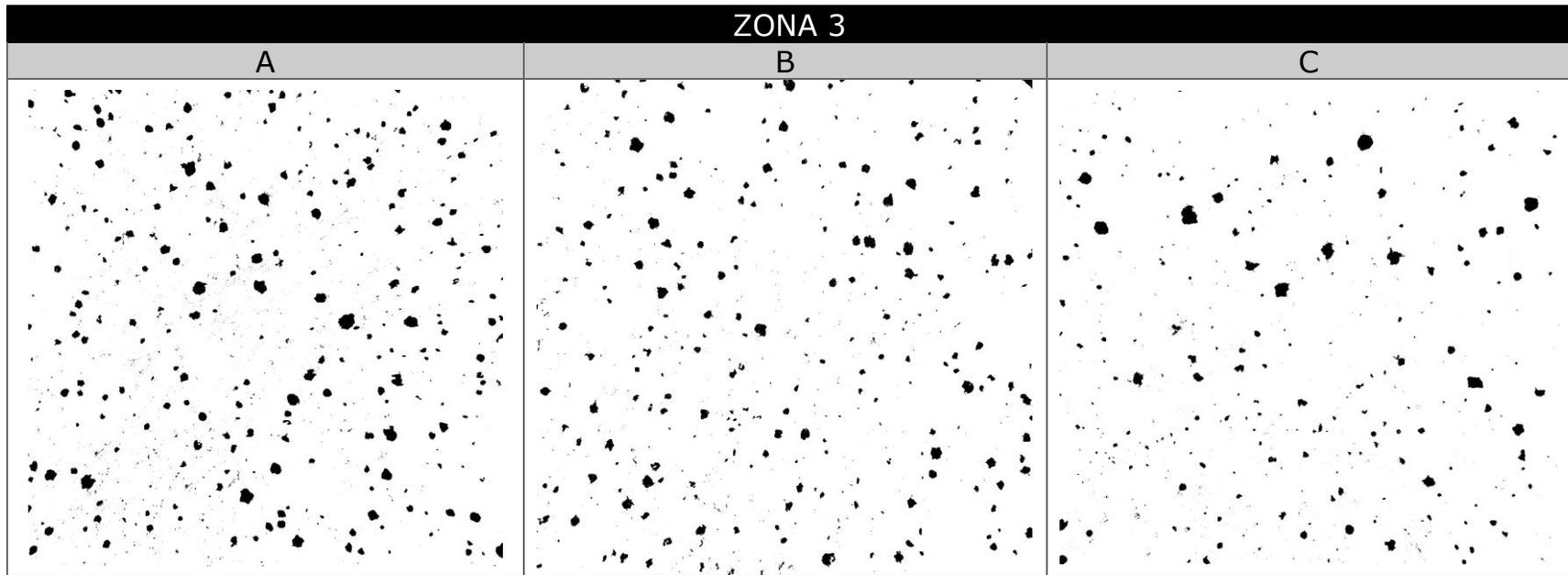


Figura III.- Punta 1 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =3.76% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

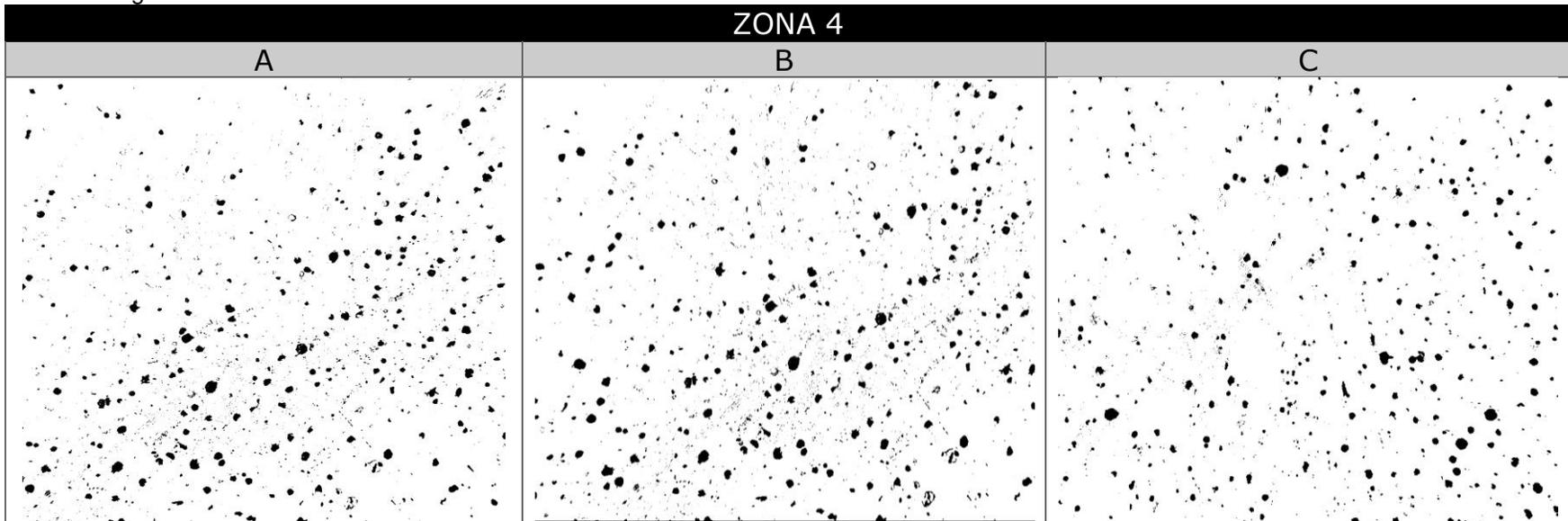


Figura IV.- Punta 1 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 2.57% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=7



Anexos A

ZONA 1

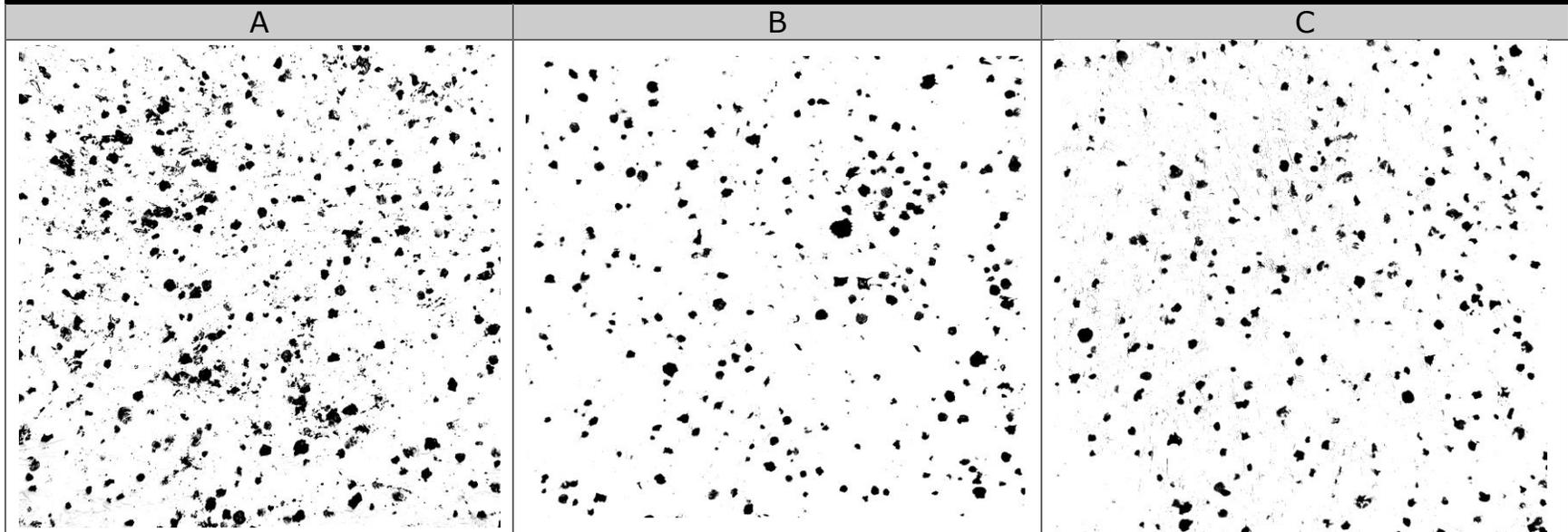


Figura V.- Punta 2 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito =6.04 % Nodularidad =80 % Densidad de nódulos=200 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

ZONA 2

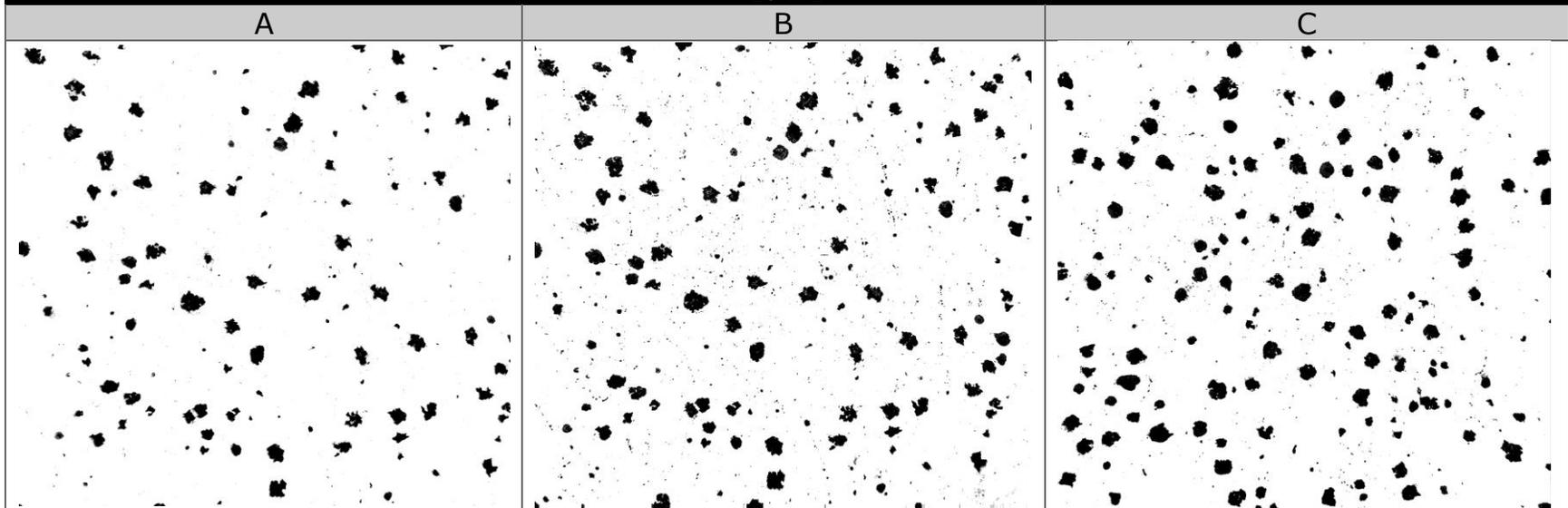


Figura VI.- Punta 2 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito =5.90% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos=50 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

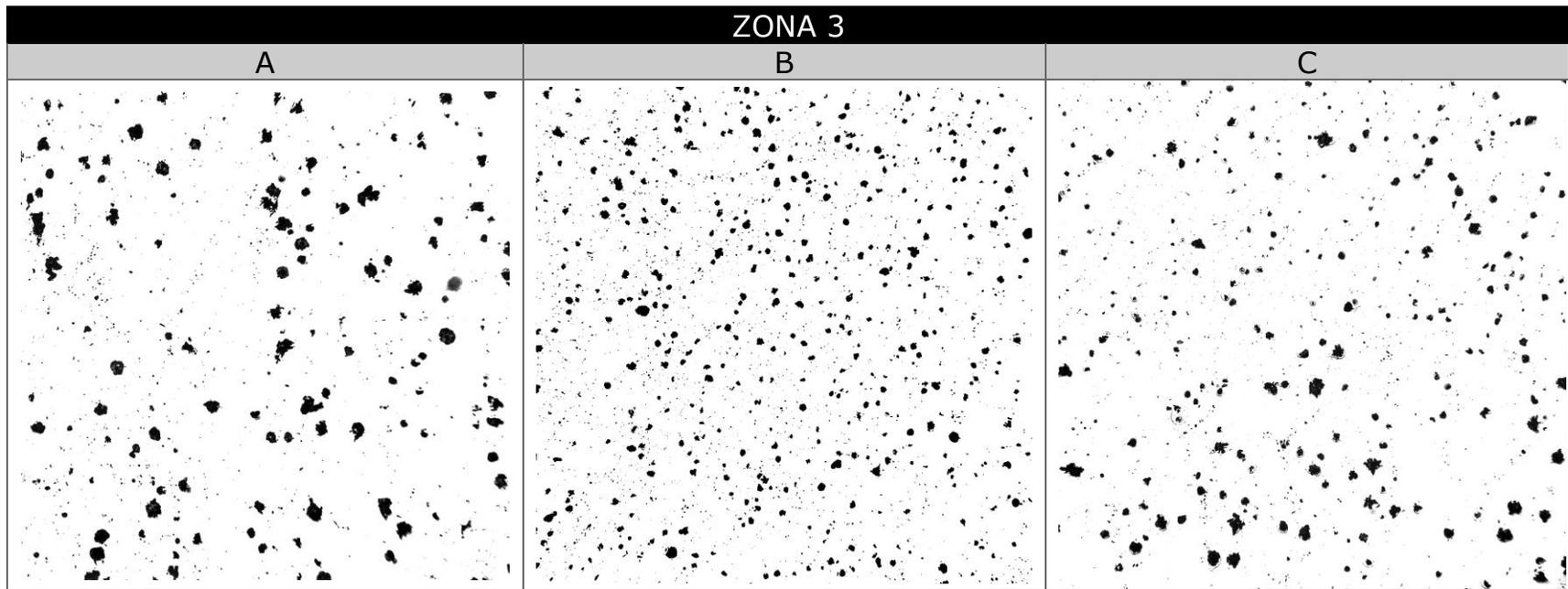


Figura VII.- Punta 2 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =4.26% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos=100 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

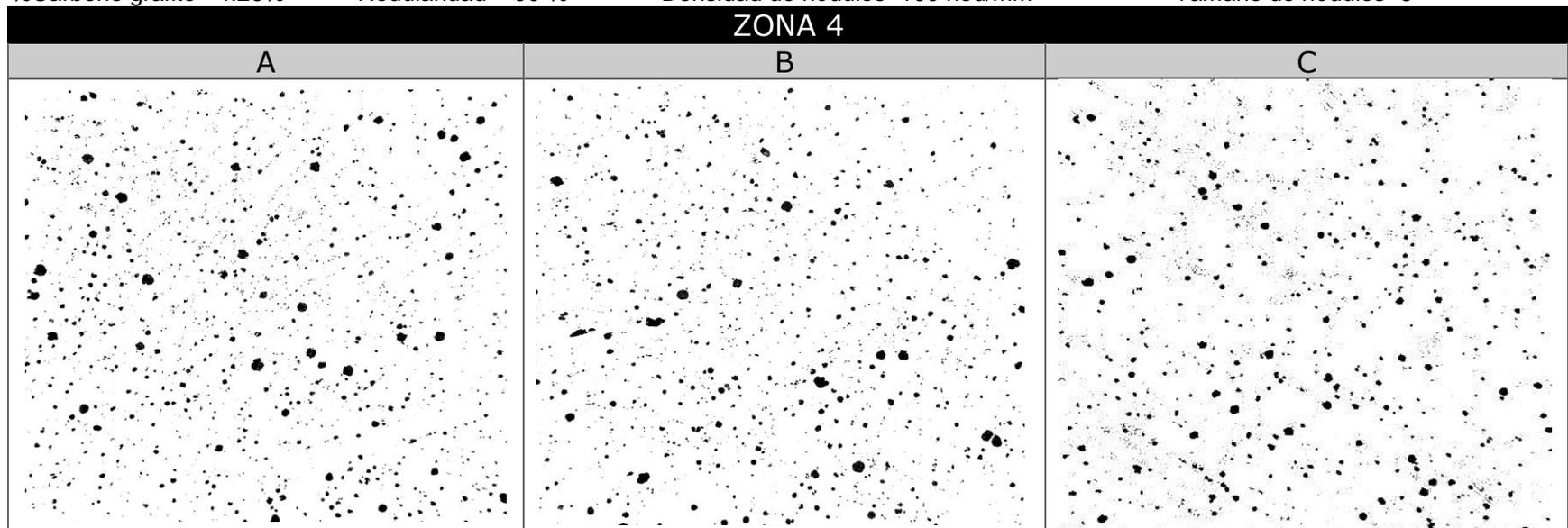


Figura VIII.- Punta 2 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =3.50% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos=150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6



Anexos A

ZONA 1

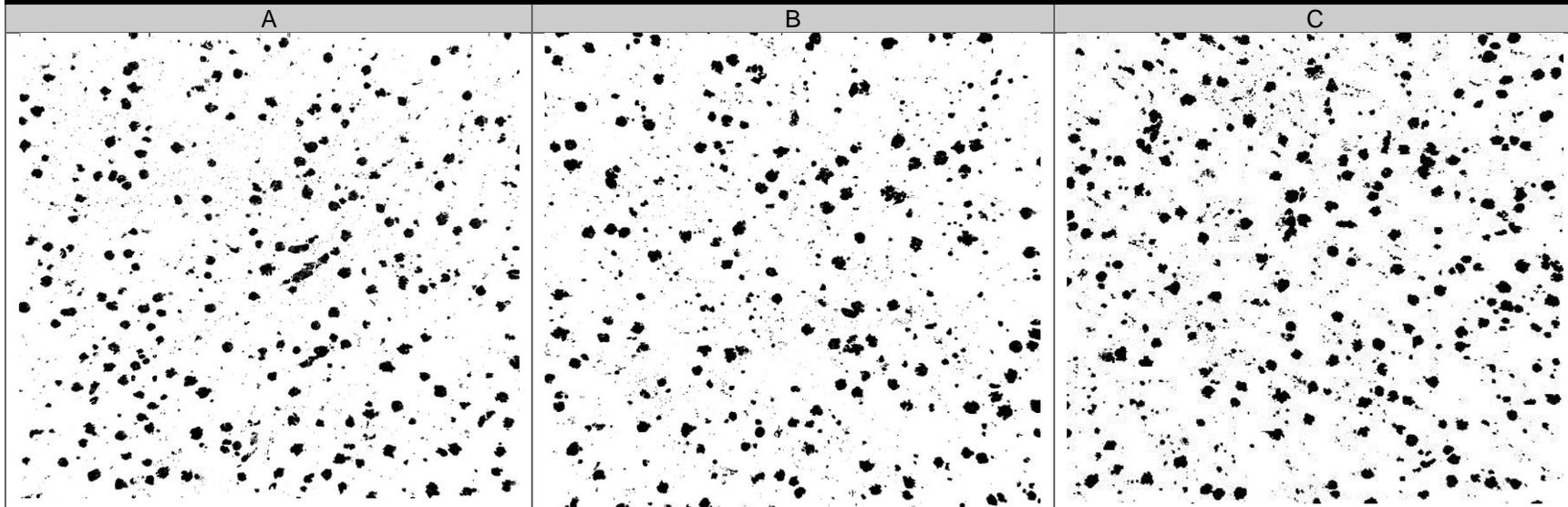


Figura IX.- Punta 3 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal, 100X
%Carbono grafito = 8.25% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

ZONA 2

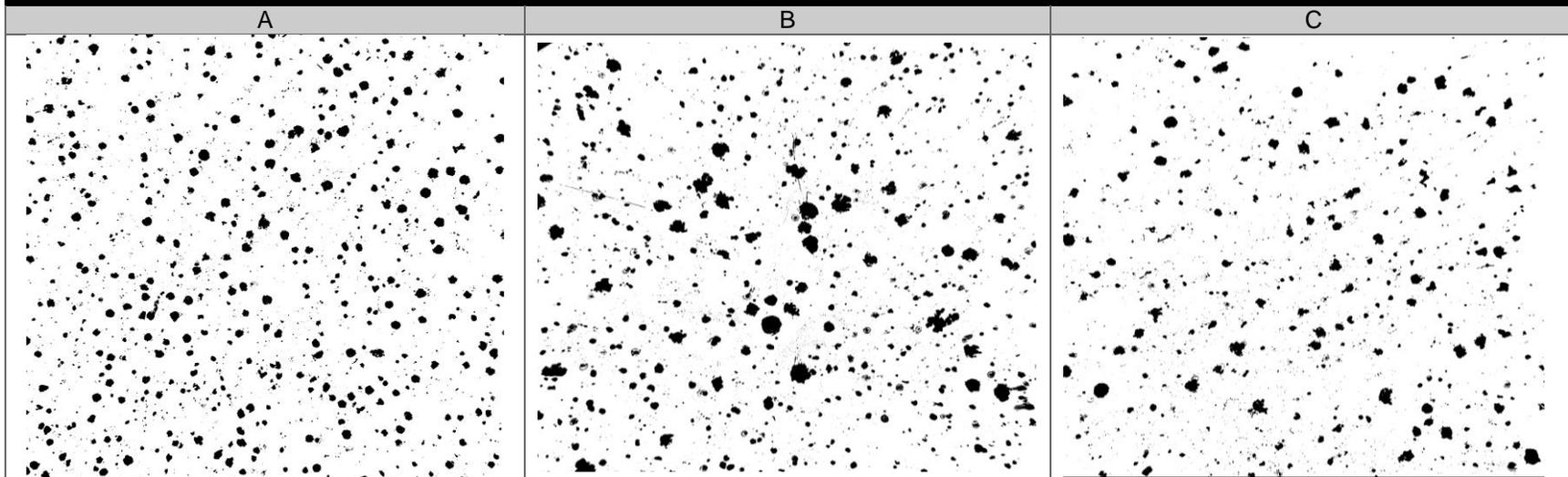


Figura X.- Punta 3 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
% Carbono grafito = 6.40% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

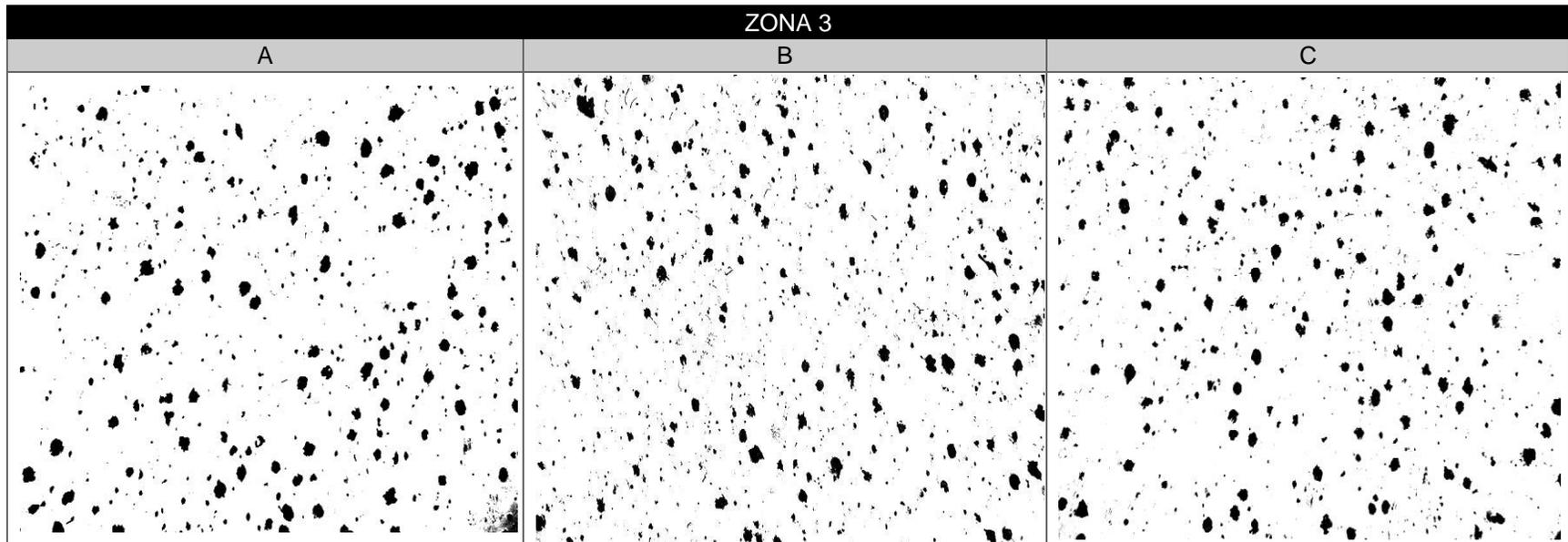


Figura XI.- Punta 3 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =5.16% Nodularidad = 80 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

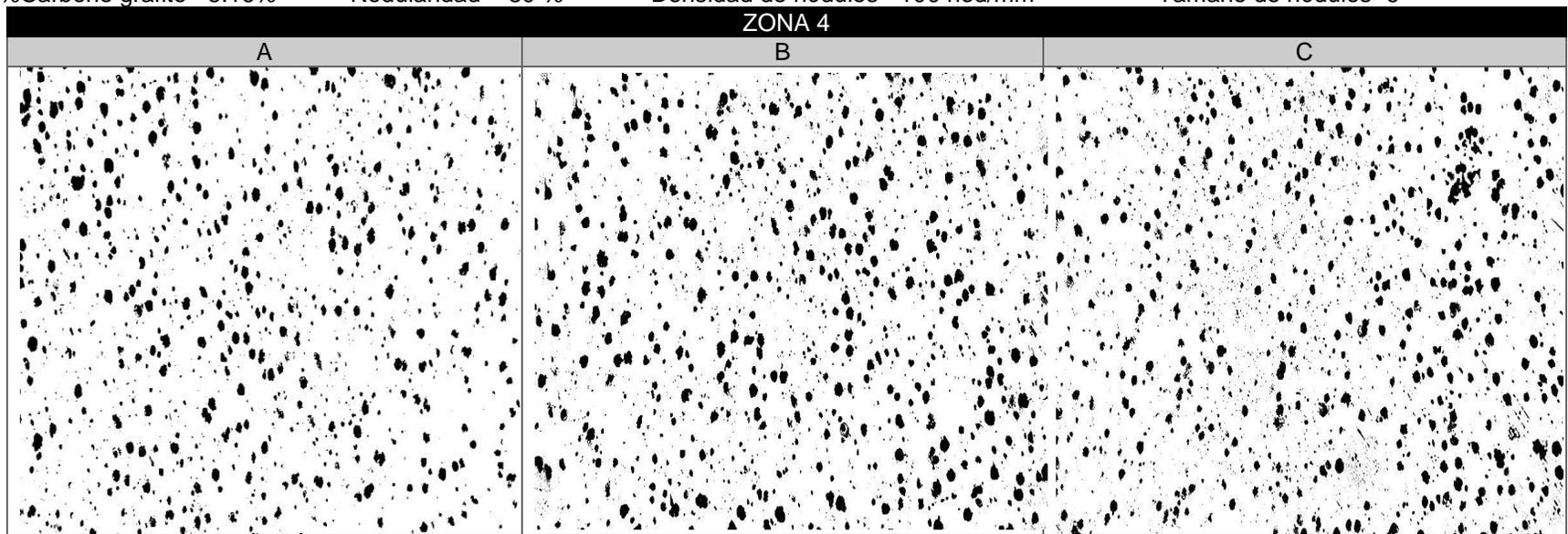


Tabla XII.- Punta 3 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 8.57% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 250 nod/mm² Tamaño de nódulos= 6



Anexos A

ZONA 1

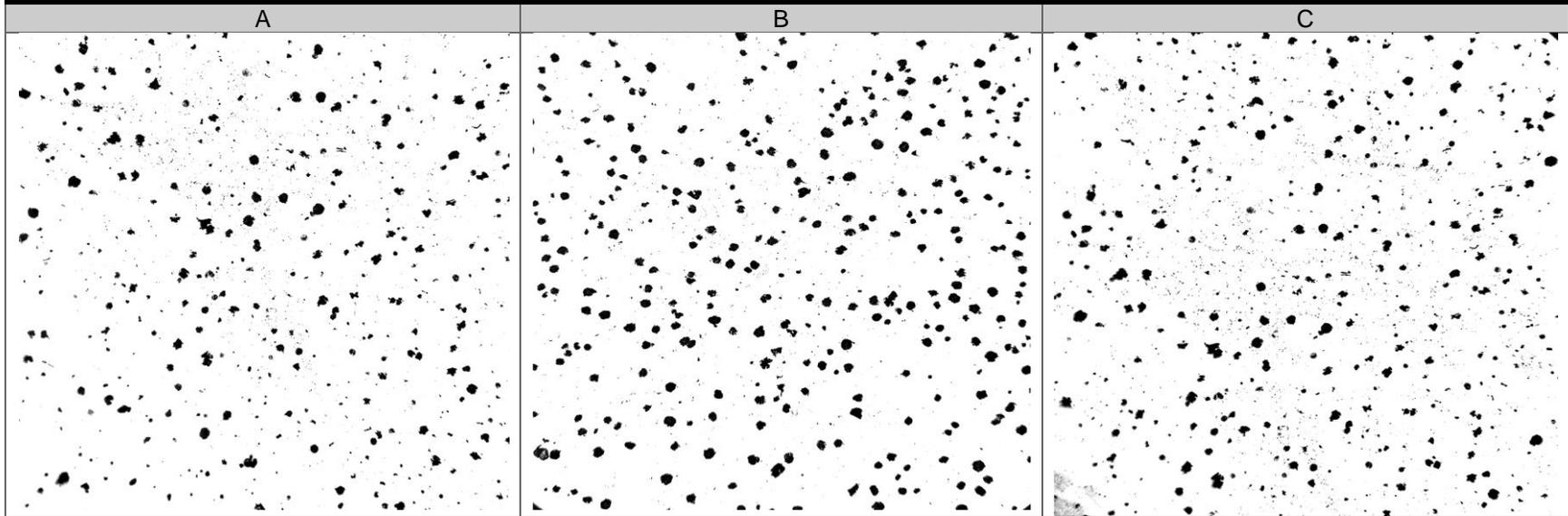


Figura XIII.- Punta 4 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si Caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 4.53% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=7

ZONA 2

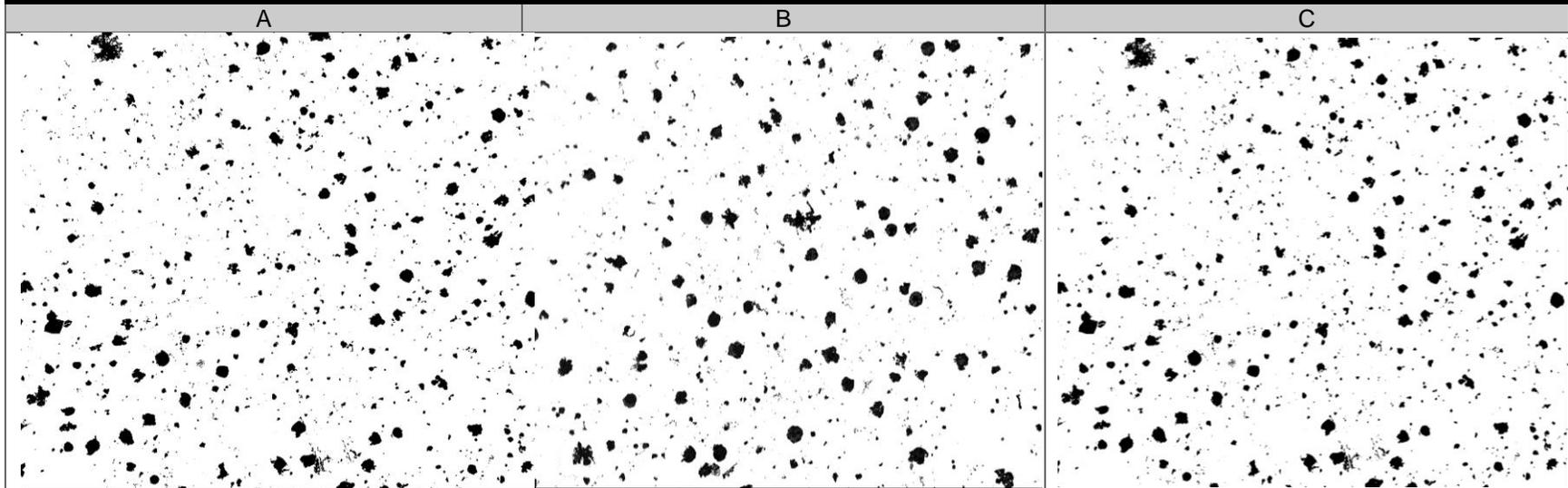


Figura XIV.- Punta 4 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100x
Carbono grafito = 5.75% Nodularidad = 80 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

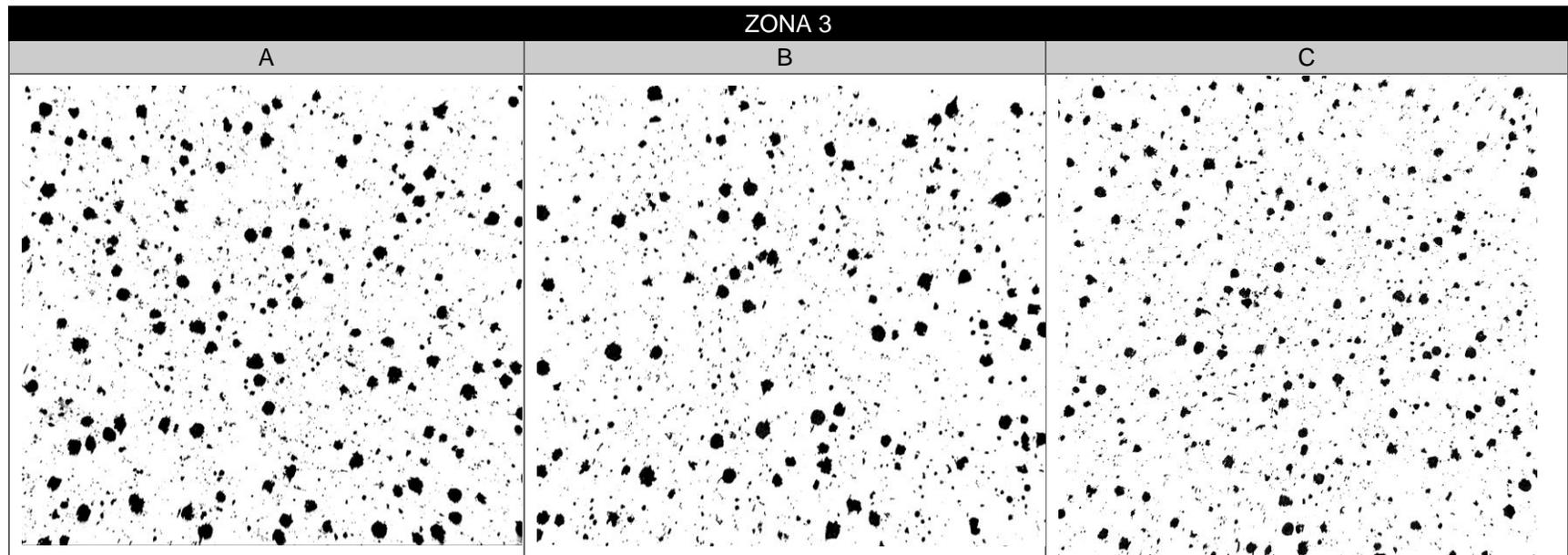


Figura XV.- Punta 4 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =5.16% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

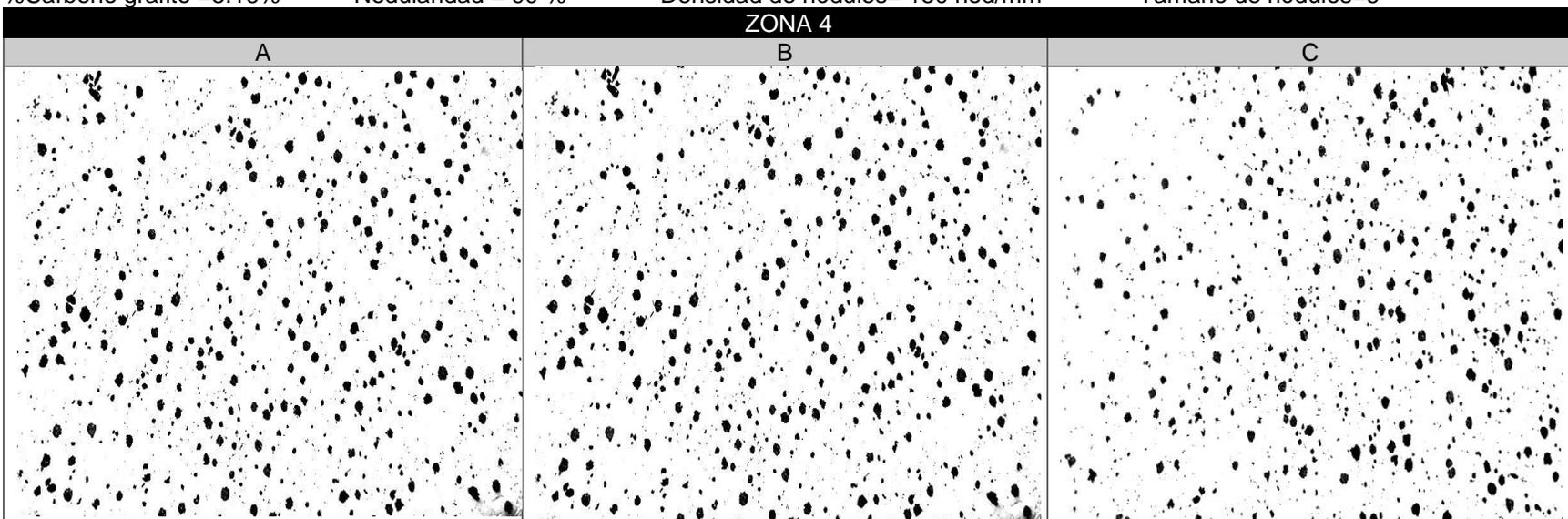


Tabla XVI.- Punta 4 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 8.57% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos= 6

ZONA 1



Anexos A

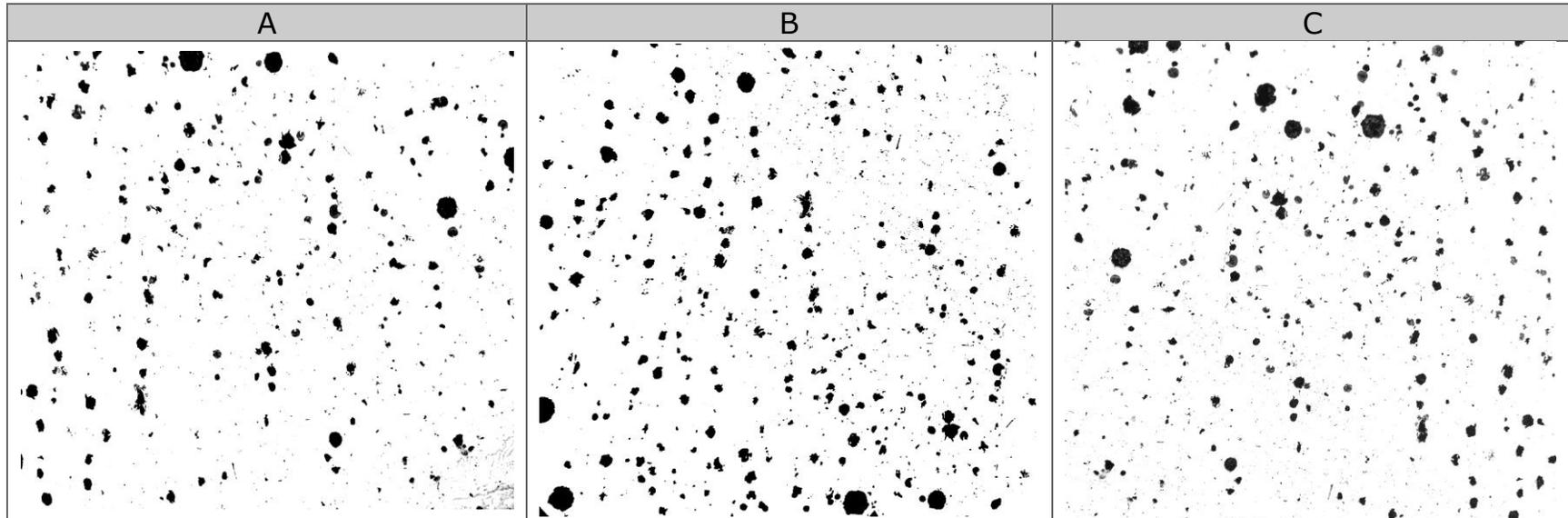


Figura XVII.- Punta 5 zona 1 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 4.71% Nodularidad = 80 % Densidad de nódulos=50 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

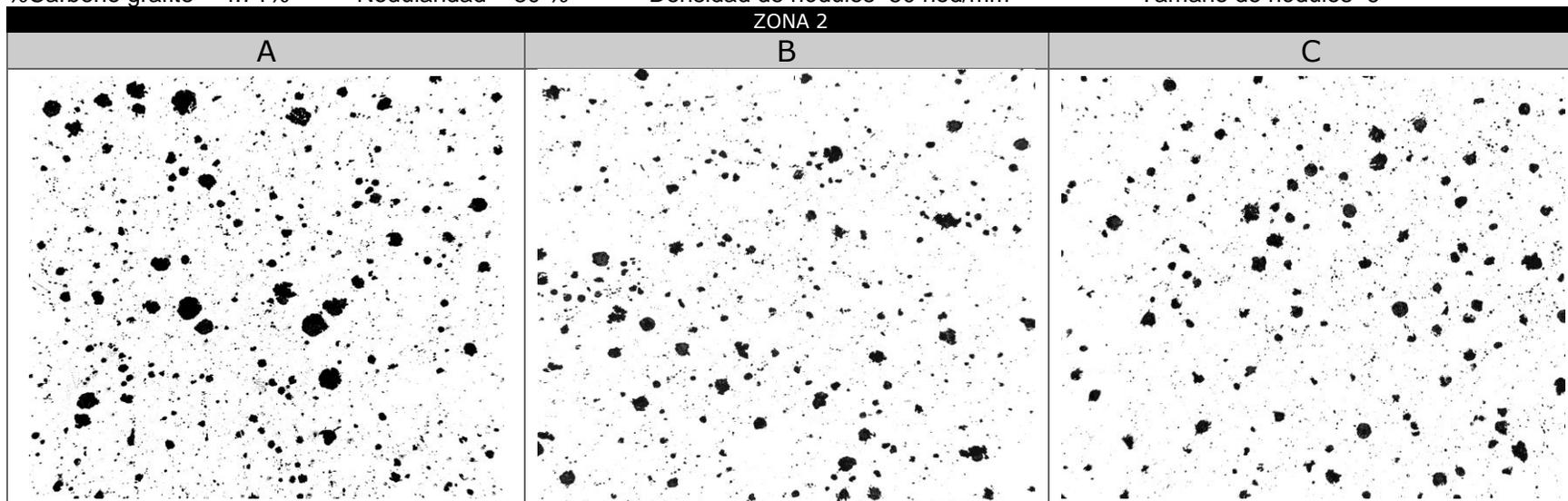


Figura XVIII.- Punta 5 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si caracterización de carbono grafito esferoidal.100X
%Carbono grafito = 5.50 % Nodularidad = 80 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

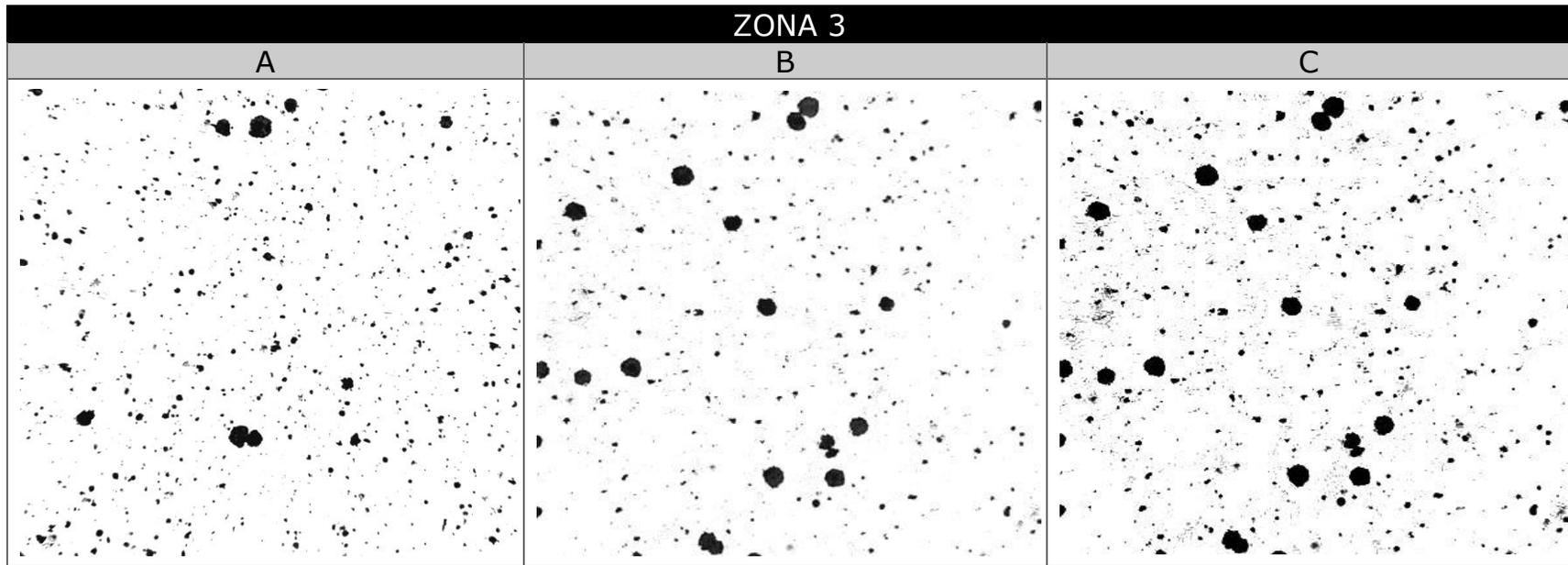


Figura XIX.- Punta 5 zona 3 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 3.30 % Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos=100 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

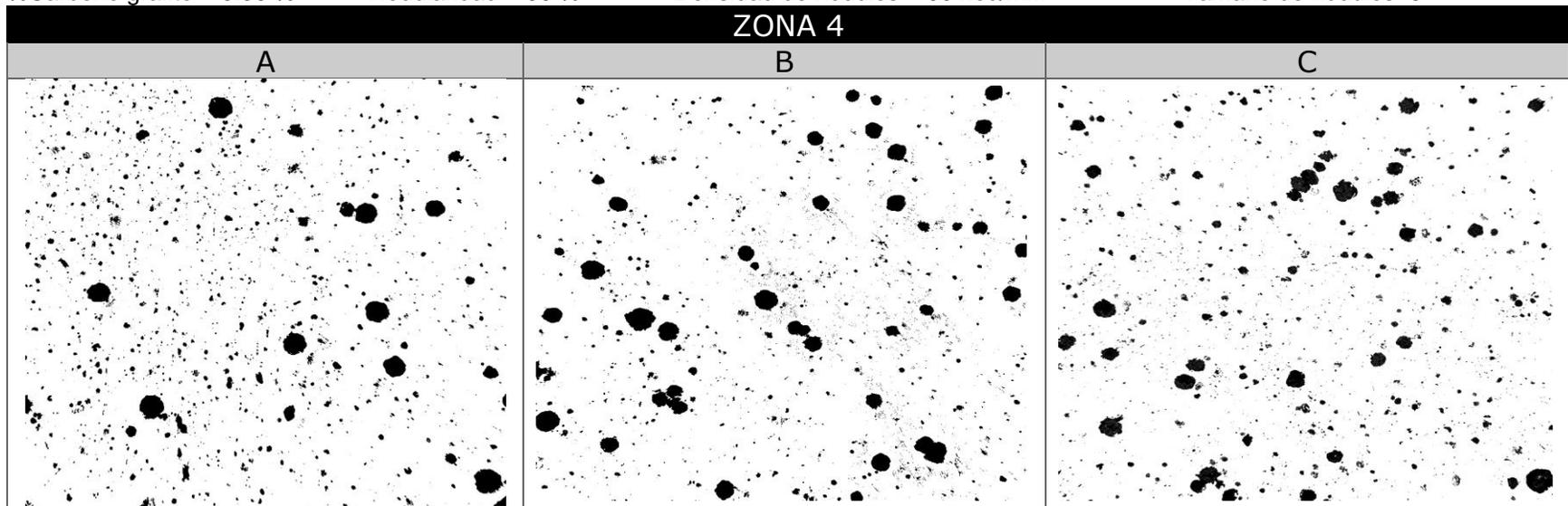


Figura XX.- Punta 5 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 5.04 % Nodularidad =100 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=5



ZONA 1

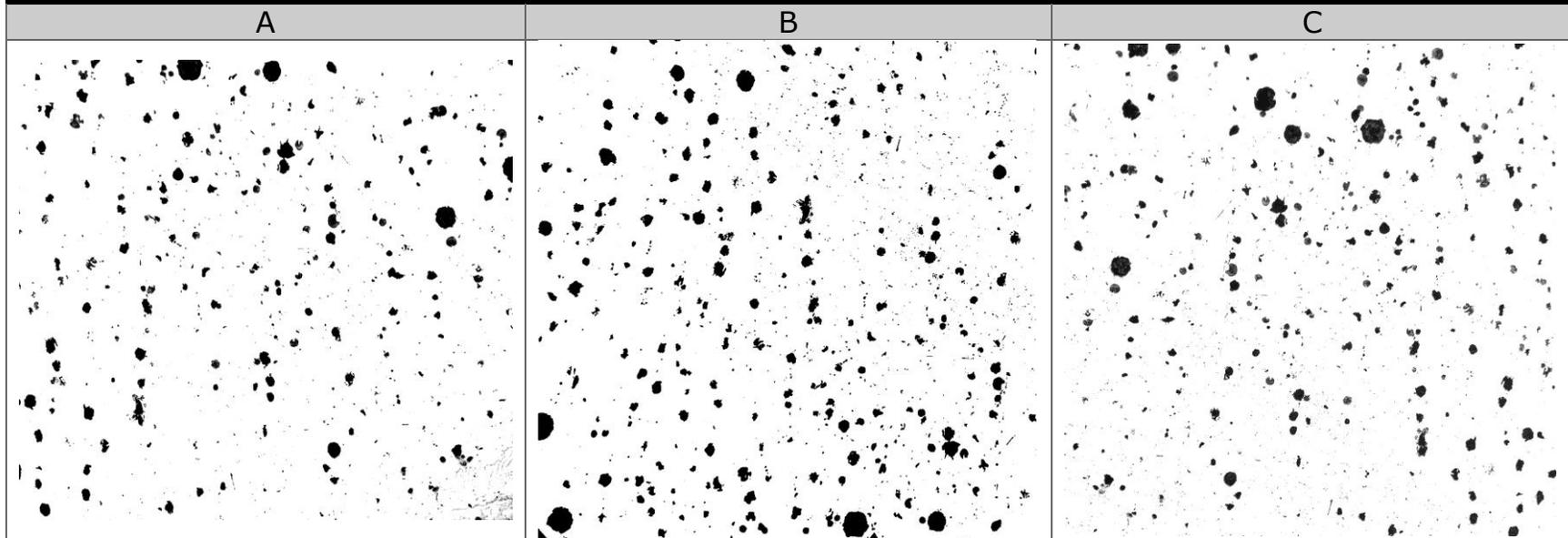


Figura XXI.- Punta 6 zona 1 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 6.04 % Nodularidad = 90% Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

ZONA 2

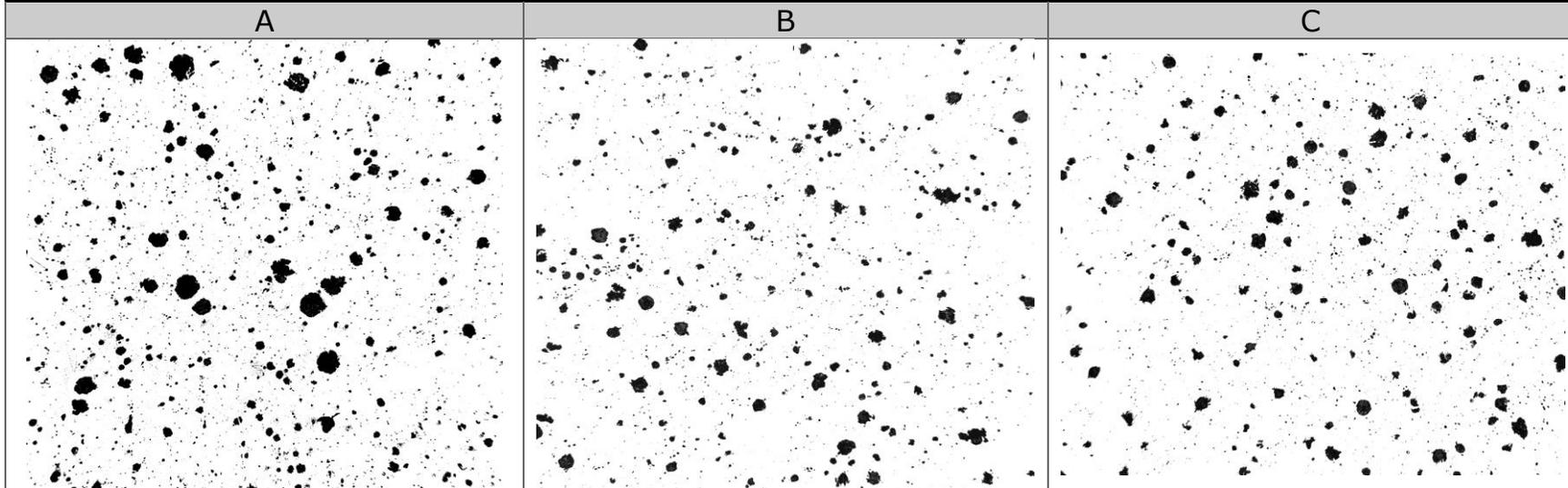


Figura XXII.- Punta 6 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 5.90 % Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

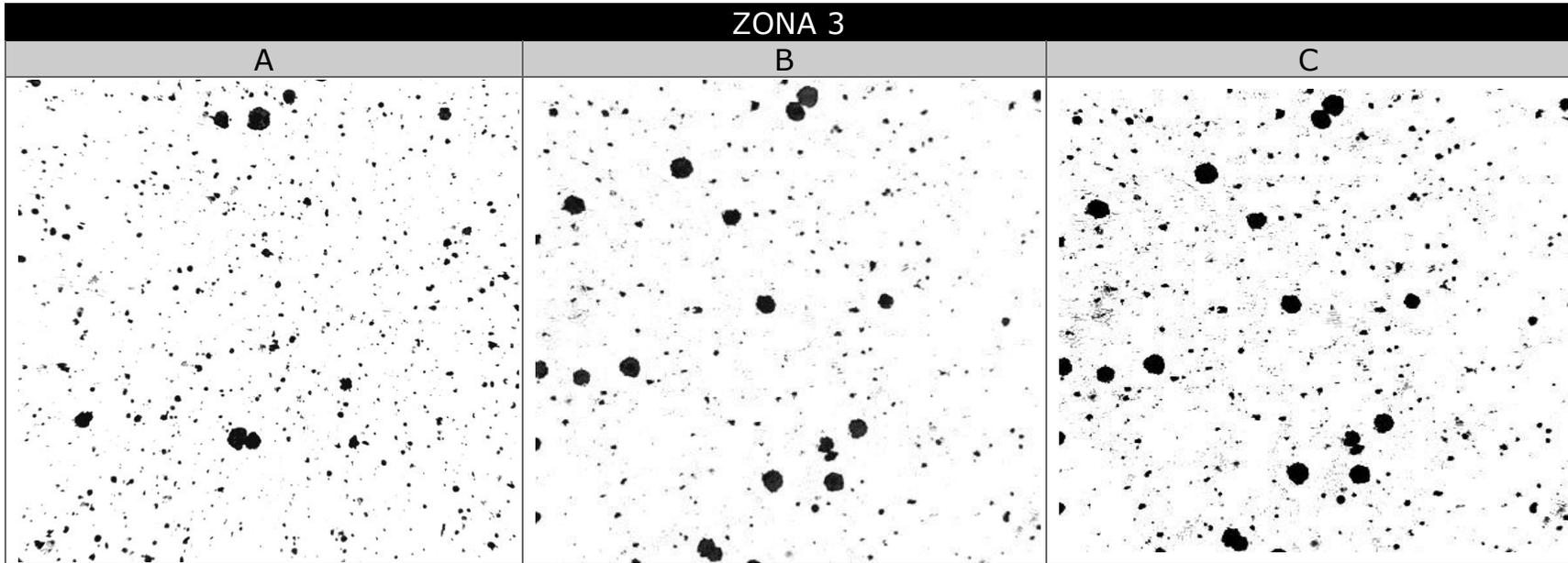


Figura XXIII.- Punta 6 zona 3 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 4.26% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=5

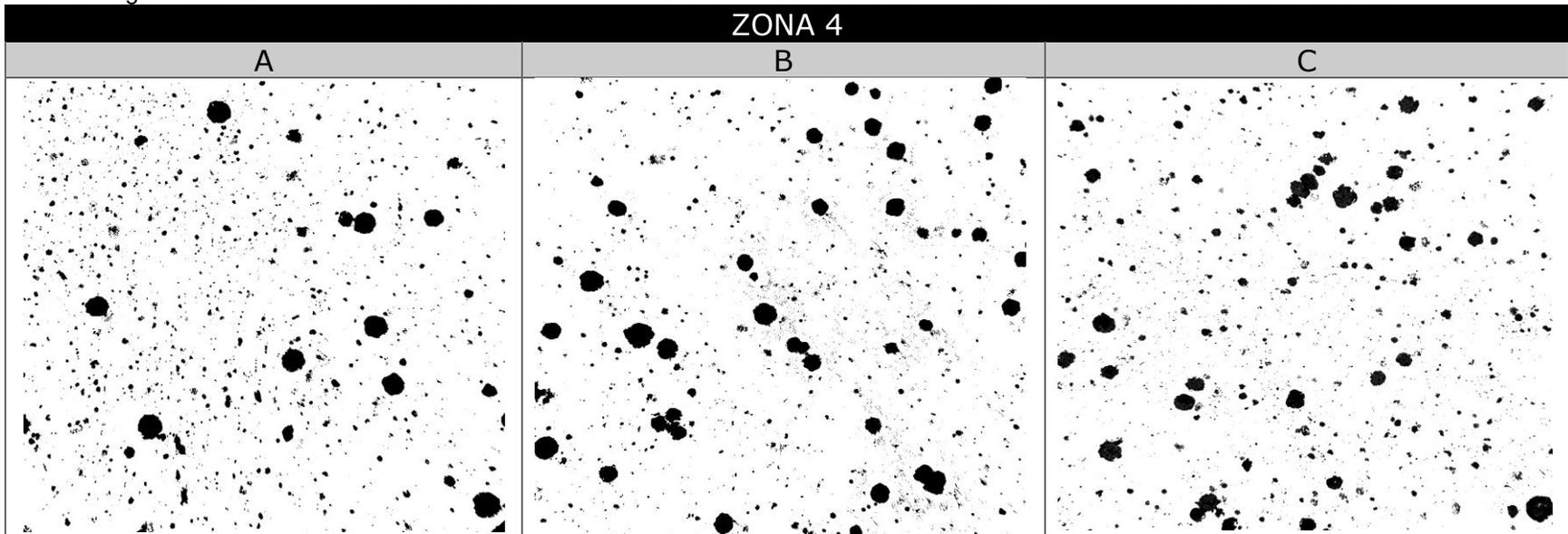


Figura XXIV.- Punta 6 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 3.50 % Nodularidad =100 % Densidad de nódulos=200 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

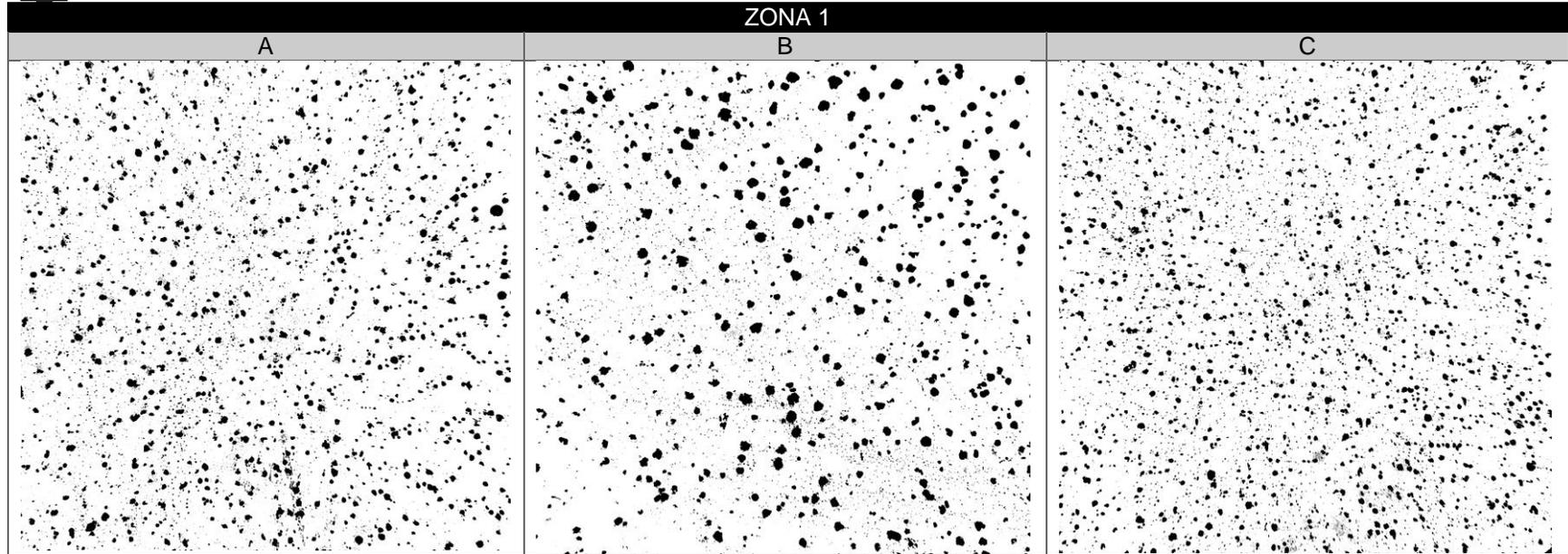


Figura XXV.- Punta 7 zona 1 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 7.46 % Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 200 nod/mm² Tamaño de nódulos=7

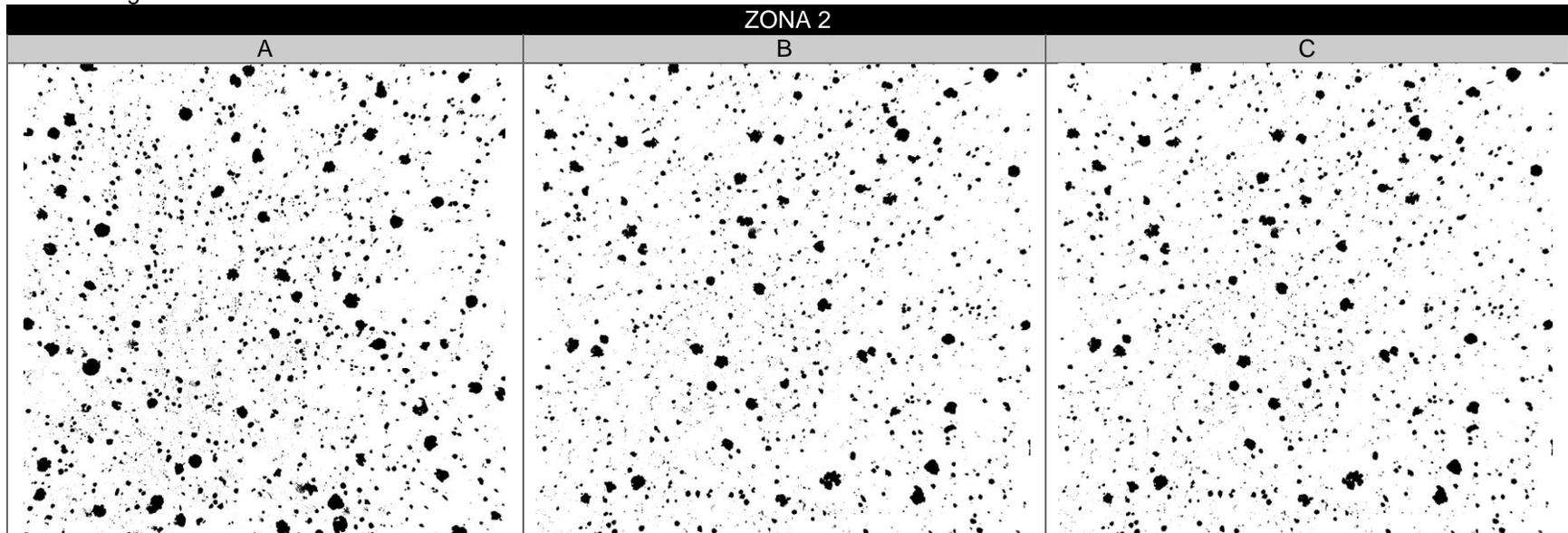


Figura XXVI.- Punta 7 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 5.60% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 100 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

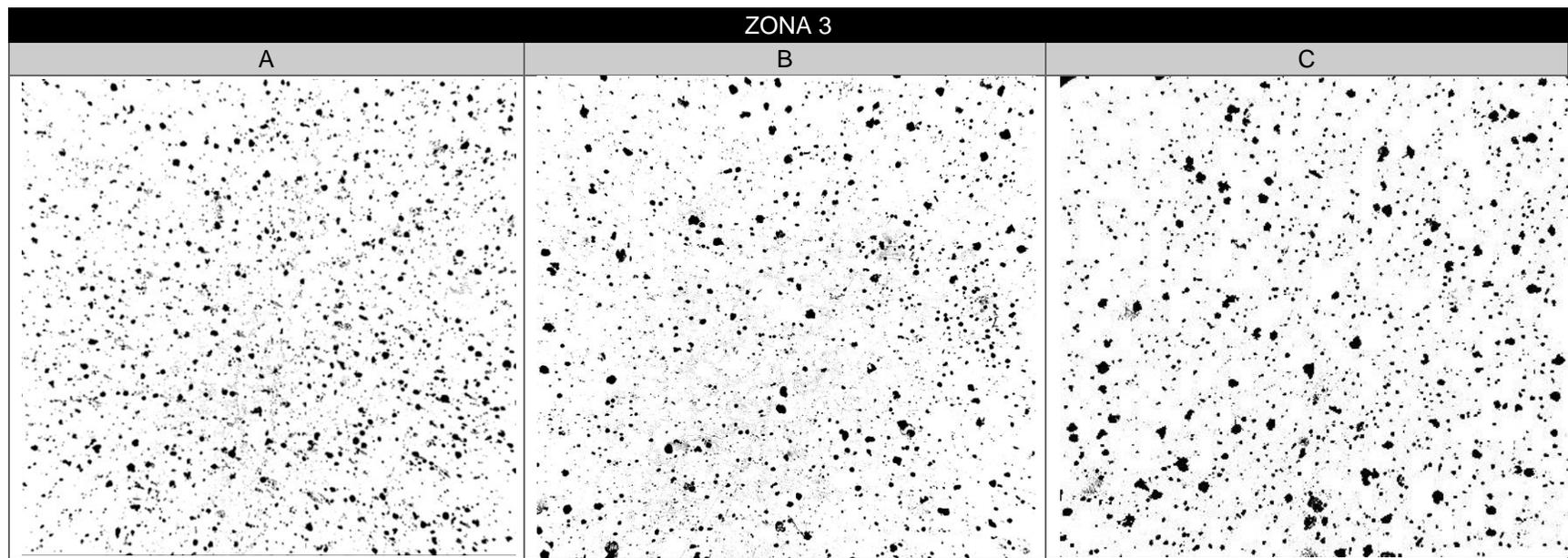


Figura XXVII.- Punta 7 zona 3 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =4.85% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 200 nod/mm² Tamaño de nódulos= 6

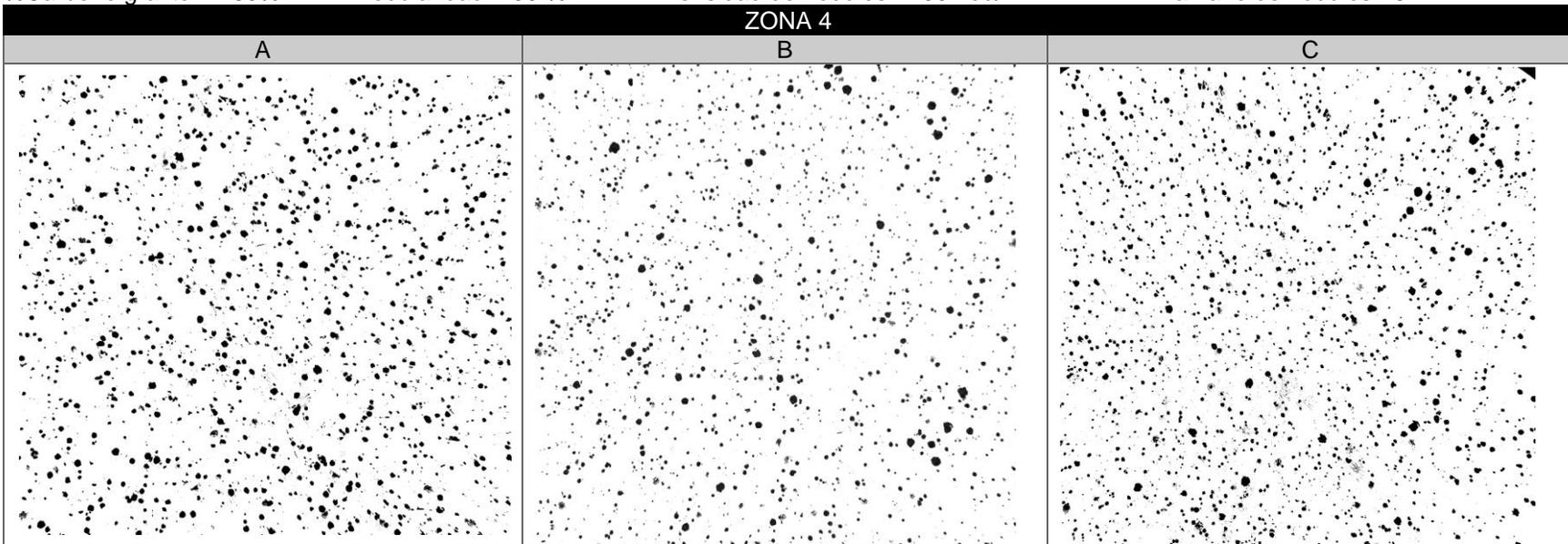


Figura XXVIII.- Punta 7 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 8.57% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 250 nod/mm² Tamaño de nódulos= 7

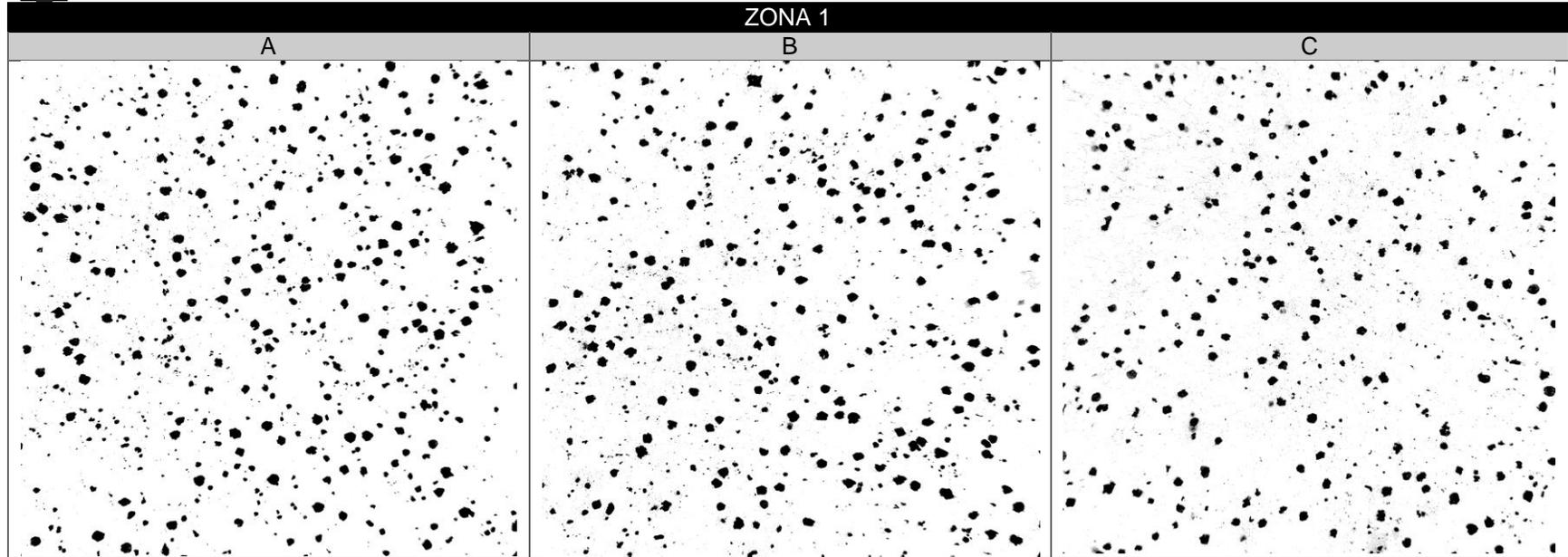


Figura XXIX.- Punta 8 zona 1 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
%Carbono grafito = 6.02% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

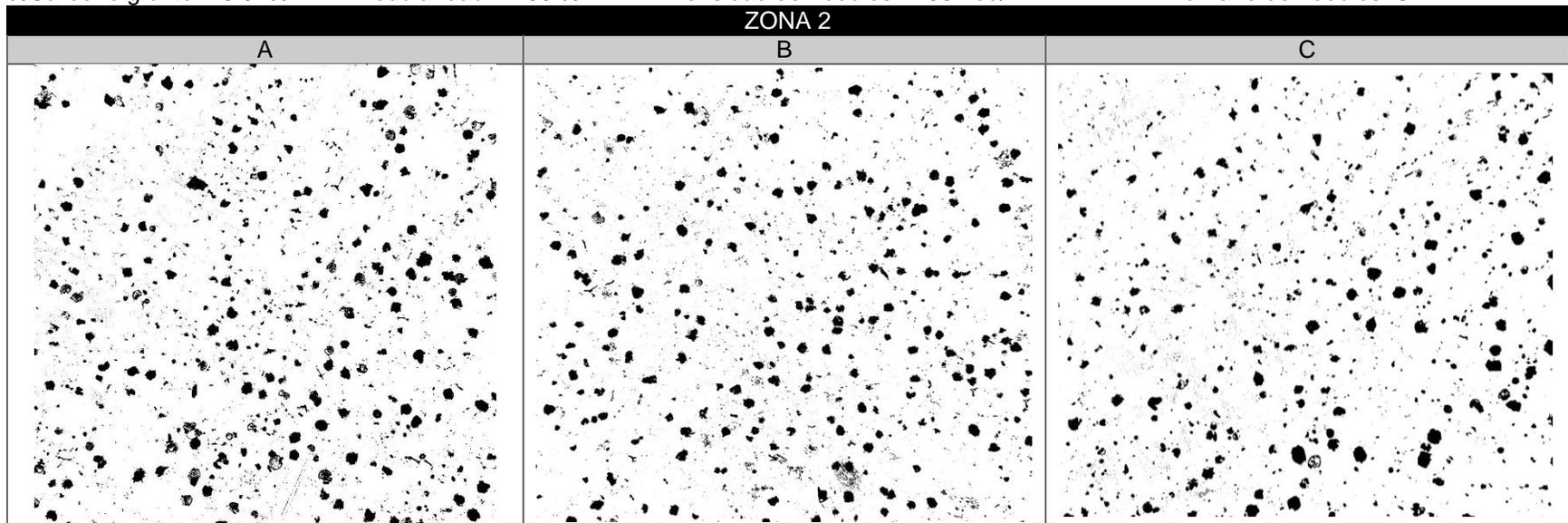


Figura XXX.- Punta 8 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
Carbono grafito = 6.72% Nodularidad = 100 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos=6

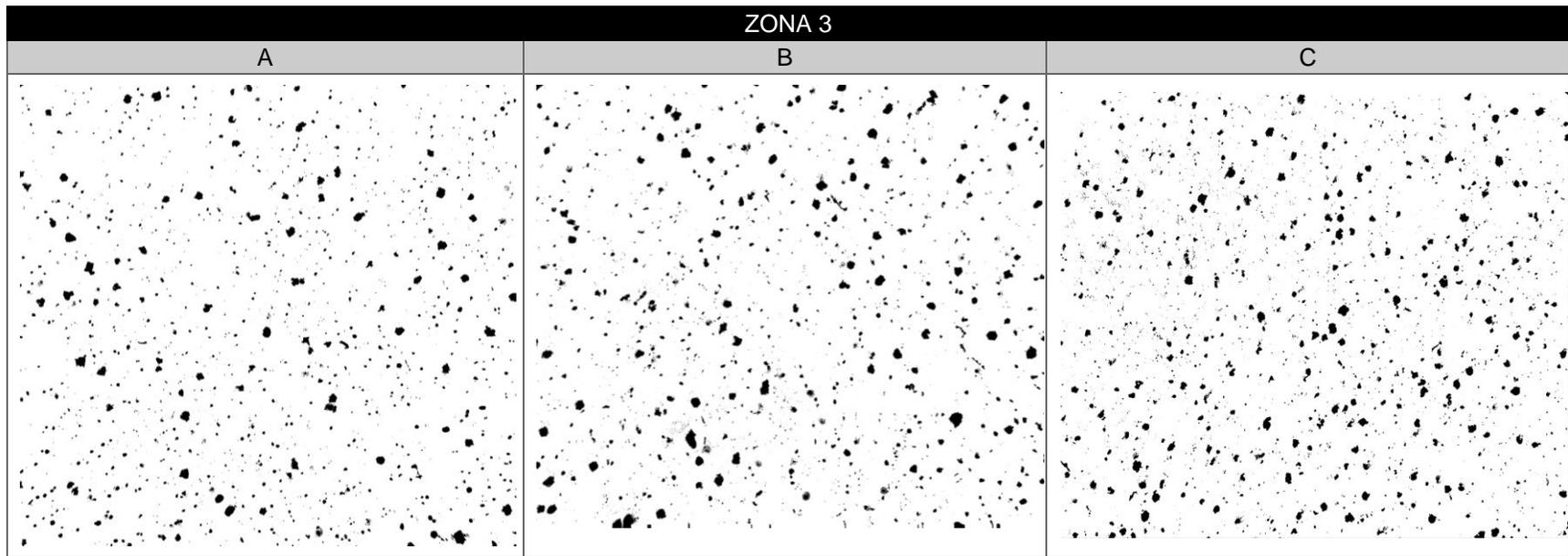


Figura XXXI.- Punta 8 zona 3 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito =3.52% Nodularidad = 90 % Densidad de nódulos= 150 nod/mm² Tamaño de nódulos= 6

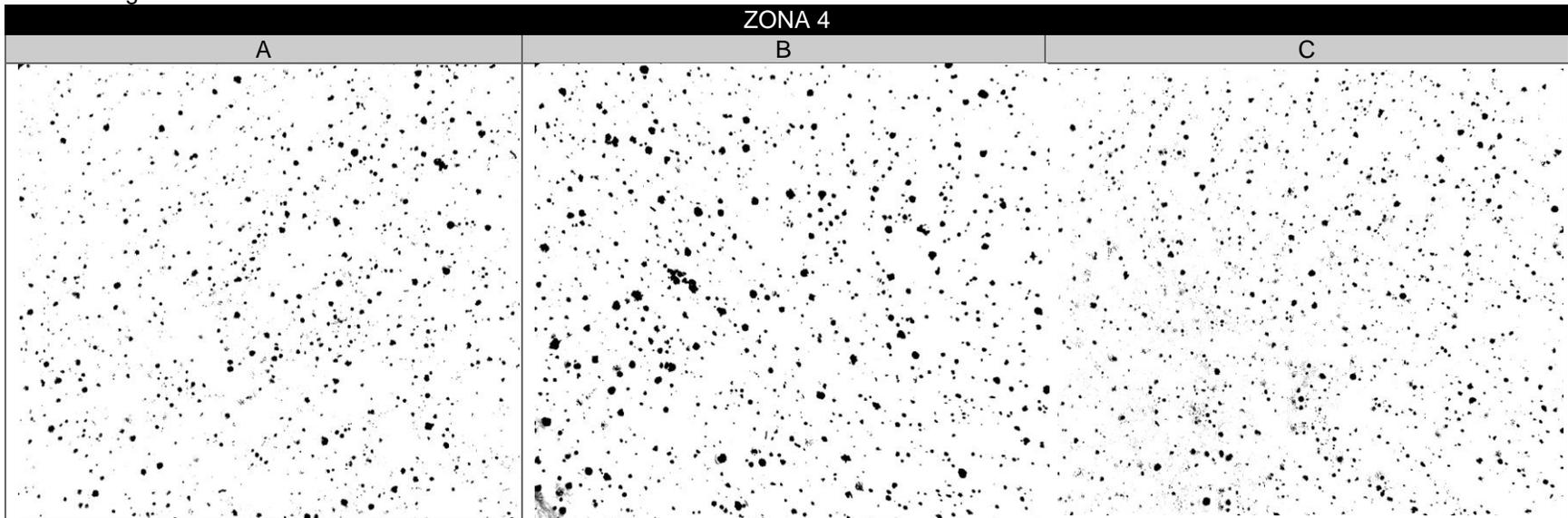


Tabla XXXII.- Punta 8 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si caracterización de carbono grafito esferoidal. 100X
 %Carbono grafito = 3.36% Nodularidad = 100 Densidad de nódulos= 150 Tamaño de nódulos=7

Anexo B

Contabilización de Carburos

En este anexo se muestran las imágenes metalográficas de carburos obtenidas, a continuación se hace una breve descripción de la morfología que presentan.

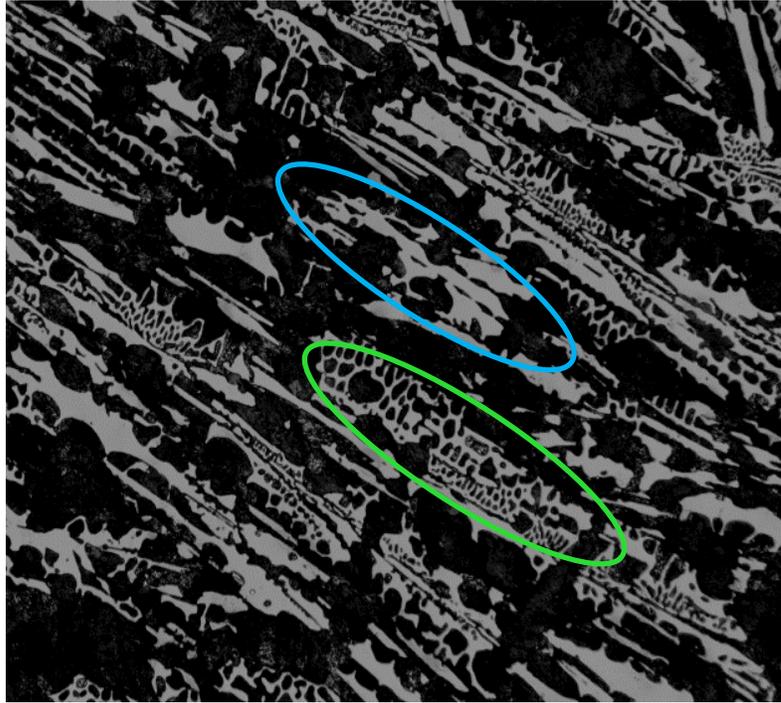


Figura 4.4 Metalografía oscurecida para el revelado de carburos, carburos ledeburíticos (elipse verde) y carburos libres (elipse azul) en una punta con 1.5 % Cr, 0.5 % V y post-inoculación 0.12 % base Si.

Como se ilustra en la Figura 4.4, la morfología es muy característica dependiendo del carburo formado ya que en base a ella se puede apreciar la presencia de cada uno de ellos, el carburo libre se identifica por su forma de placa mientras que el carburo ledeburítico presenta la morfología característica de la pseudoleburita: perlita libre en un fondo blanco de cementita (Fe_3C). Esta descripción es propia de cada una sin embargo el porcentaje de cada carburo será único en cada zona.

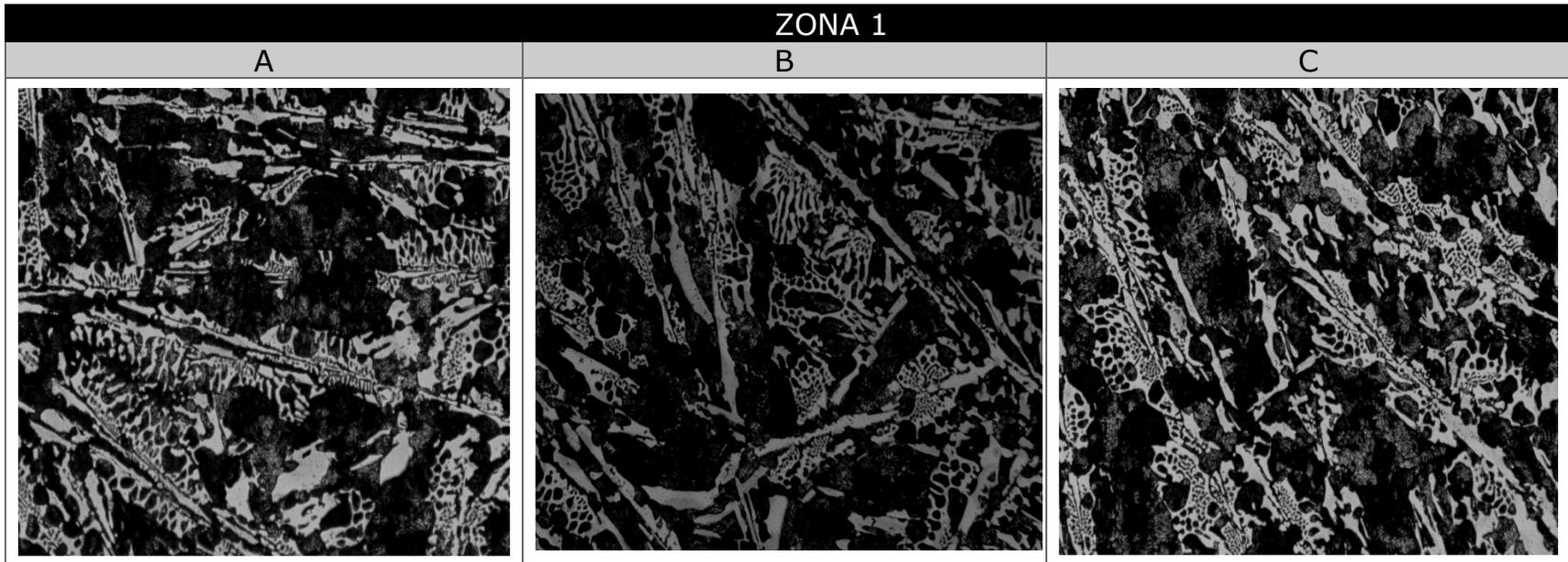


Figura I-B.- Punta 1 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas. 100X
%Carburos =27.28

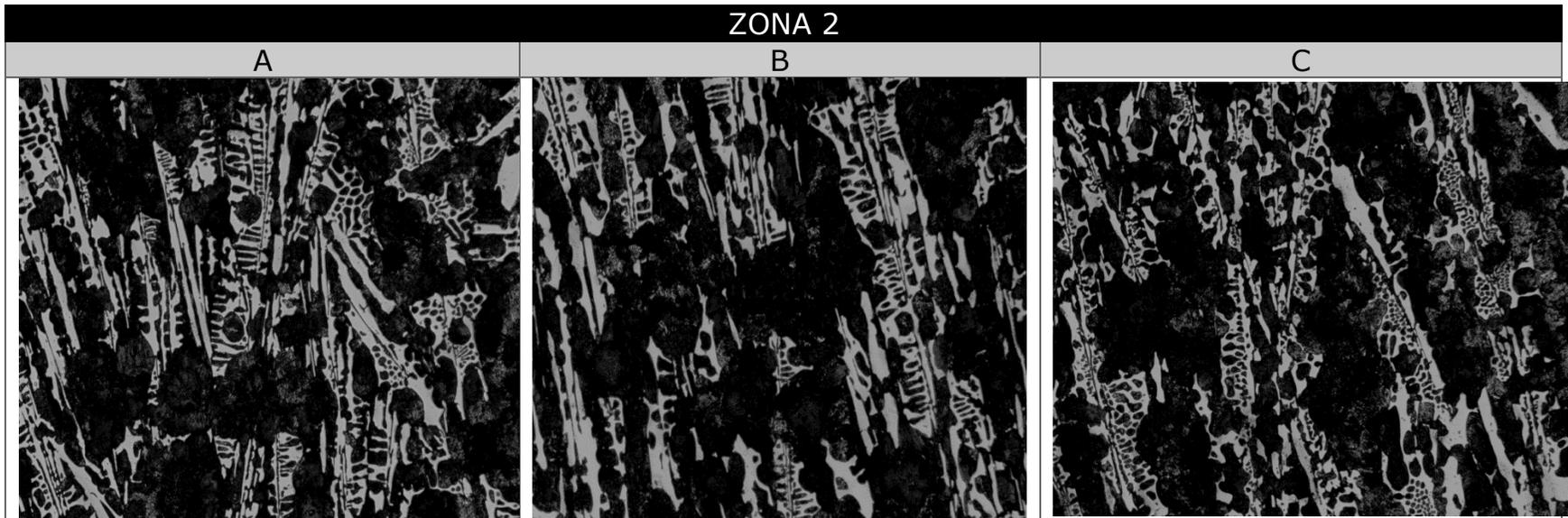


Figura II-B.- Punta 1 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas. 100X
%Carburos=28.25



ZONA 3

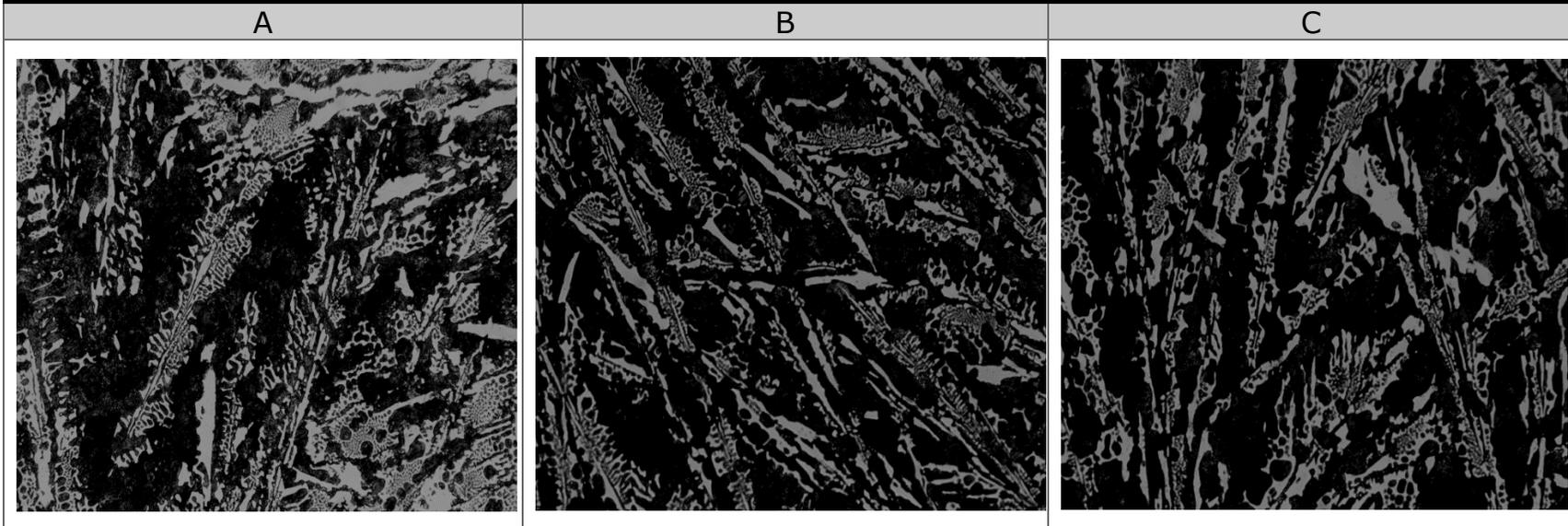


Figura III-B.- Punta 1 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas.100X
%Carburos = 27.34

ZONA 4

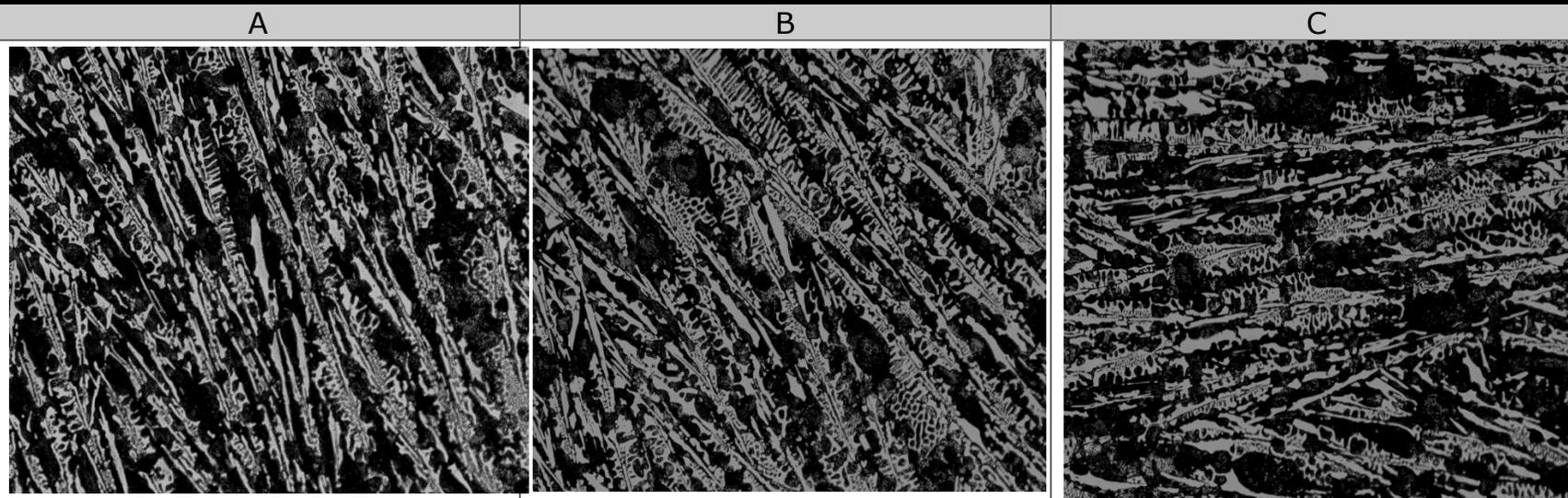


Figura IV-B.- Punta 1 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas. 100X
%Carburos = 32.77

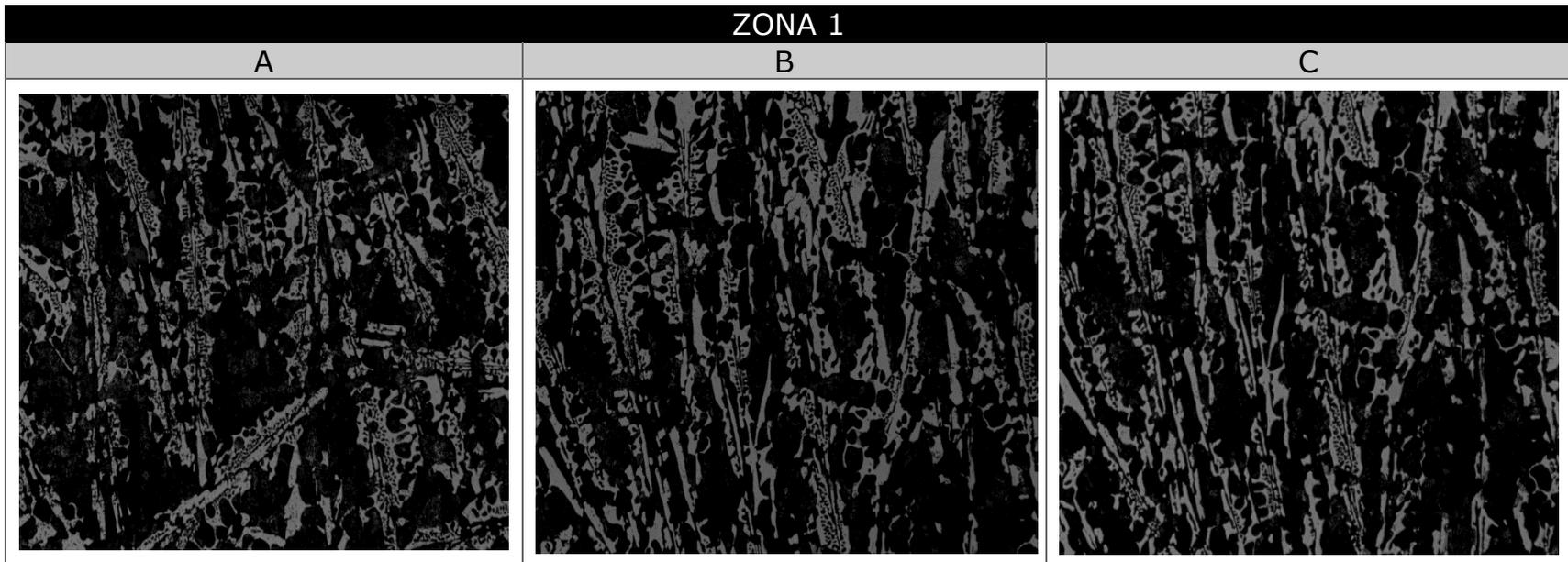


Figura V-B.- Punta 2 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X %Carburos = 31.66

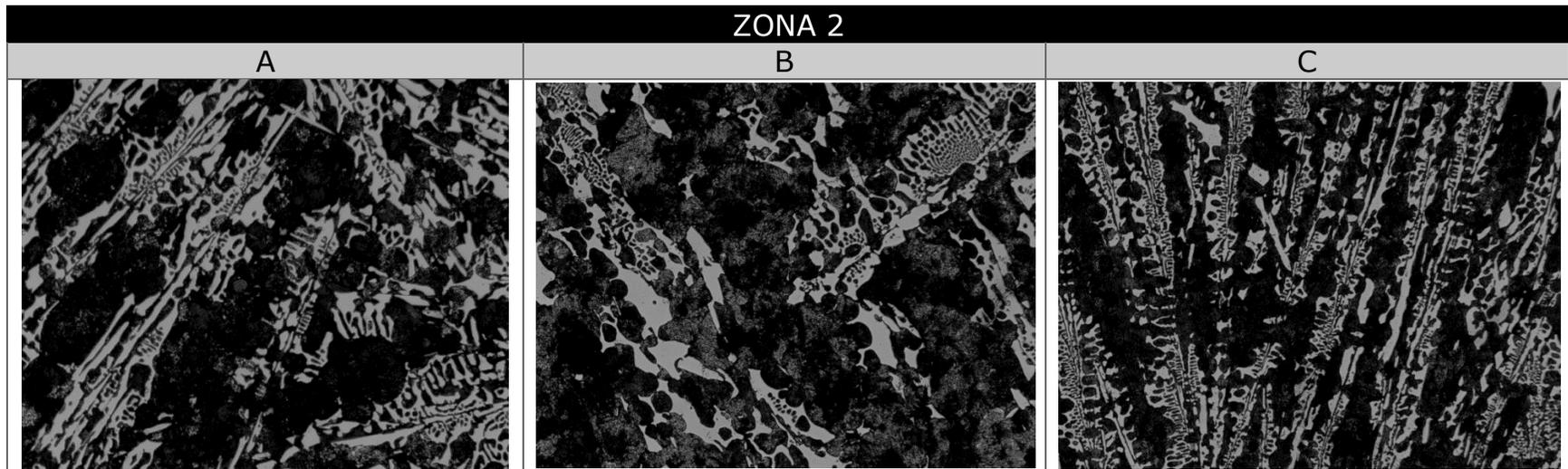


Figura VI-B.- Punta 2 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X %Carburos = 27.72

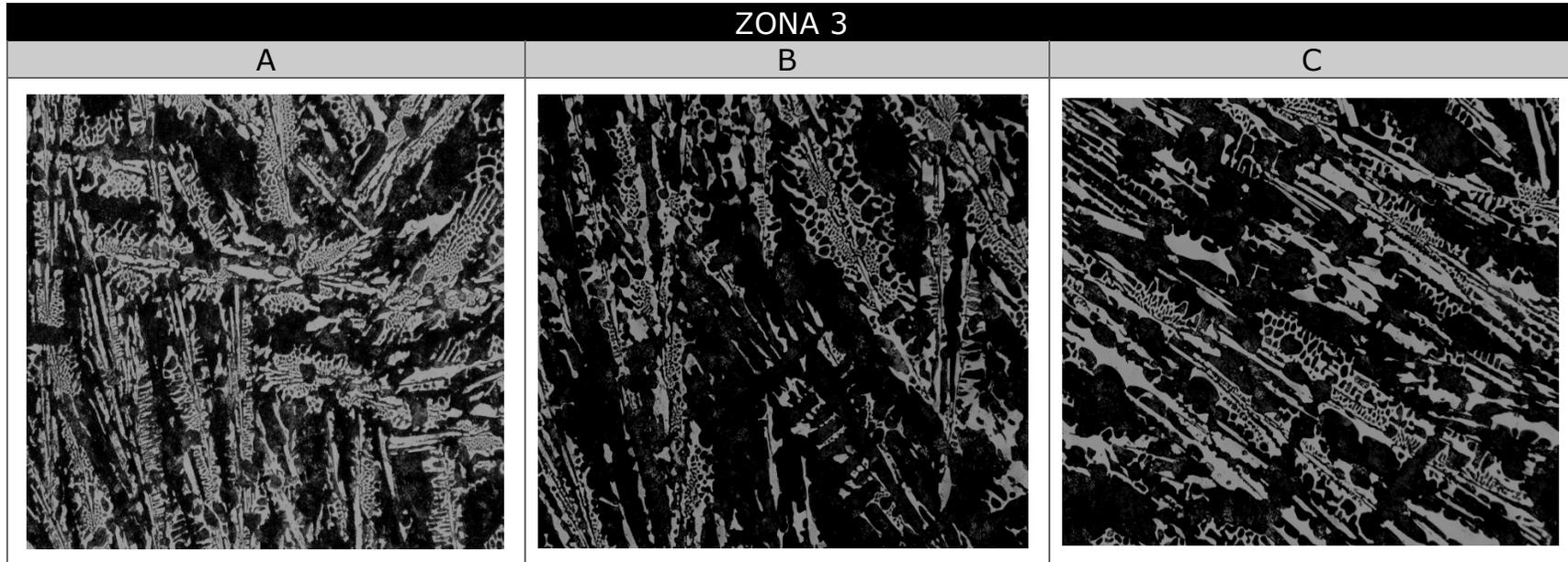


Figura VII-B.- Punta 2 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 26.19

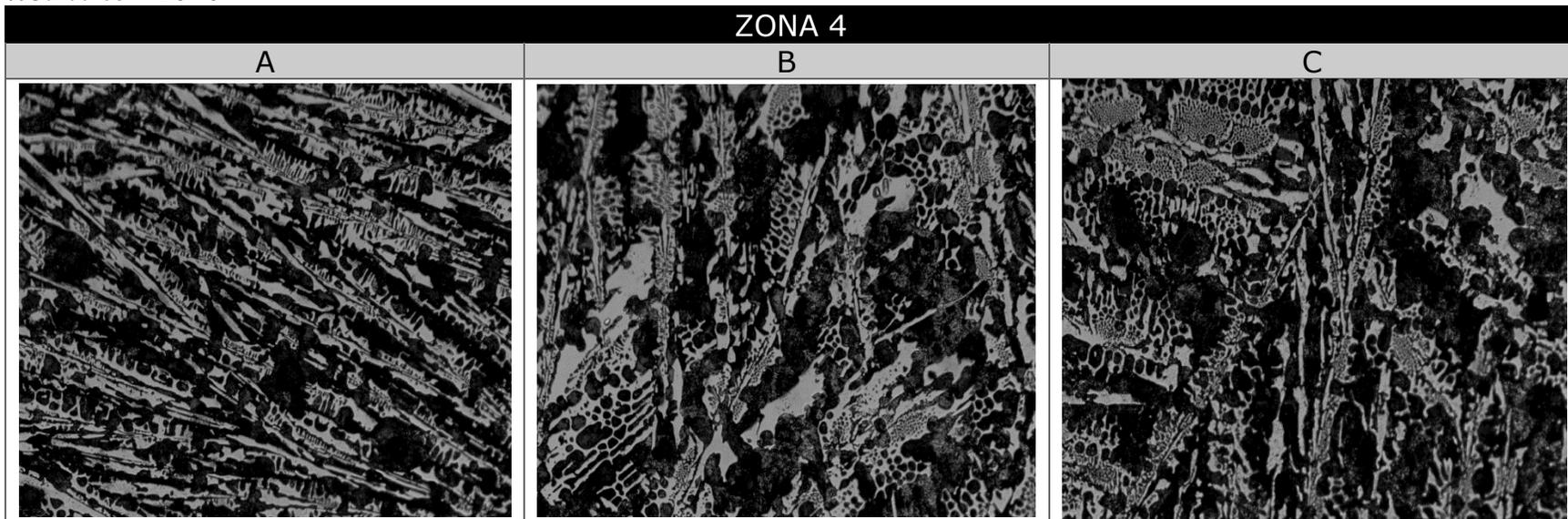


Figura VIII-B.- Punta 2 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 28.36

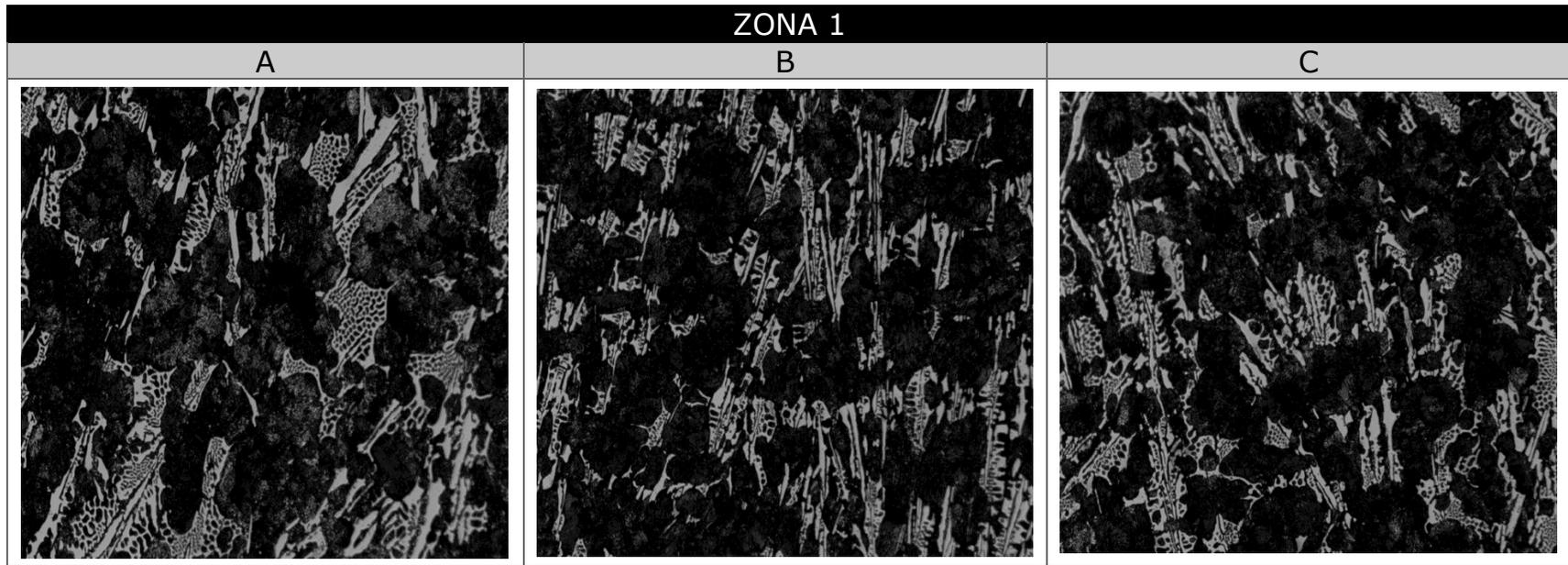


Figura IX-B.- Punta 3 zona 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X %Carburos = 28.82

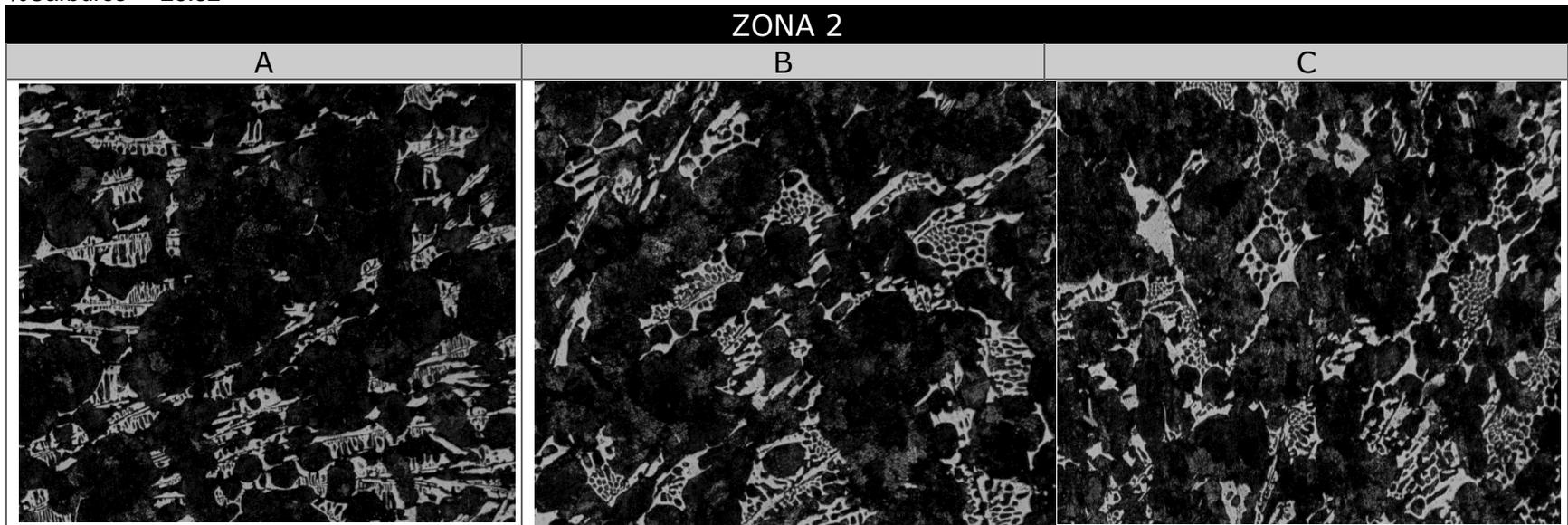


Figura X-B.- Punta 3 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25% base Si. Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X %Carburos = 27.47



ZONA 3

A

B

C

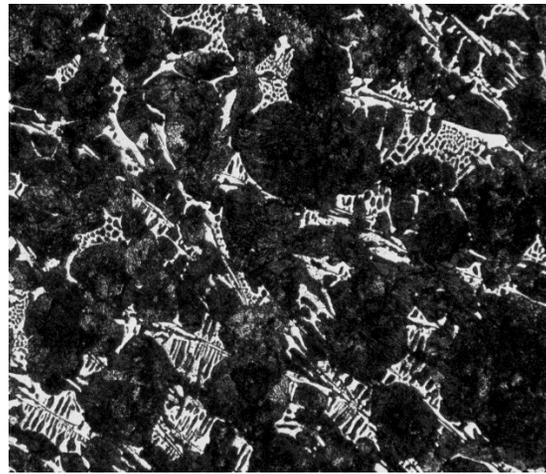


Figura XI-B.- Punta 3 zona 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25% base Si. Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 27.15

ZONA 4

A

B

C

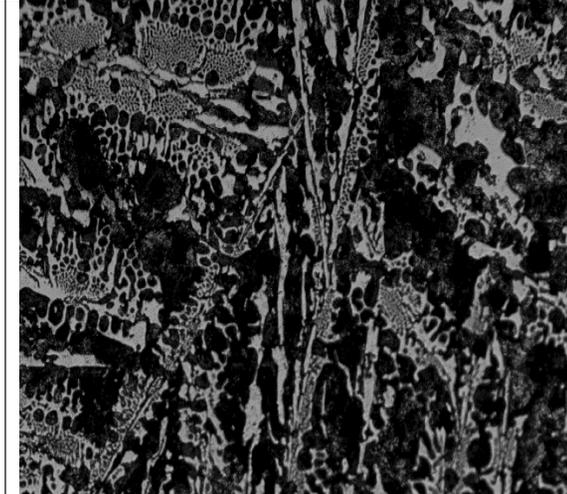
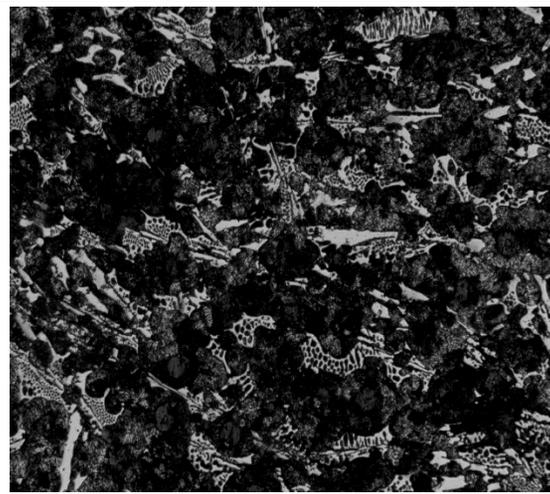
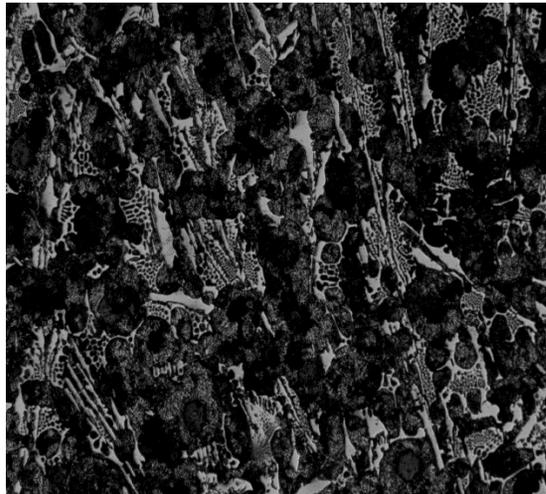


Figura XII-B.- Punta 3 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 28.49

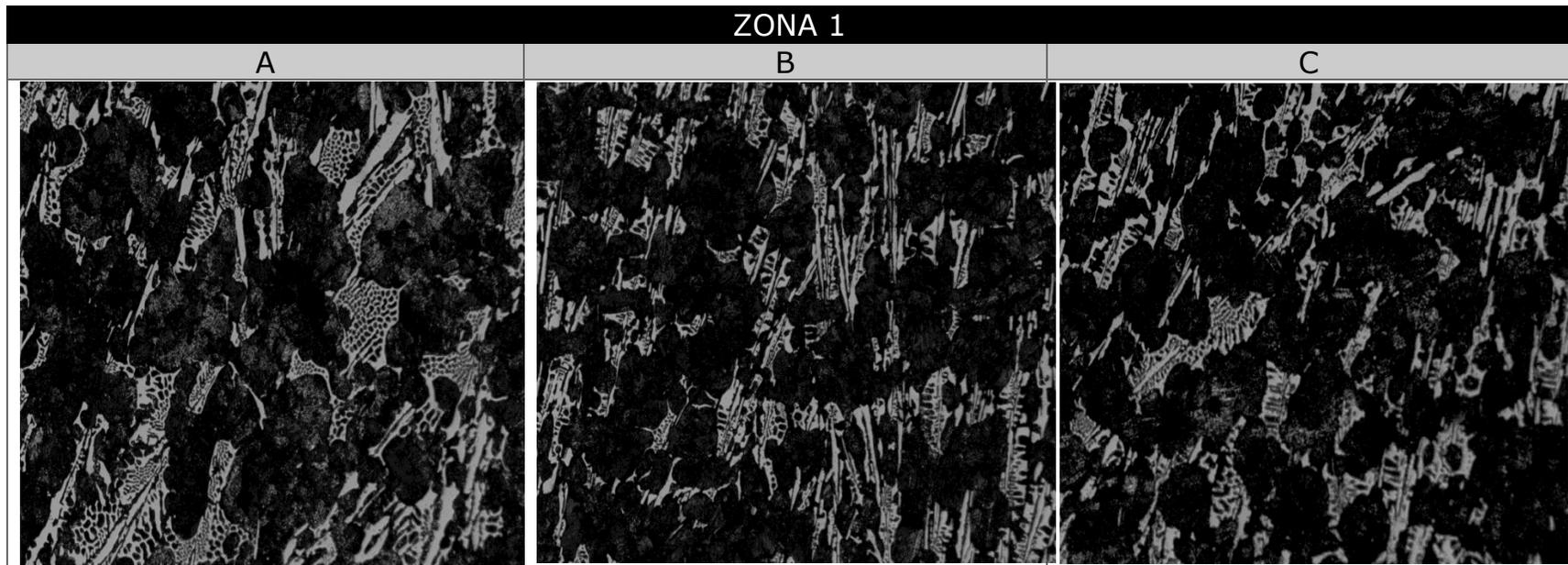


Figura XIII-B.- Punta 4 zona 1 con 1.5% Cr 0.4%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 34.87

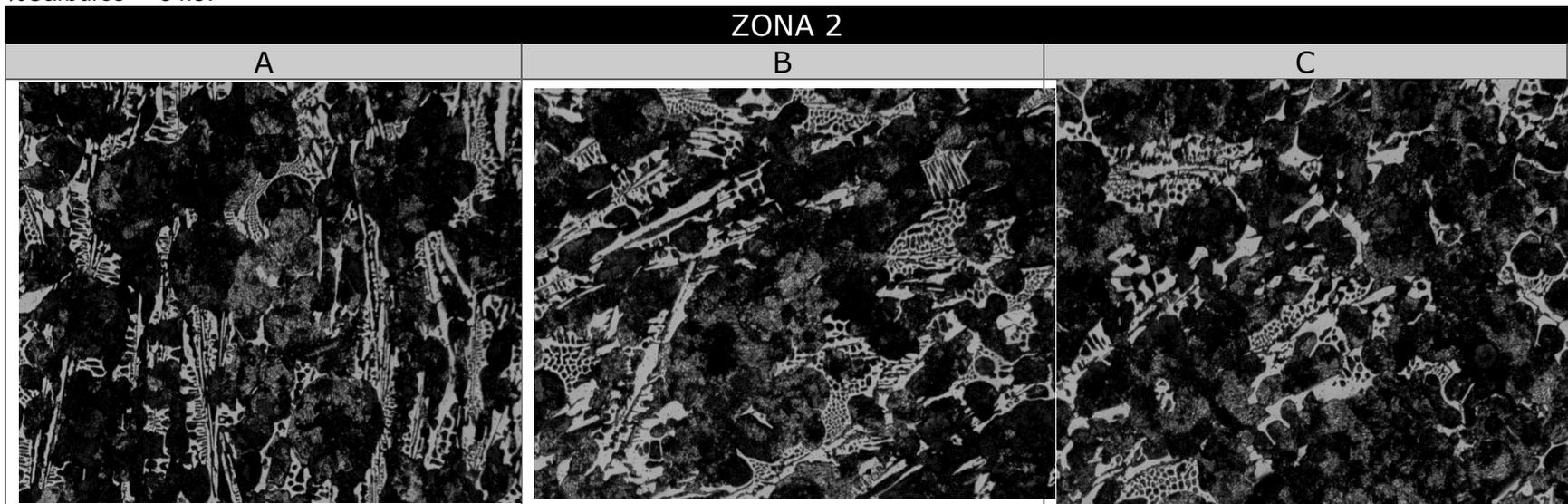


Figura XIV.- Punta 4 zona 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 27

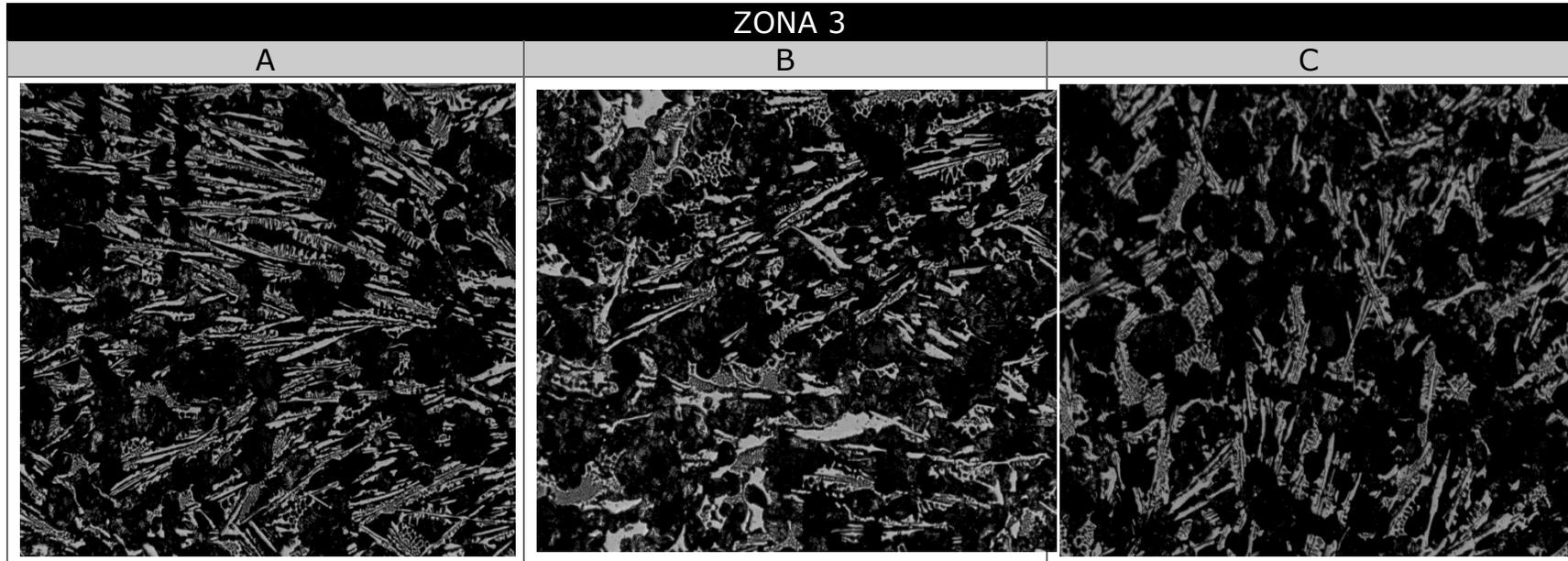


Figura XV-B.- Punta 4 zona 3 con 1.5% Cr 0.4%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 18.07

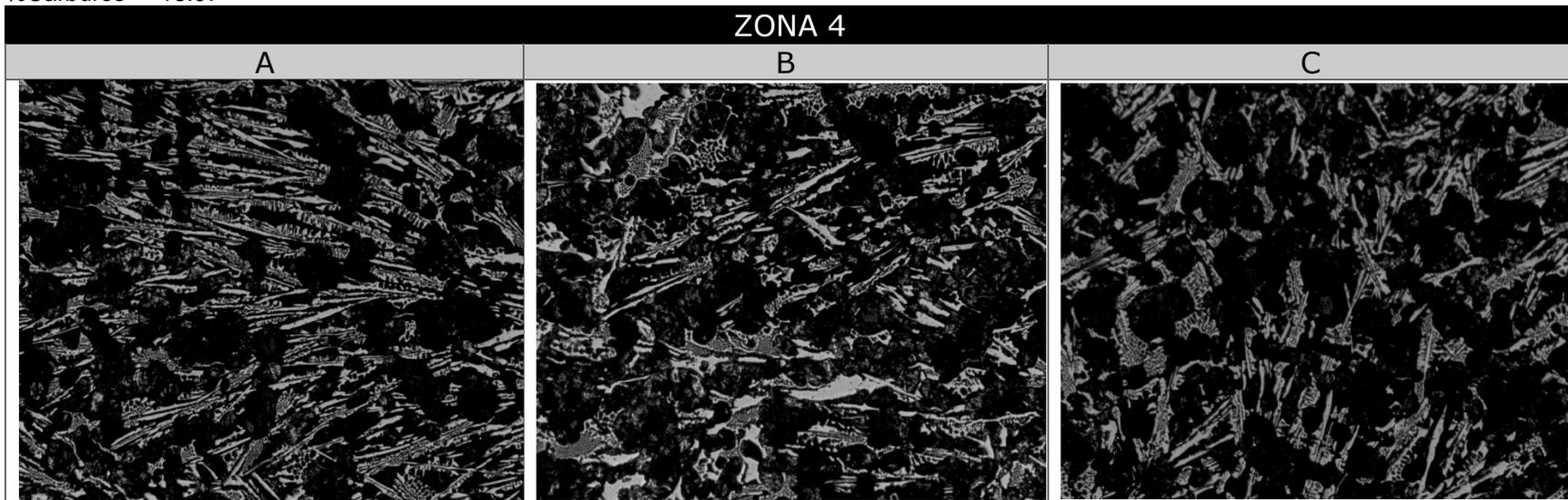


Figura XVI.- Punta 4 zona 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 29.47

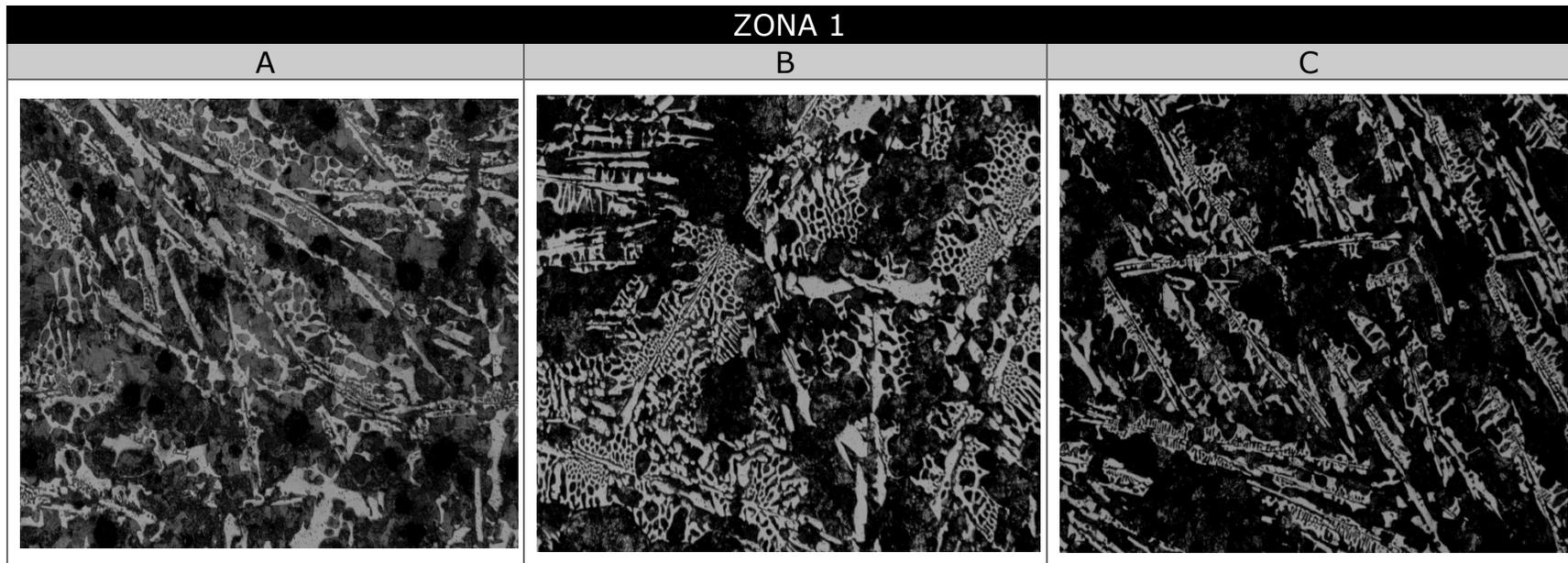


Figura XVII-B.- Punta 5 zona 1 con 2.0% Cr 0.4%V Inoculación 0.03% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 38.69

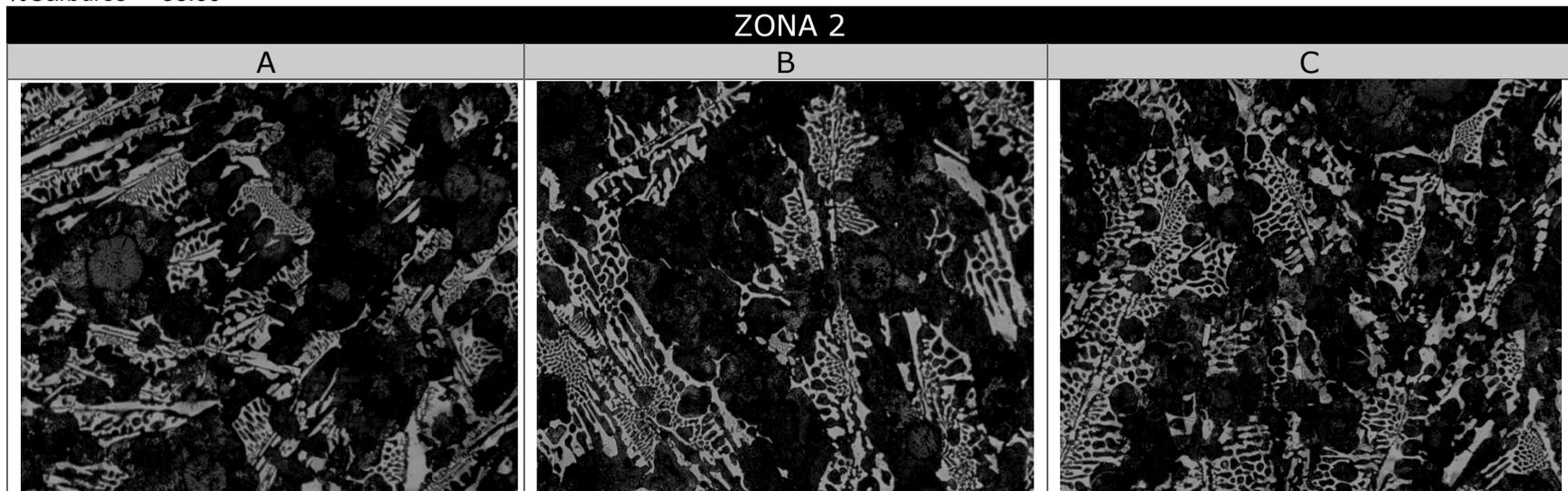


Figura XVIII-B.- Punta 5 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 34.92

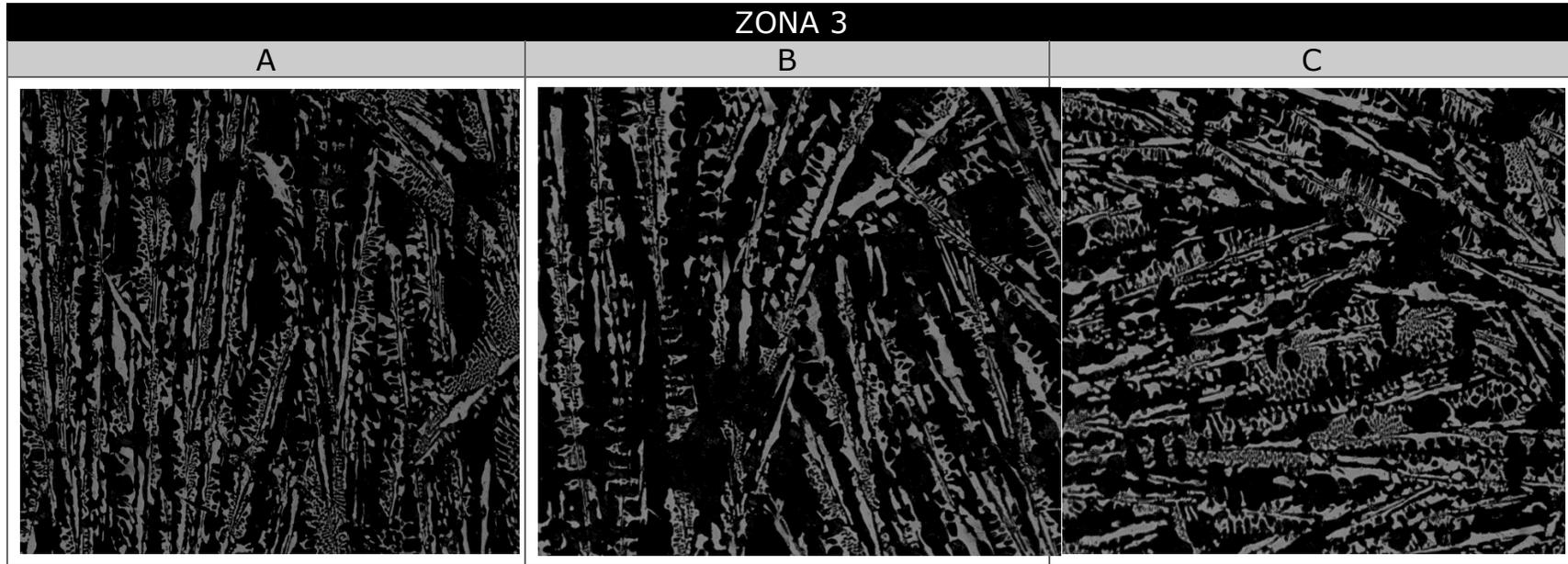


Figura XIX.- Punta 5 zona 3 con 2.0% Cr 0.4%V Inoculación 0.03% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 25.25

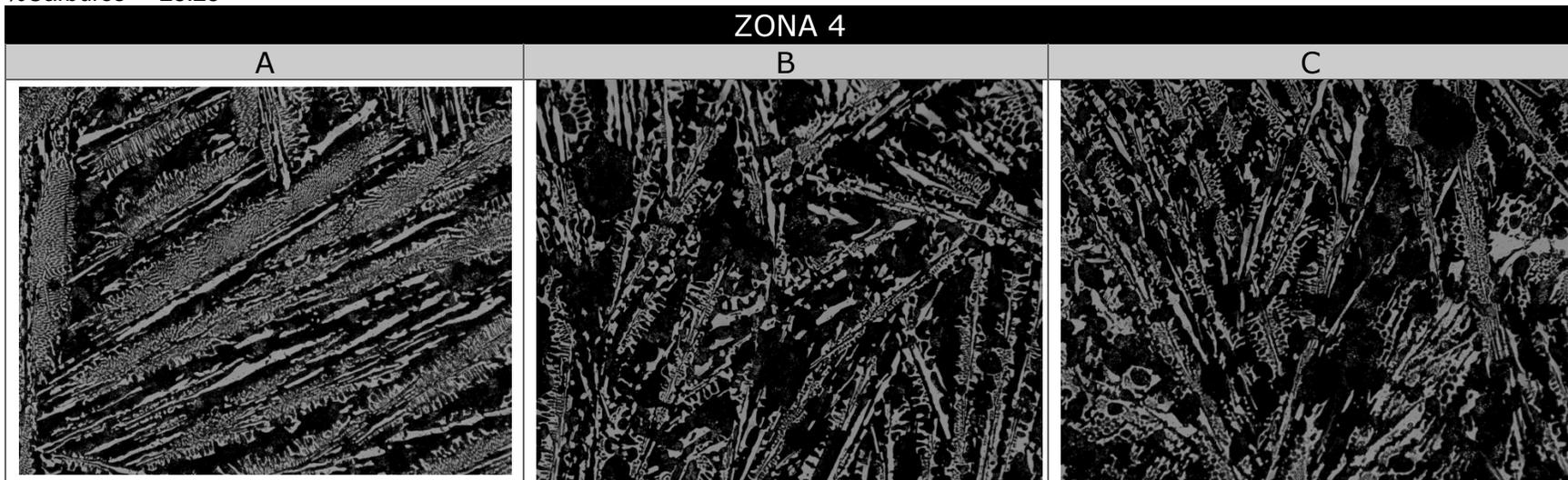


Figura XX.- Punta 5 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 27.09

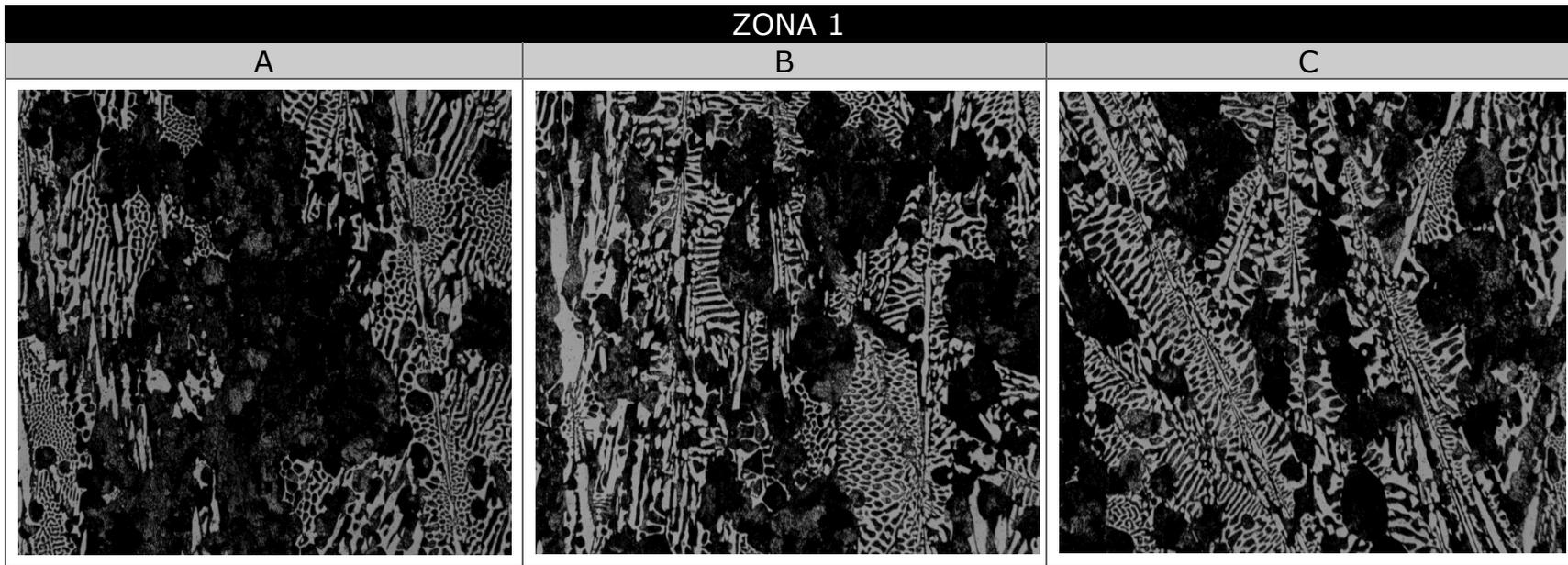


Figura XXI-B.- Punta 6 zona 1 con 2.0% Cr 0.4%V Inoculación 0.12% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 38.35

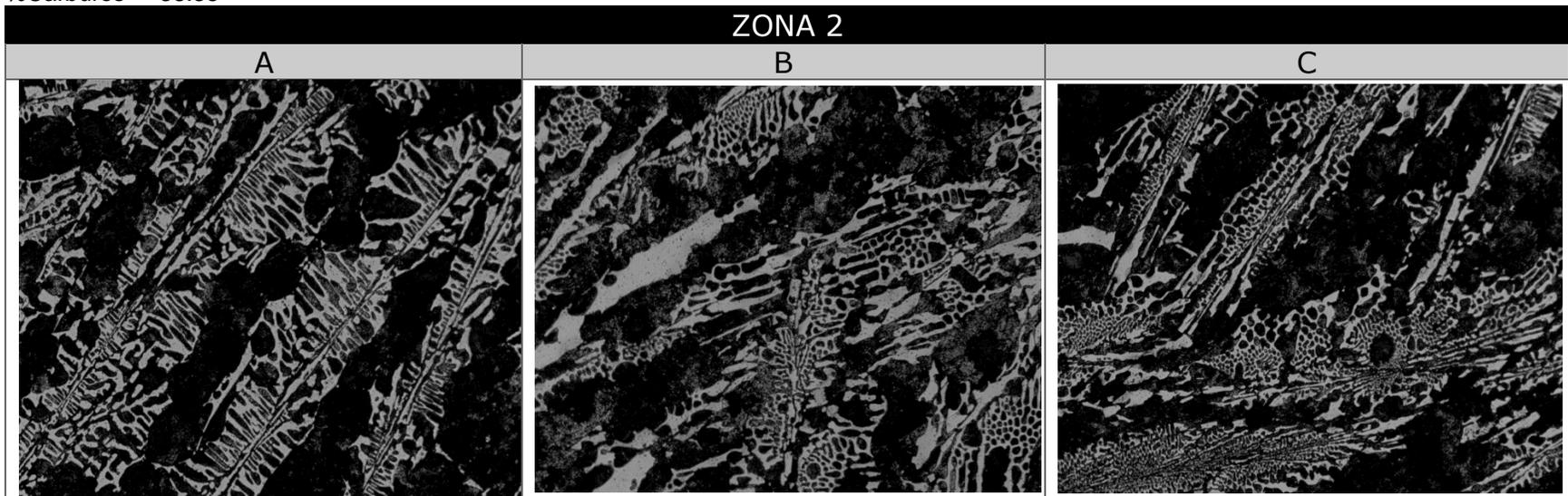


Figura XXII.- Punta 6 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 38

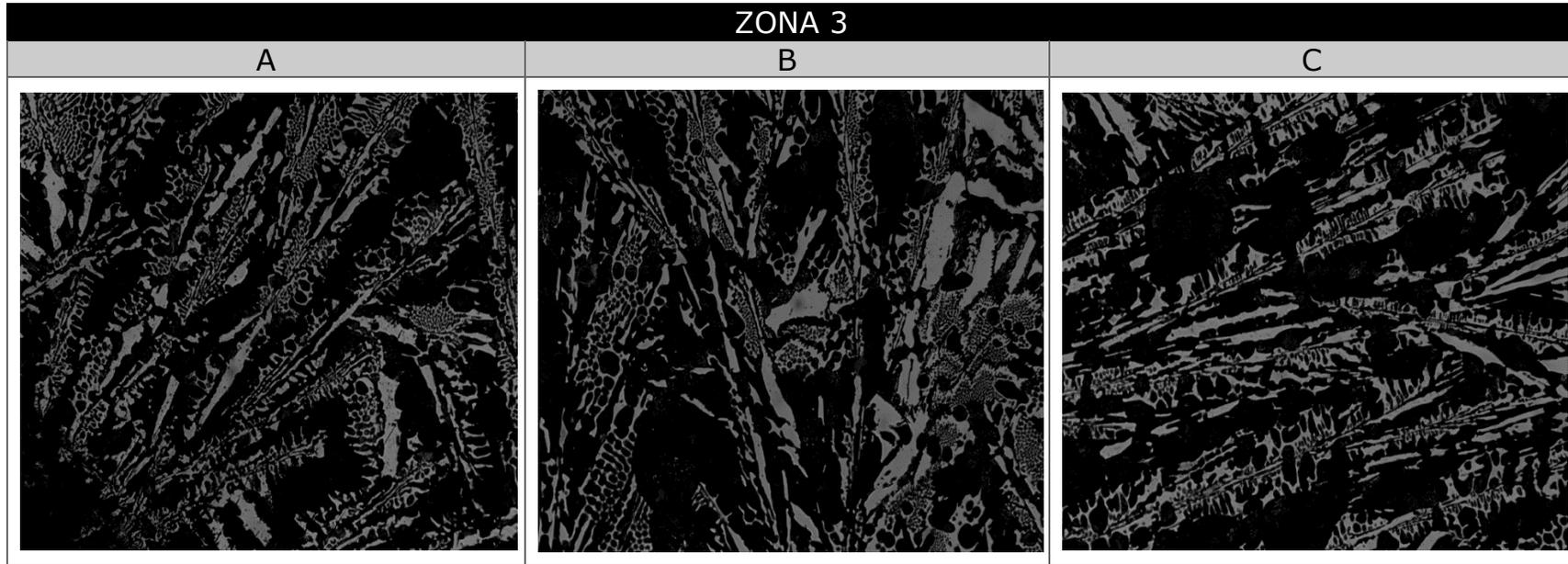


Figura XXIII-B.- Punta 6 zona 3 con 1.5% Cr 0.4%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 27.45

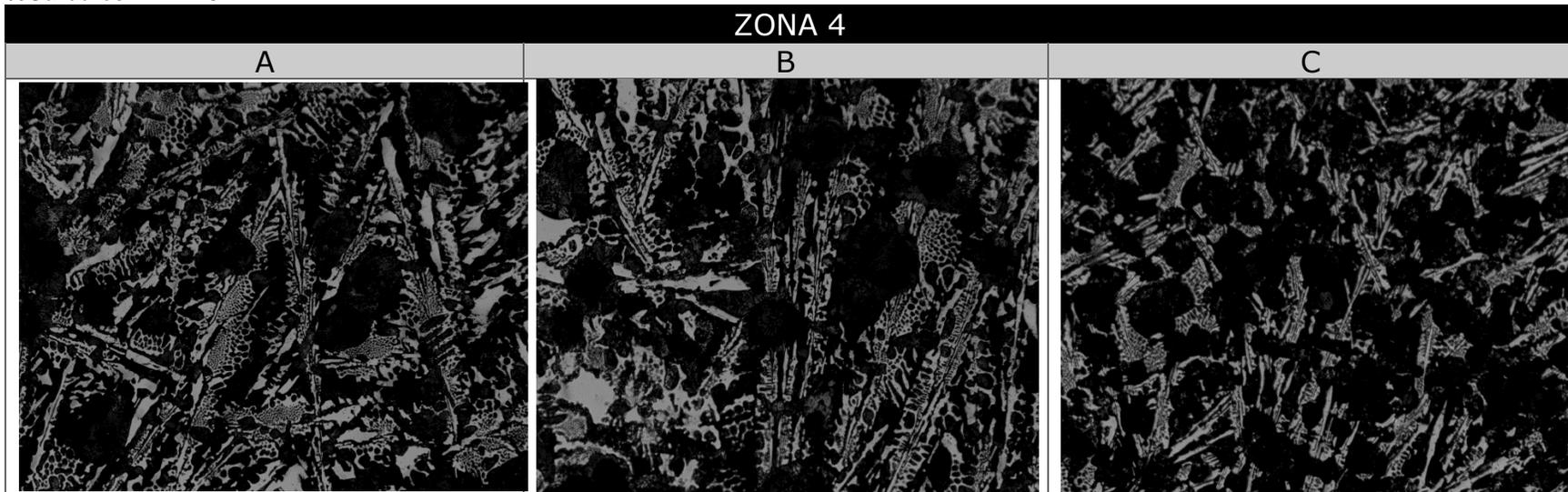


Figura XXIV.- Punta 6 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 33.12

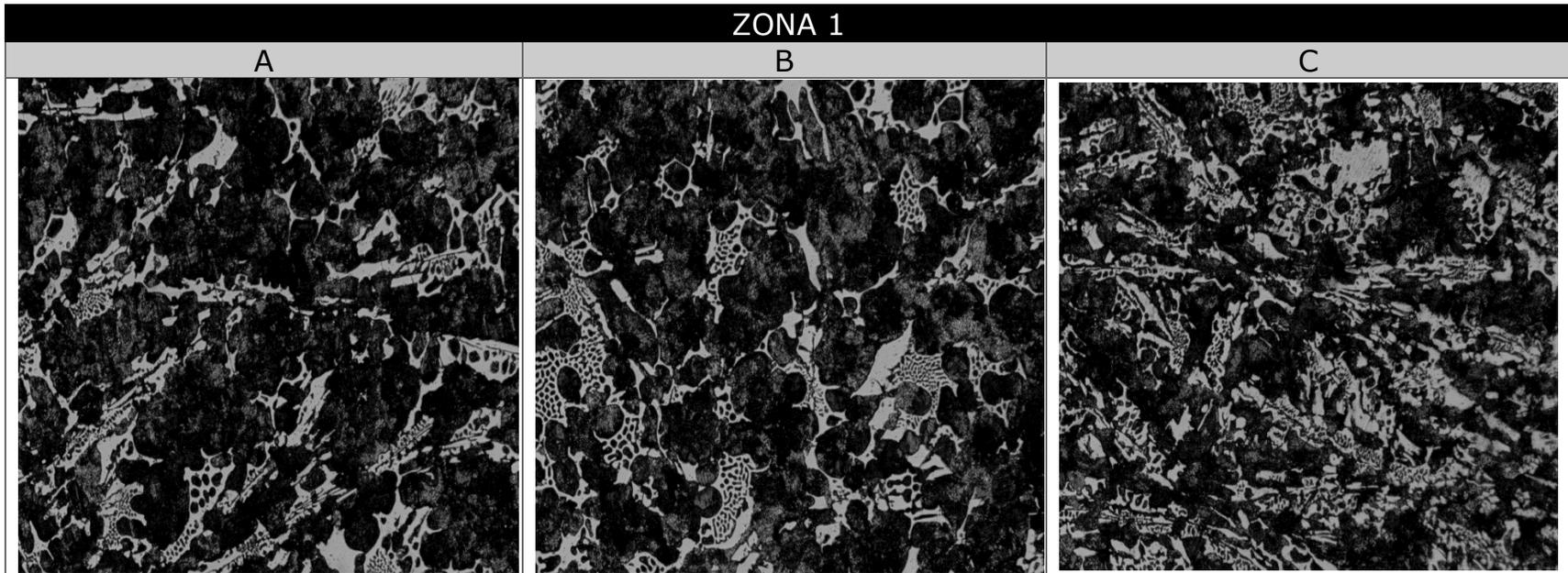


Figura XXV-B.- Punta 7 zona 1 con 2.0% Cr 0.4%V Inoculación 0.25% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 27.16

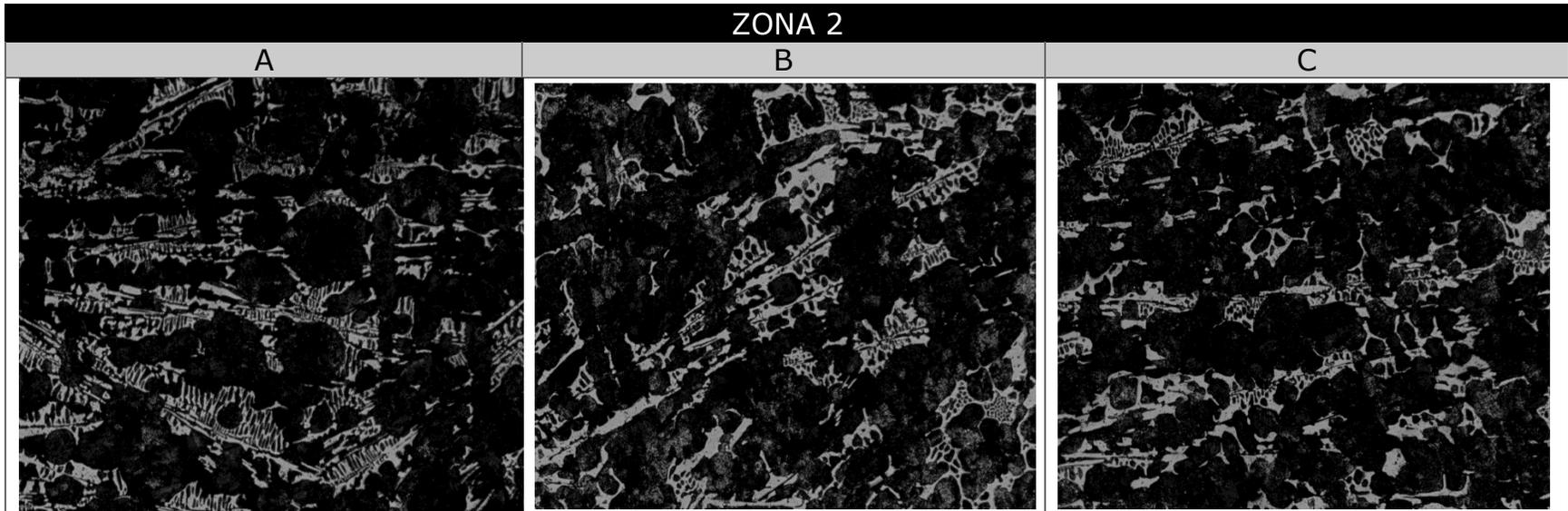


Figura XXVI.- Punta 7 zona 2 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%Carburos = 24.07

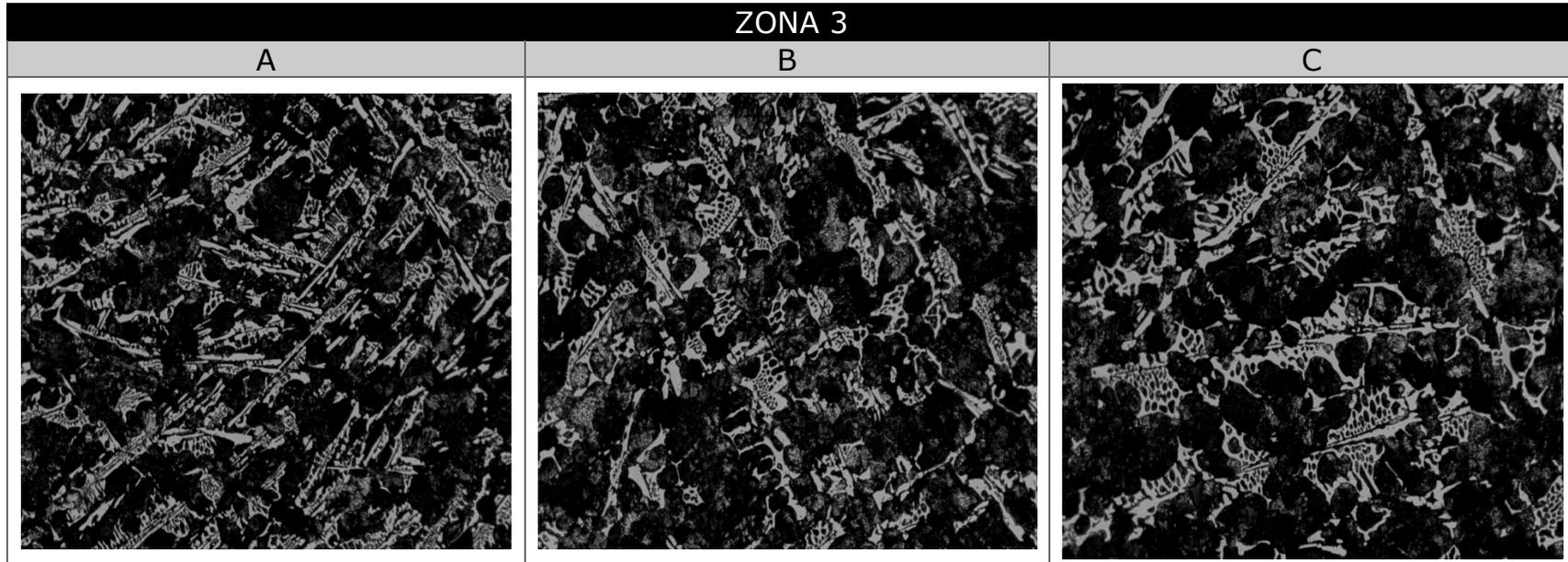


Figura XXVII-B.- Punta 7 zona 3 con 2.0% Cr 0.4%V Inoculación 0.25% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 32.37

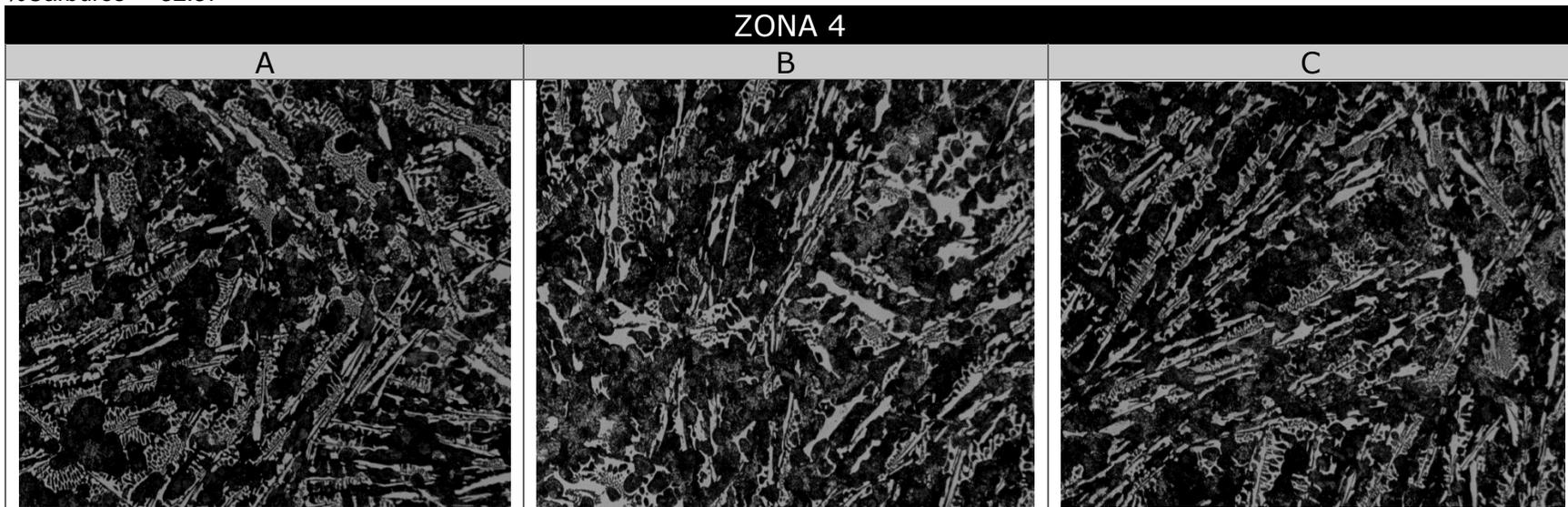


Figura XXVIII-B.- Punta 7 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%Carburos = 30.78

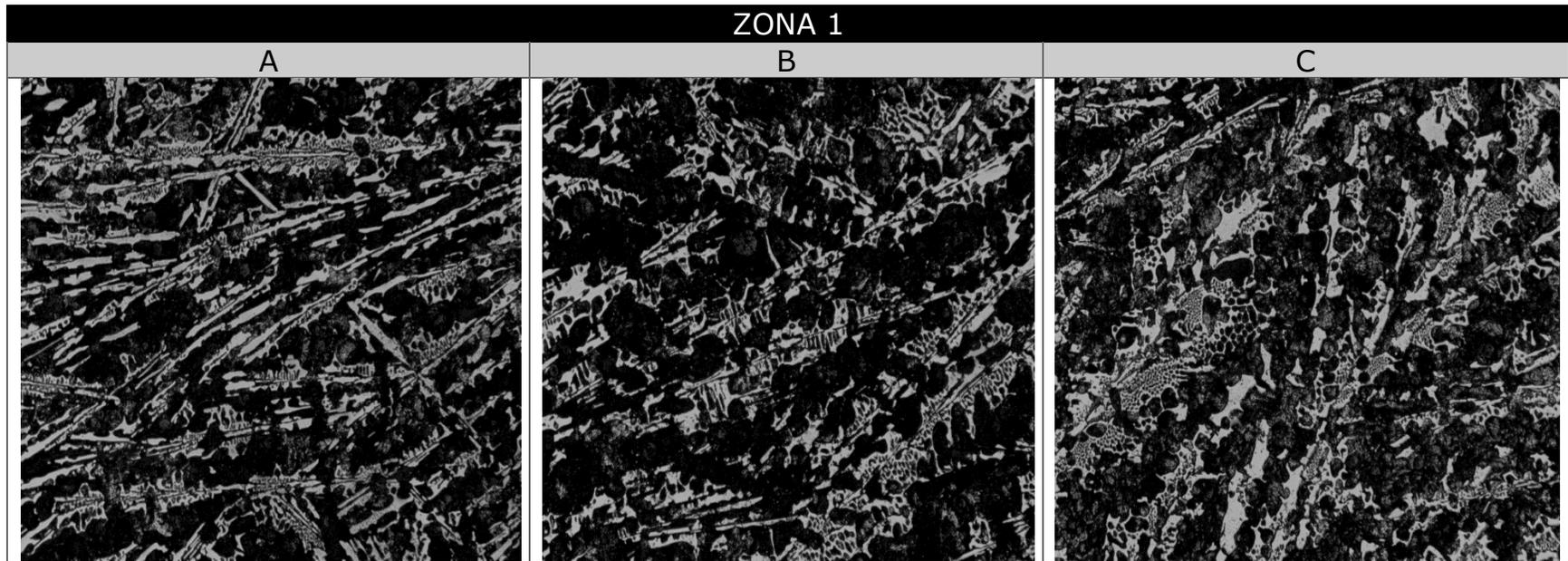


Figura XXIX.- Punta 8 zona 1 con .0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%carburos = 21.79

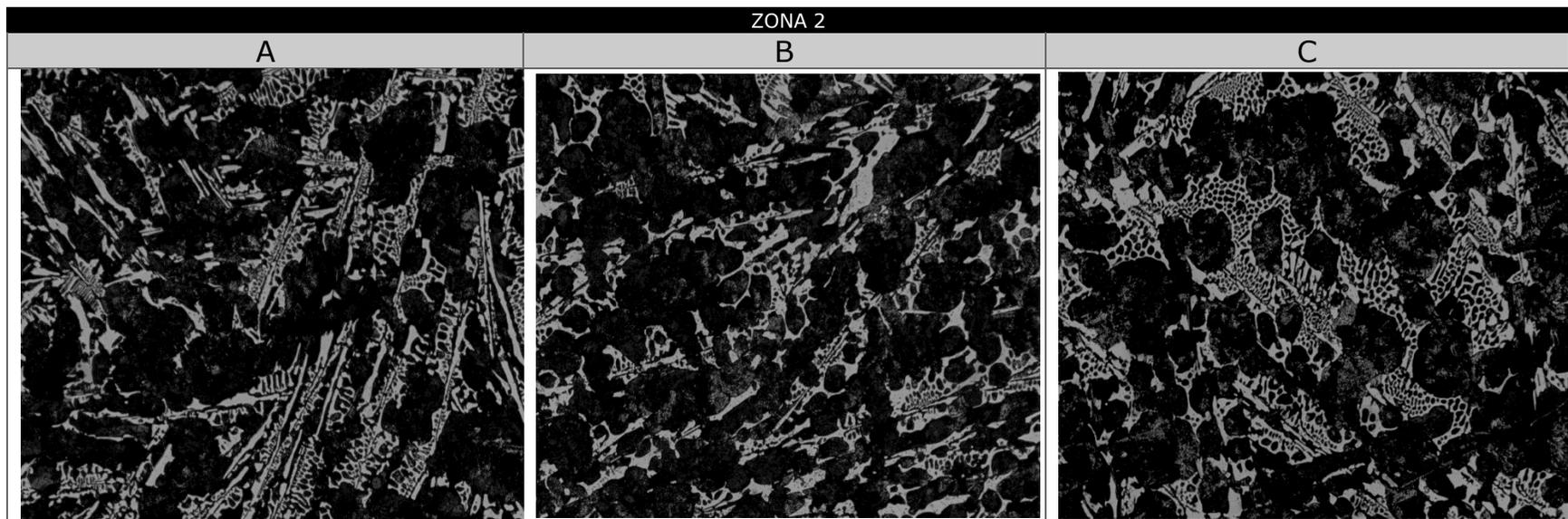


Figura XXX.- Punta 8 zona 2 con .0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes obscurecidas, 100X
%carburos = 20.66

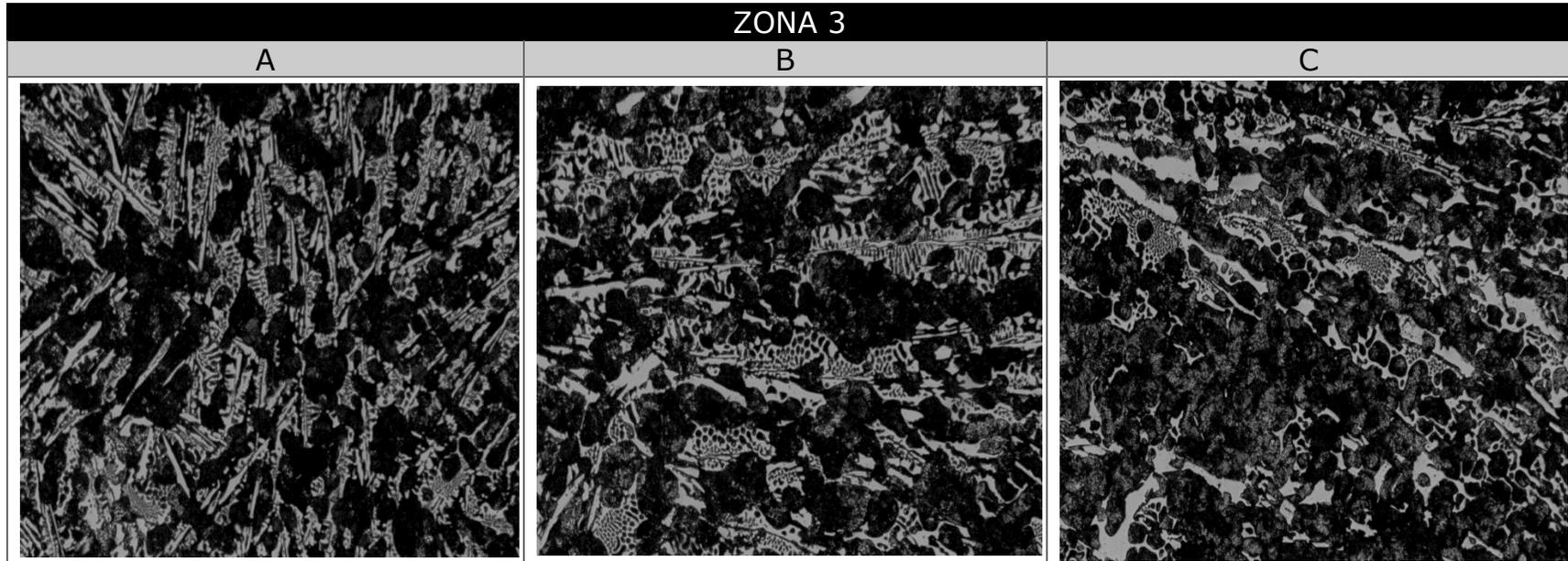


Figura XXXI.- Punta 8 zona 3 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%carburo = 27.92

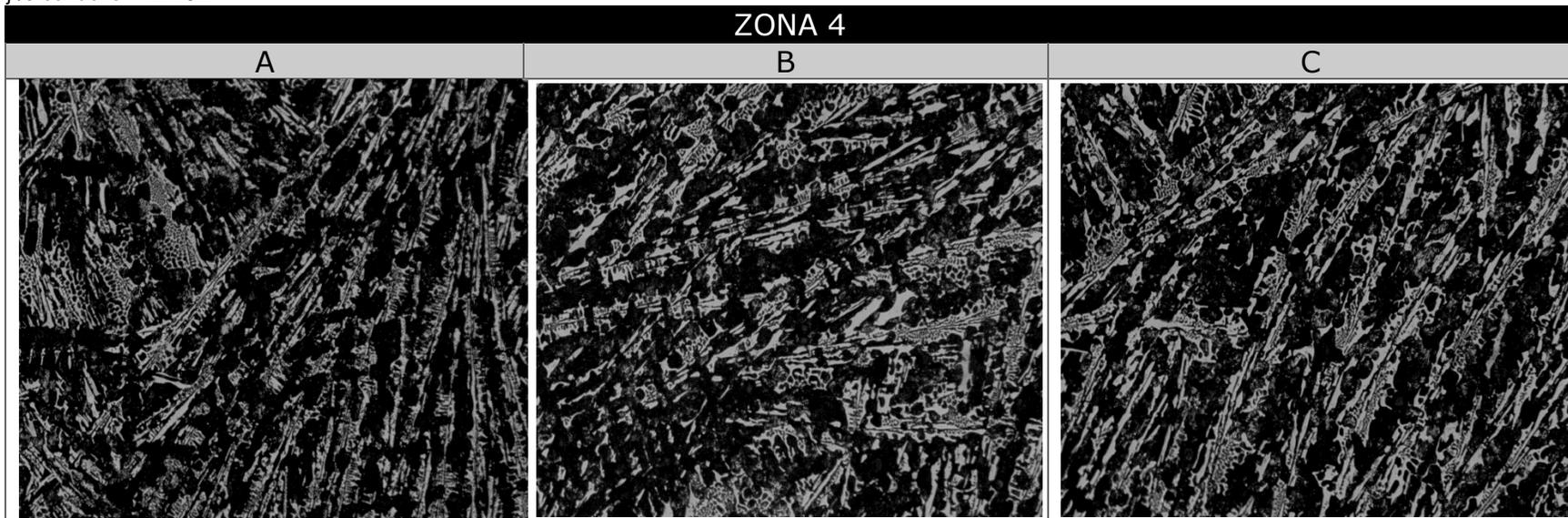


Figura XXXII.- Punta 8 zona 4 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4% base Si Cuantificación de carburos imágenes oscurecidas, 100X
%carburos = 30.15

Anexo C

Evaluación

de

Matriz

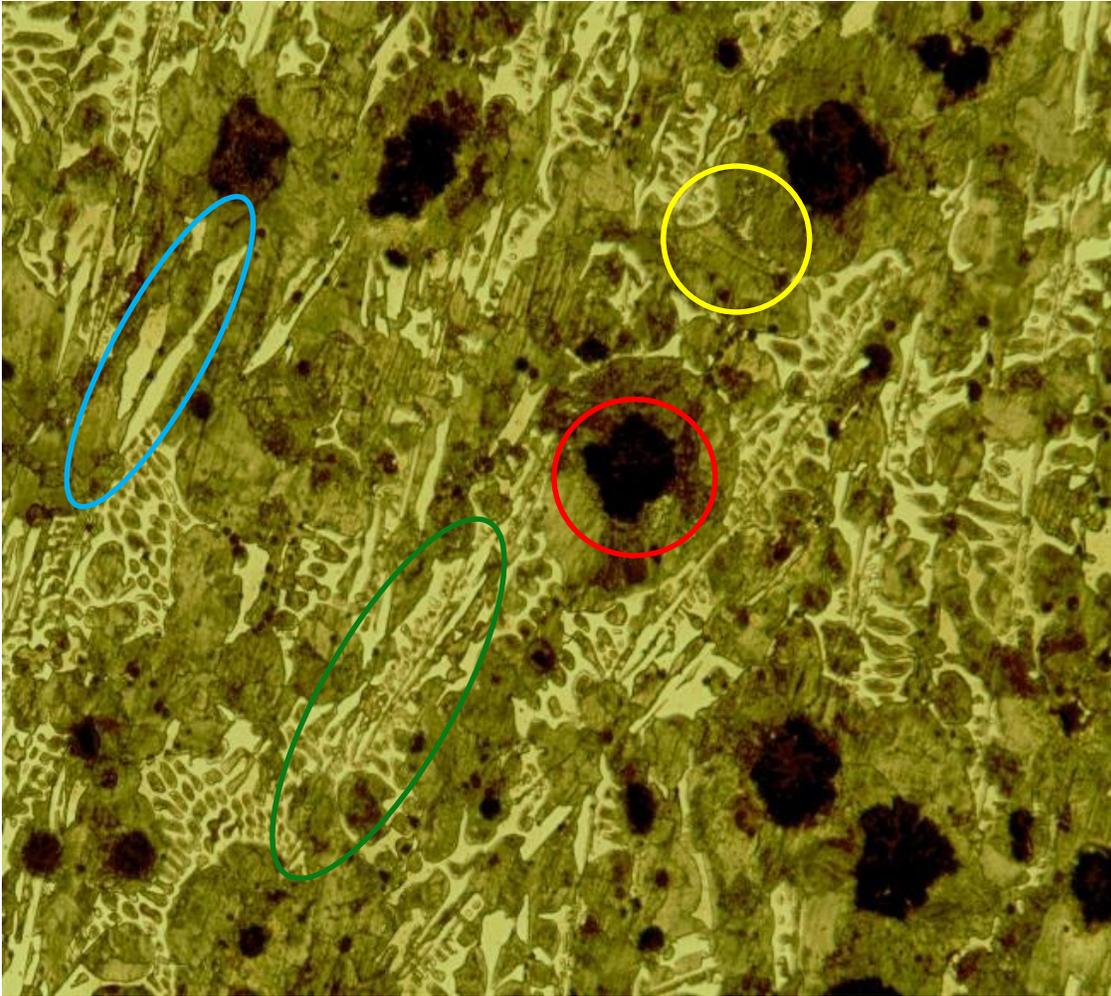


Figura C.1 Metalografía para la Evaluación de matriz, ataque con nital 3. 100X. carburos ledeburíticos (elipse verde) y carburos libres (elipse azul), matriz perlítica (elipse amarilla) y carbono grafito (elipse roja) en una punta con 1.5 % Cr, 0.5 % V y post-inoculación 0.12 % base Si.

Como se ilustra en la Figura C.1, la morfología es muy característica en ella tenemos presente una matriz perlítica con altos contenidos de carburos tanto ledeburíticos como aleados, también se pueden apreciar los esferoides de carbono grafito los cuales se encuentran rodeados por la perlita de la matriz.

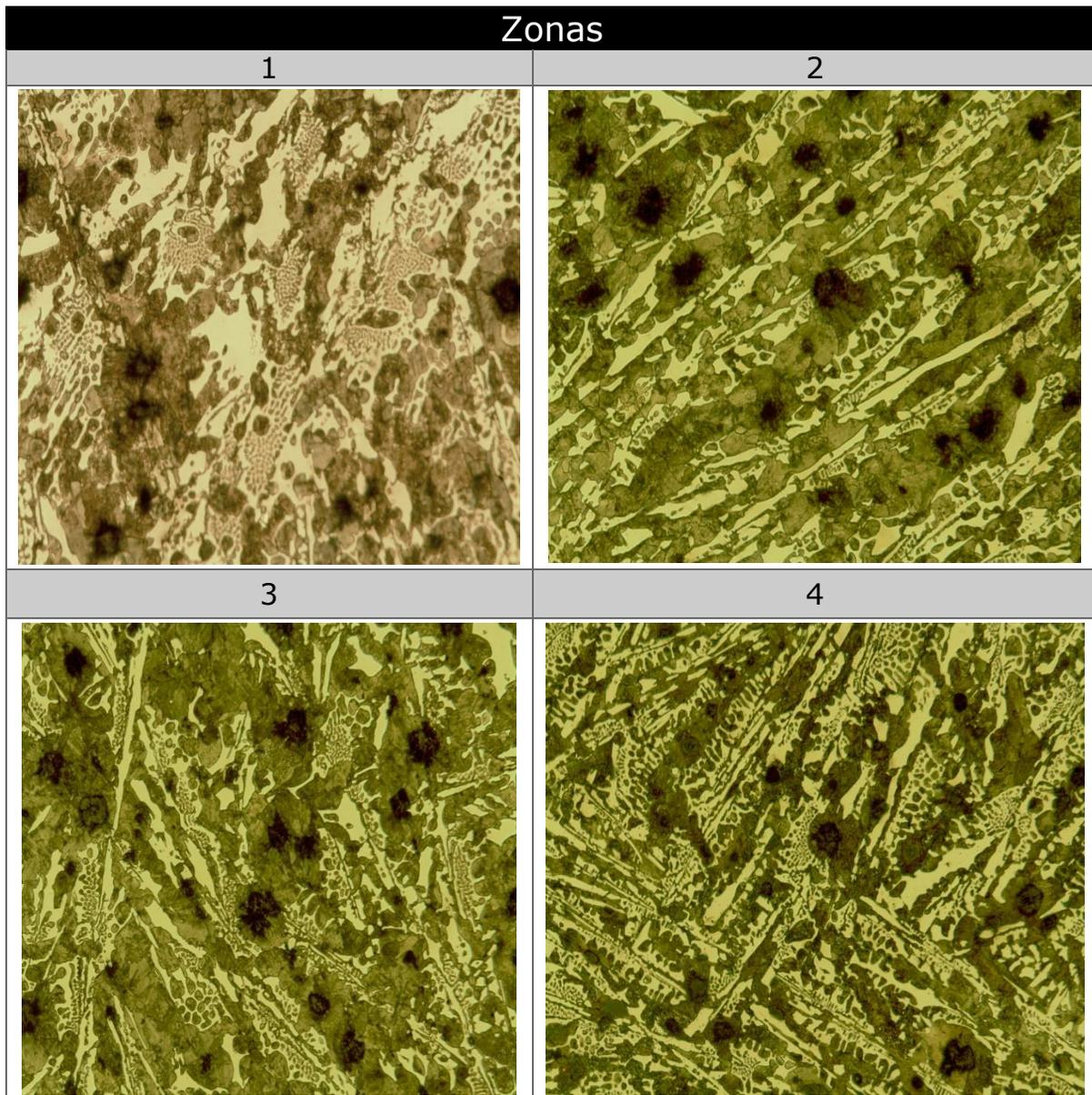


Figura I-C Punta 1 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3. 100x. En la punta 1 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos.

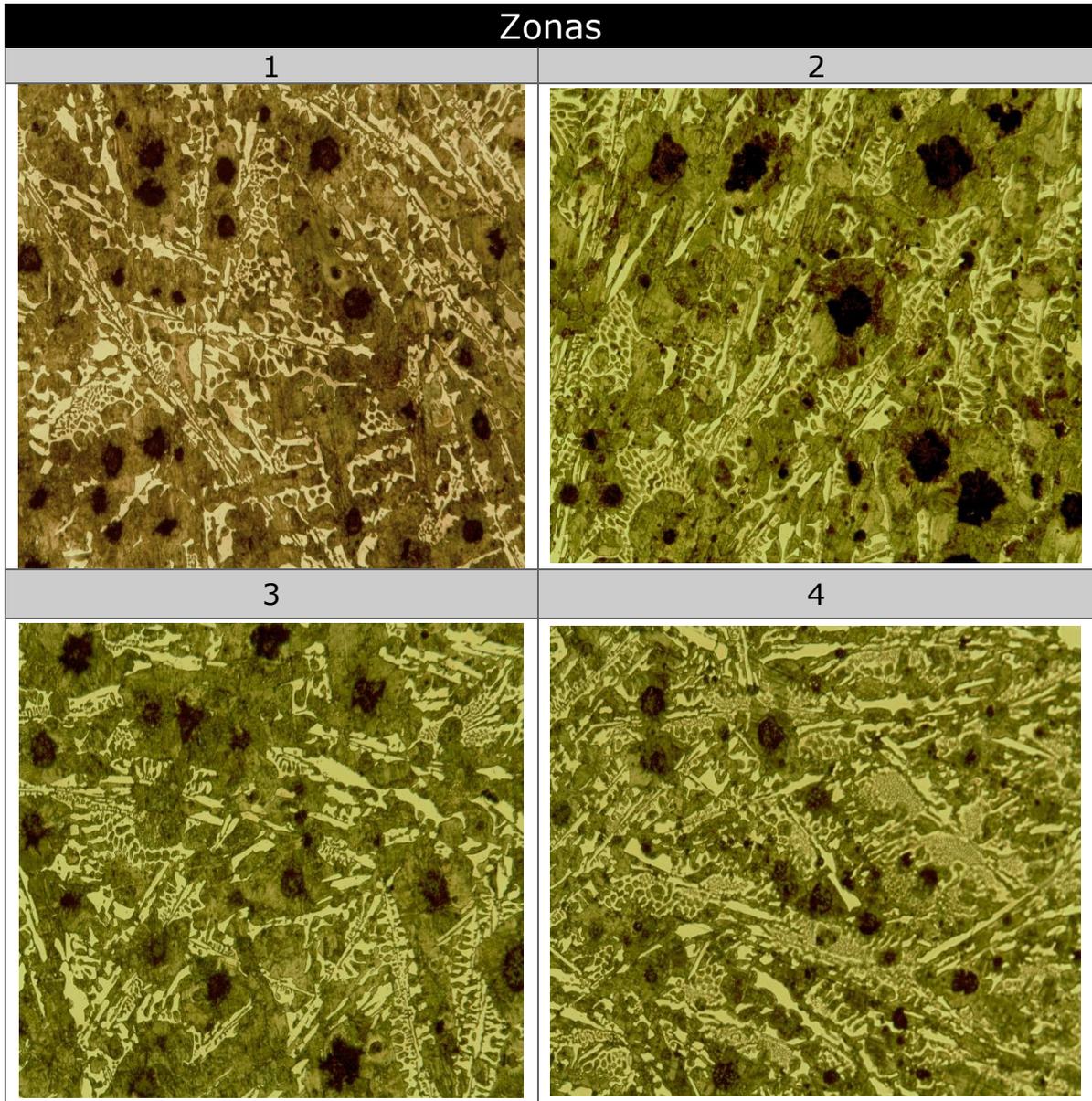


Figura II-C Punta 2 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3. 100x. En la punta 2 se puede observar una matriz 100% perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

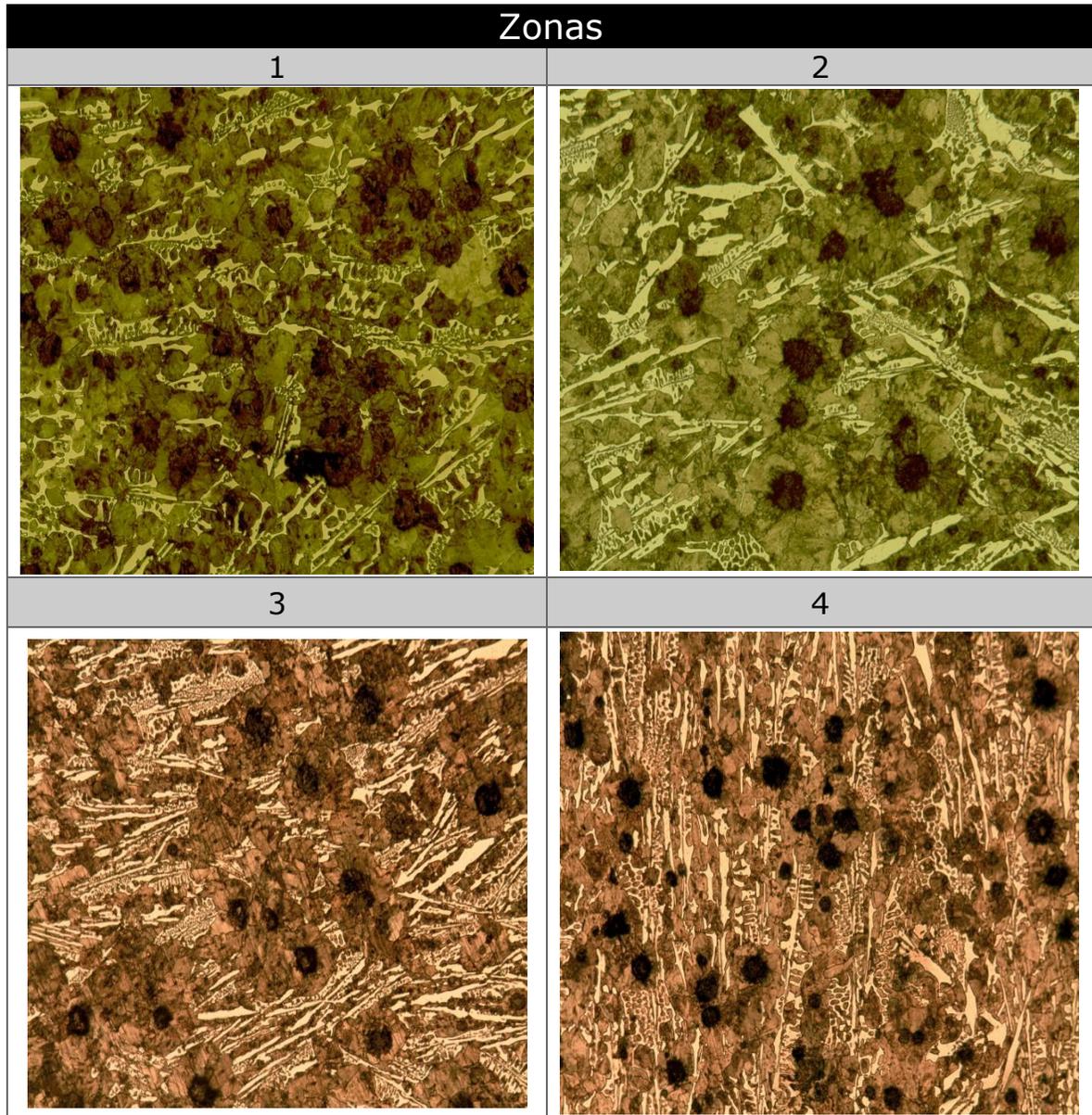


Figura III-C.- Punta 3 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3. 100x. En la punta 3 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

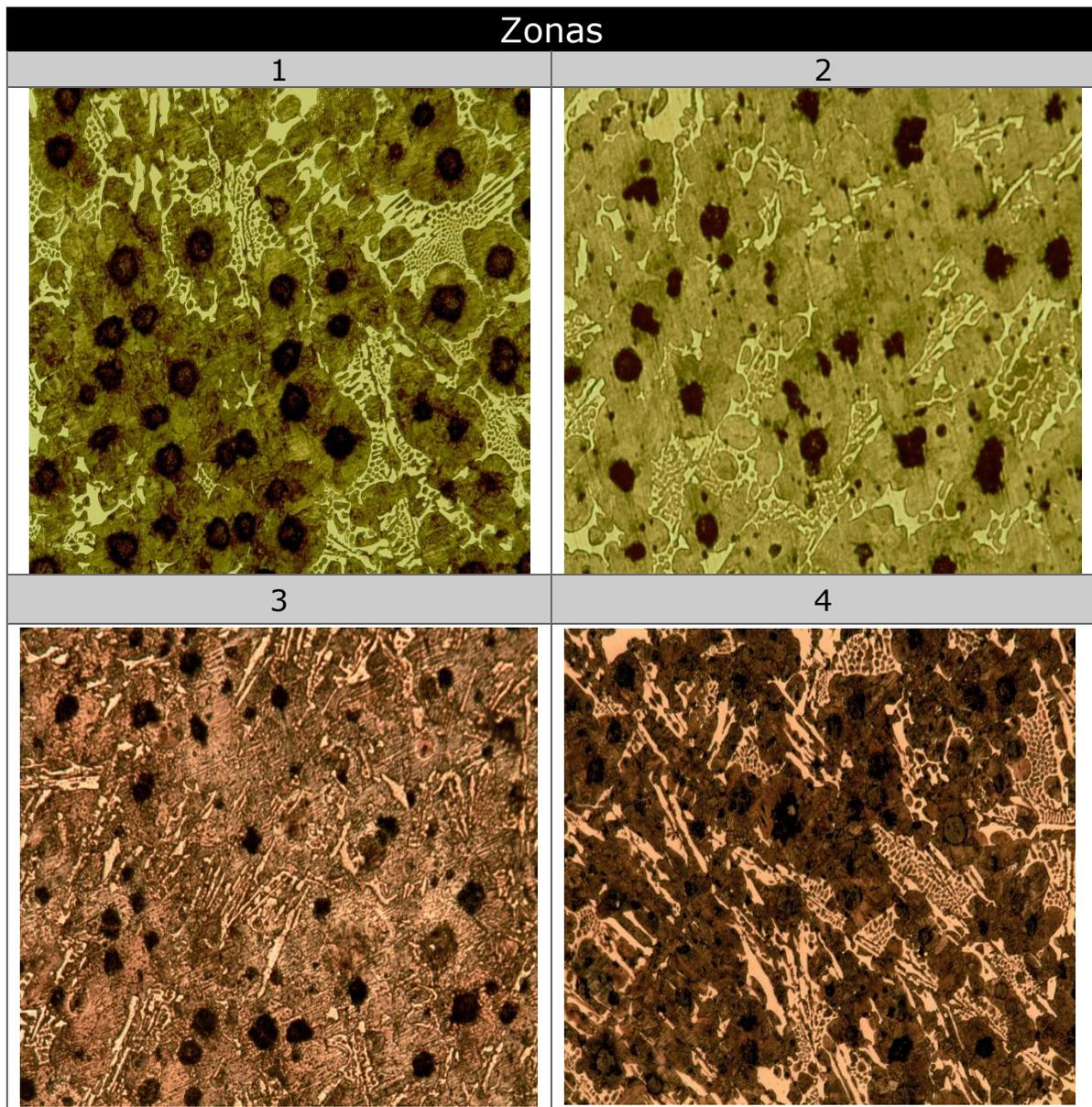


Figura IV-C Punta 4 con 1.5% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3, 100x. En la punta 4 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

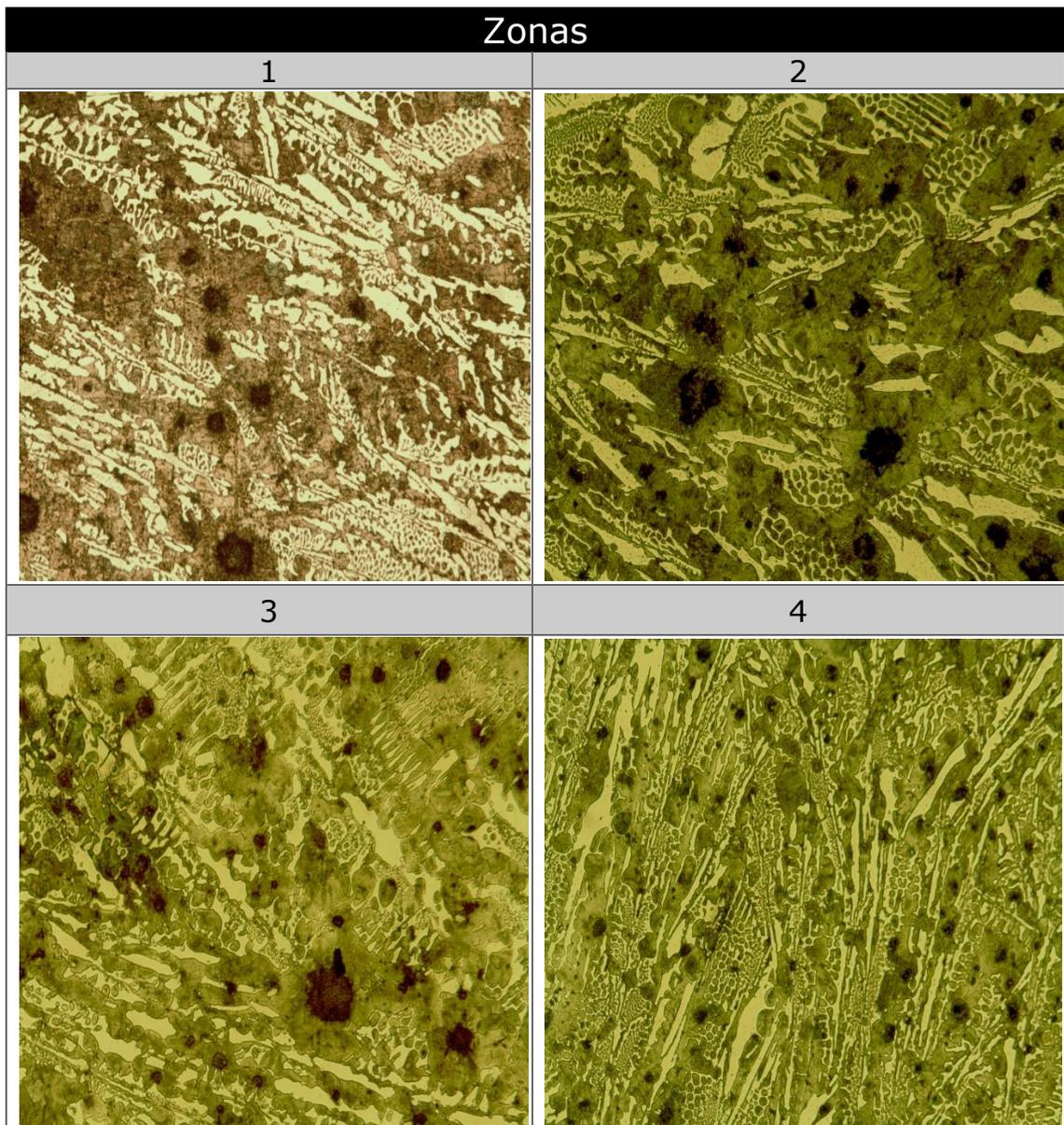


Figura V-C Punta 5 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.03%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3, 100x. En la punta 5 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

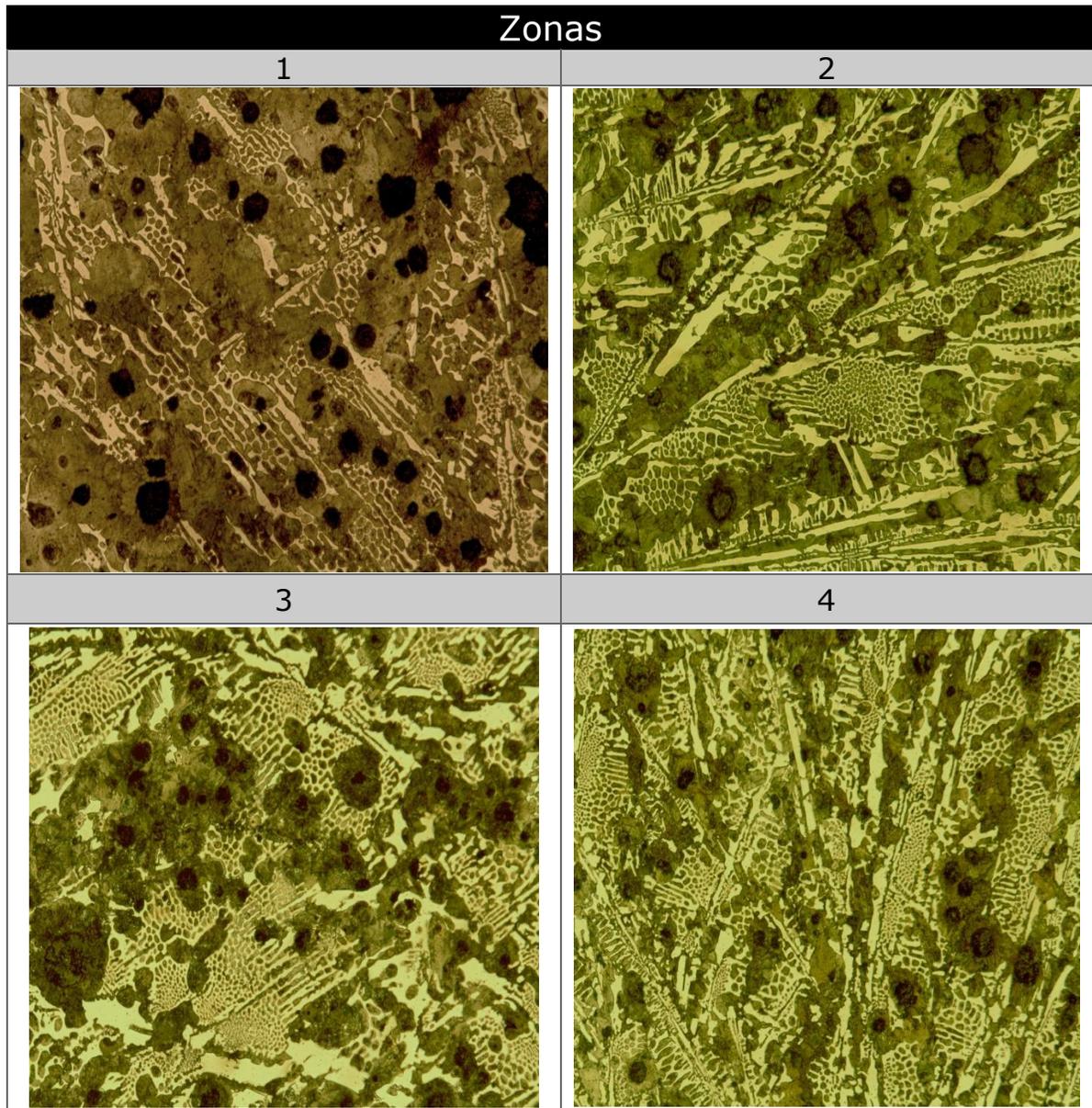


Figura VI-C Punta 6 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.12%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3, 100x. En la punta 6 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

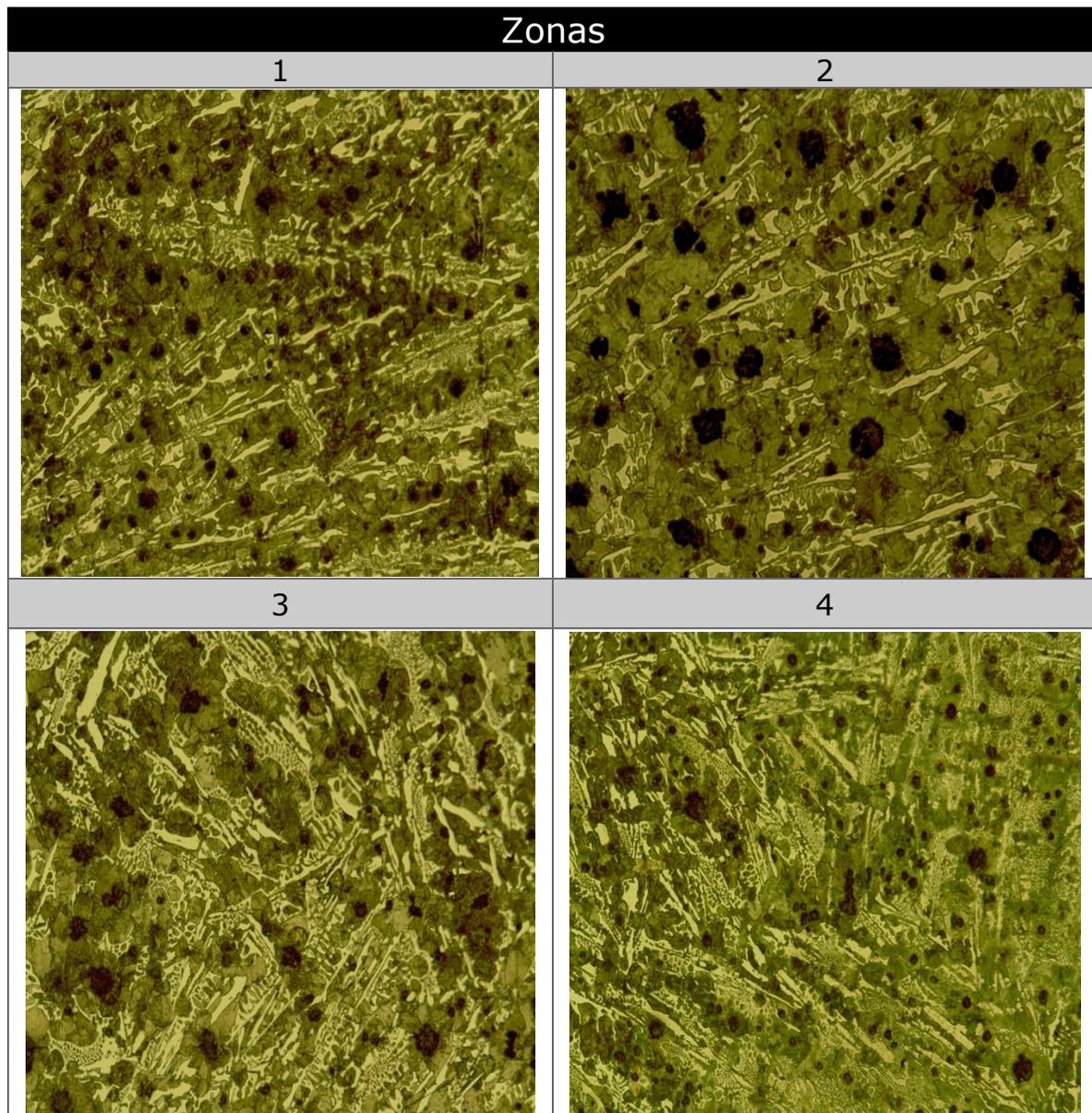


Figura VII-C.- Punta 7 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.25%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3, 100x. En la punta 7 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

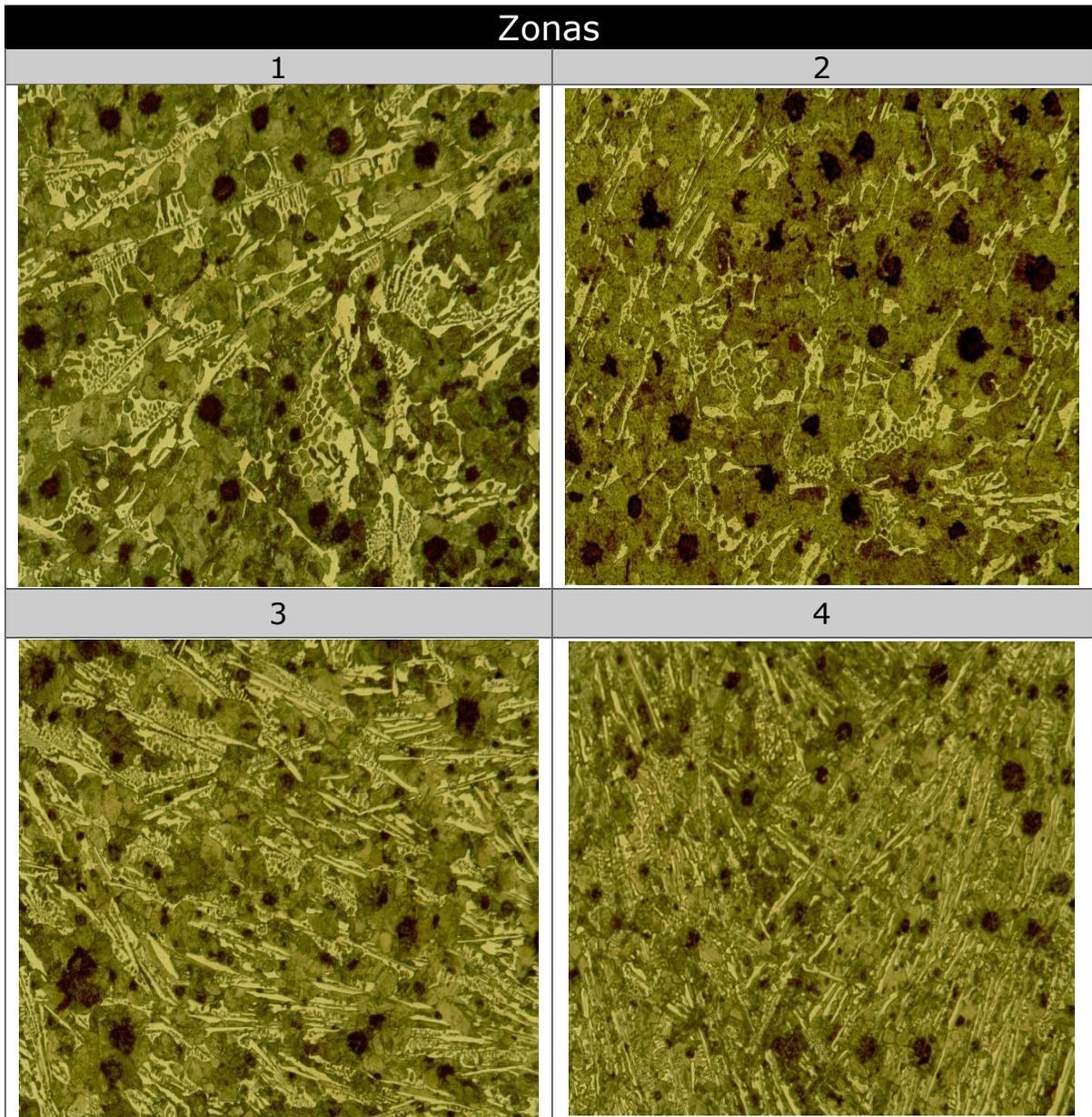


Figura VIII-C.- Punta 8 con 2.0% Cr 0.5%V Inoculación 0.4%Si. Evaluación de matriz imágenes de ataque con nital 3, 100x. En la punta 8 se puede observar una matriz perlítica en las cuatro zonas con una gran presencia de carburos

Anexo D

Curvas de Enfriamiento



Curvas de enfriamiento generales, clasificadas por punta y presentado las curvas obtenidas por zonas

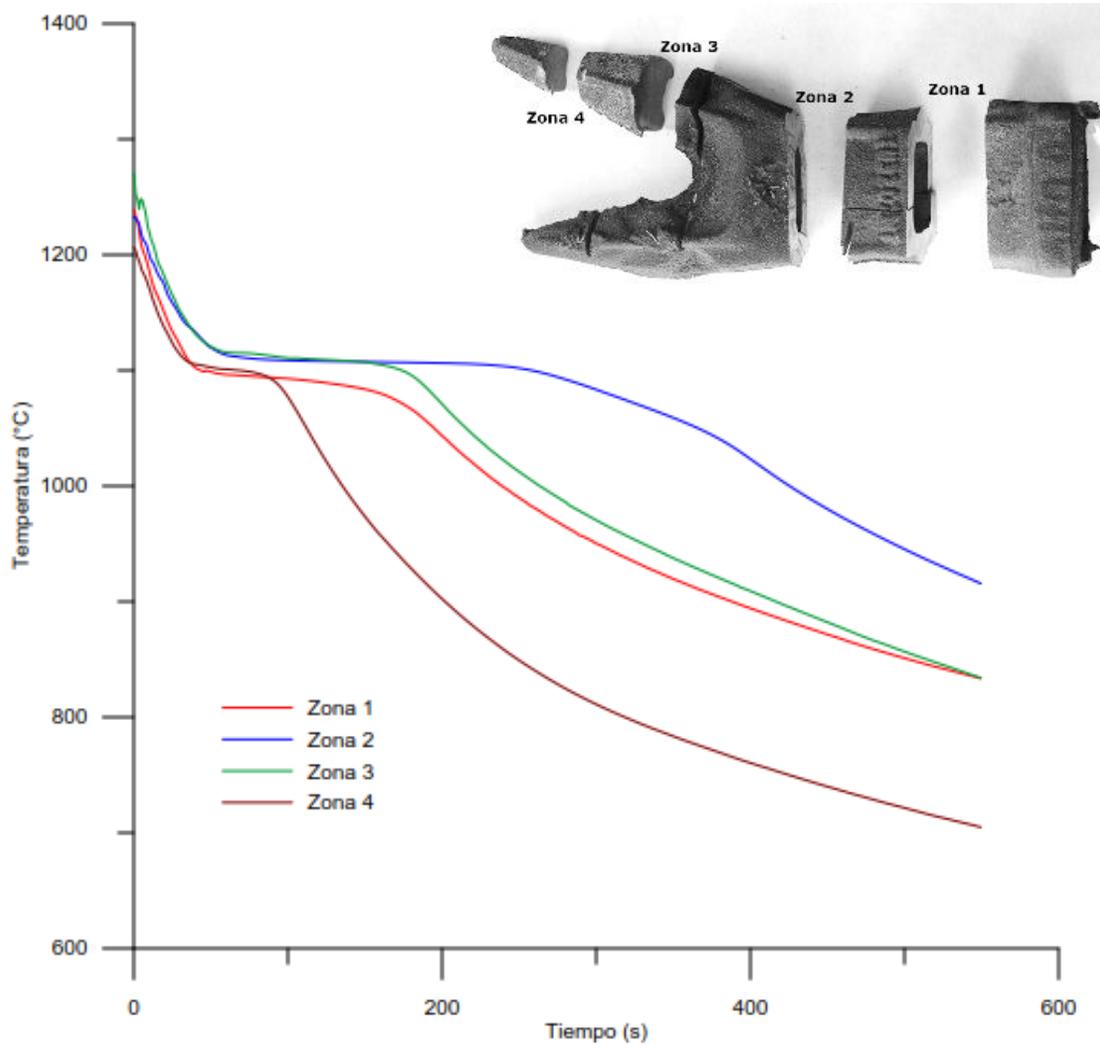


Figura I-D Curvas de enfriamiento para una punta de excavadora en diferentes zonas, con una composición de 1.5%Cr, 0.5%V y 0.03%Si de Inoculación.

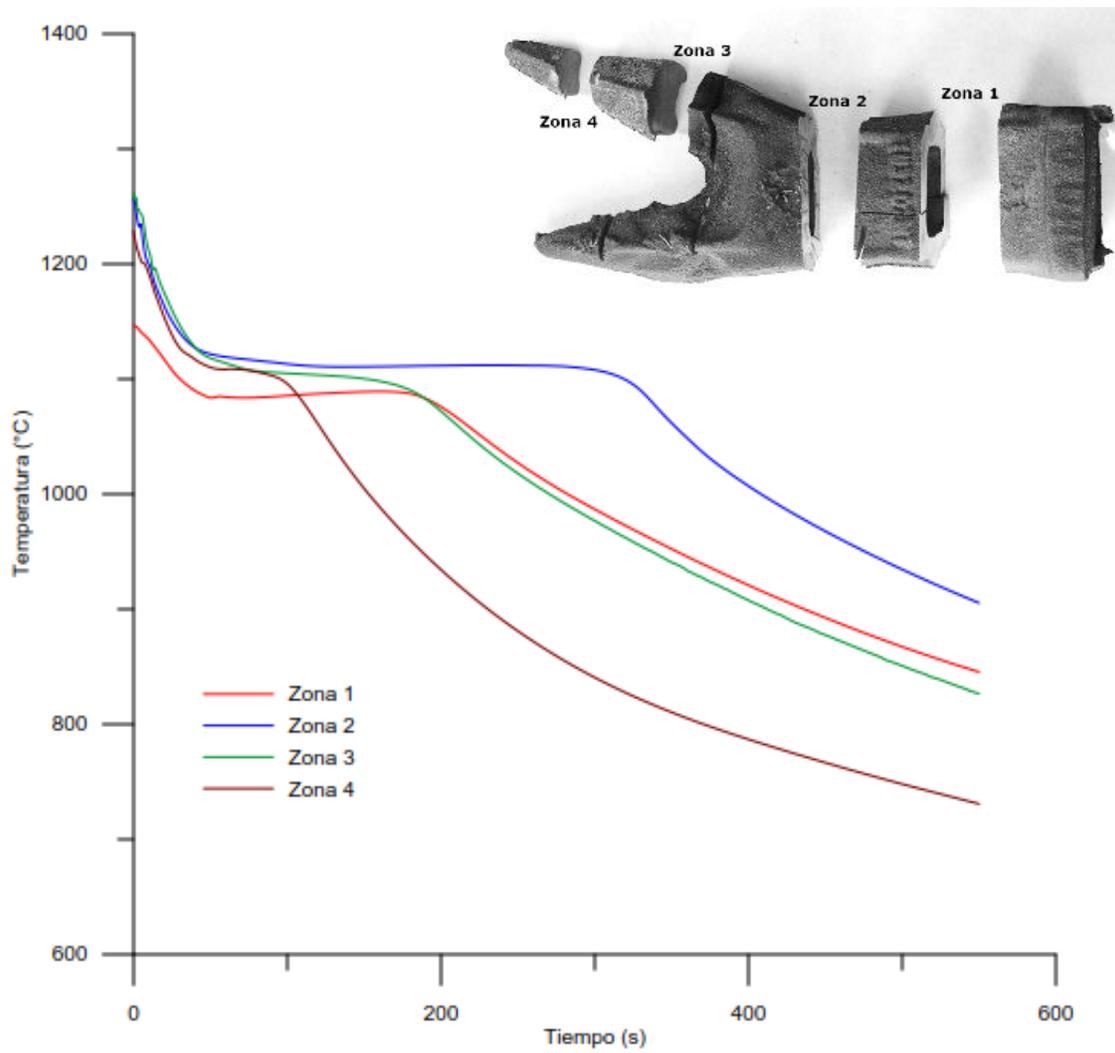


Figura II-D Curvas de enfriamiento para una punta de excavadora en diferentes zonas, con una composición de 1.5%Cr, 0.5%V y 0.12%Si de Inoculación.

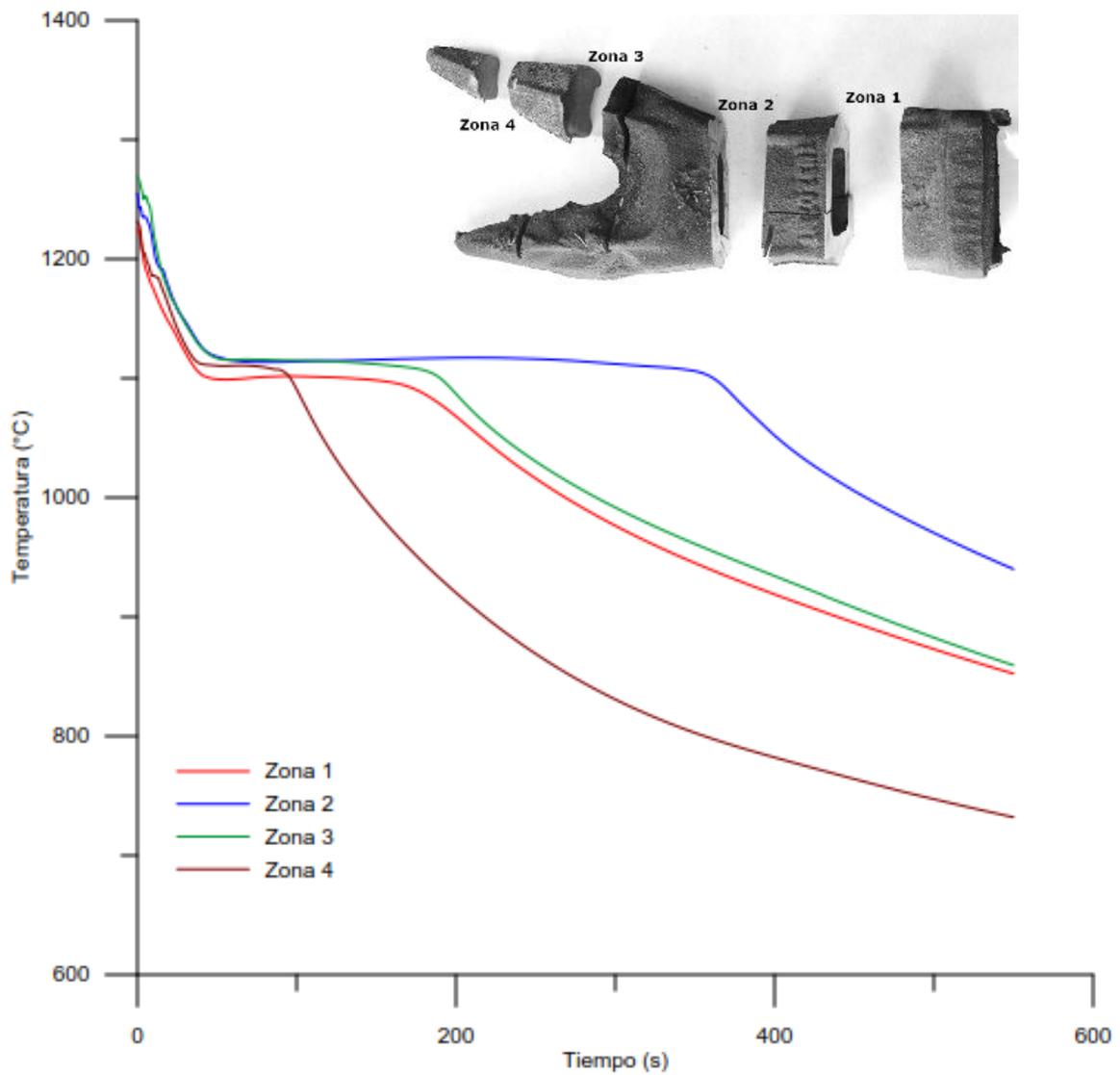


Figura III-D Curvas de enfriamiento para una punta de excavadora en diferentes zonas, con una composición de 1.5%Cr, 0.5%V y 0.25%Si de Inoculación.

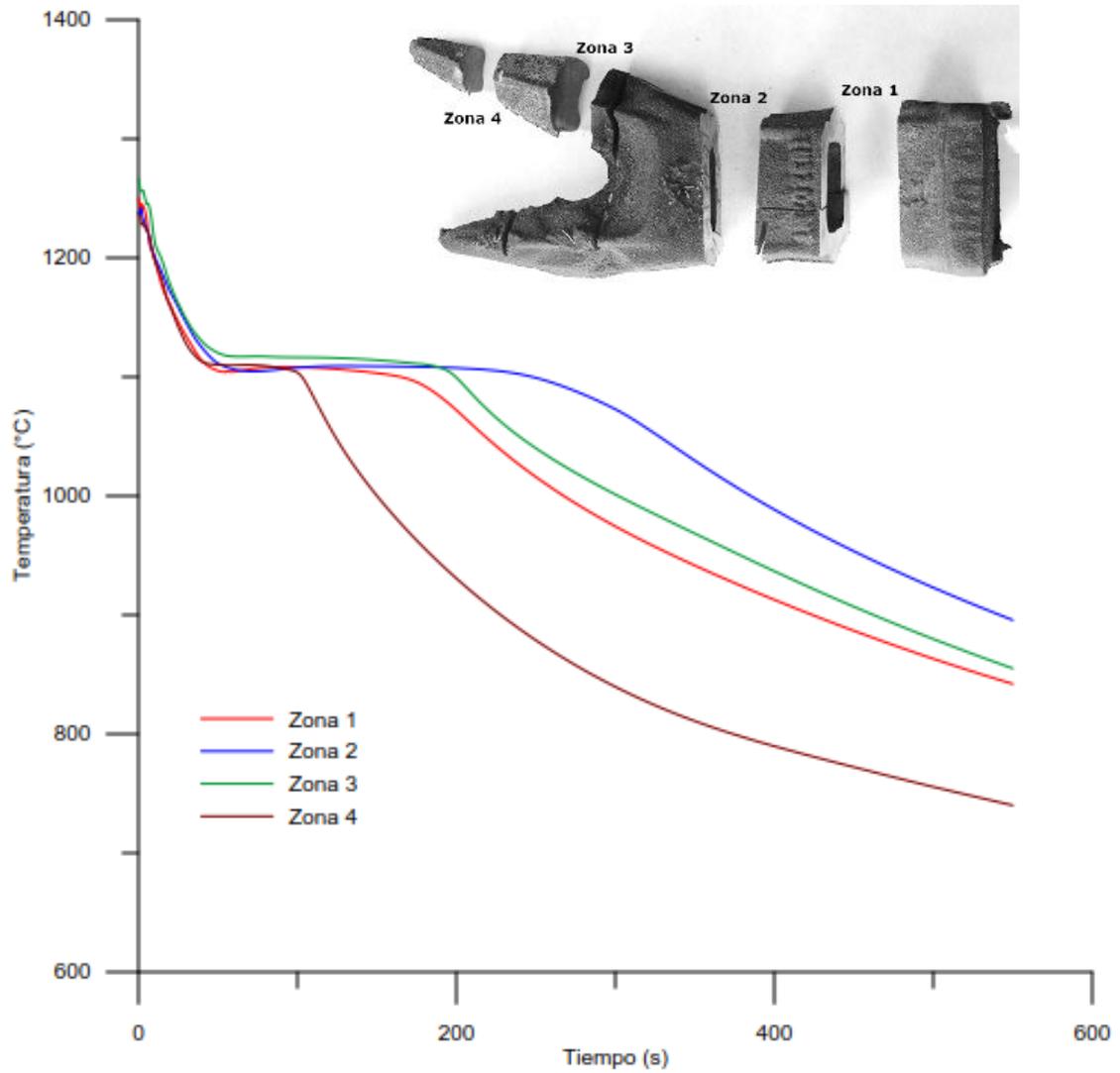


Figura IV-D Curvas de enfriamiento para una punta de excavadora en diferentes zonas, con una composición de 1.5%Cr, 0.5%V y 0.4%Si de Inoculación.

V

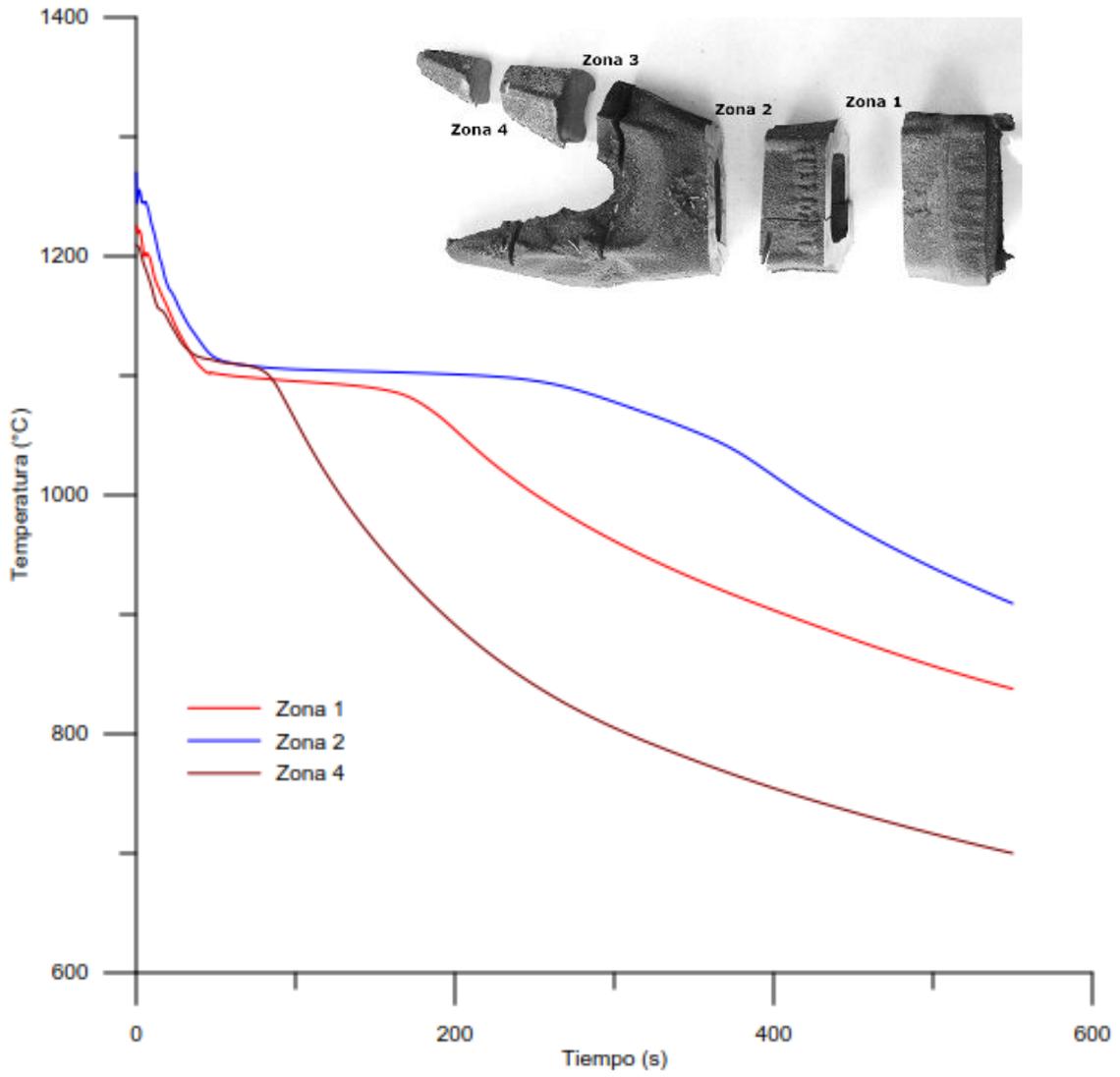


Figura V-D Curvas de enfriamiento para una punta de excavadora en diferentes zonas, con una composición de 2.0%Cr, 0.5%V y 0.03%Si de Inoculación.

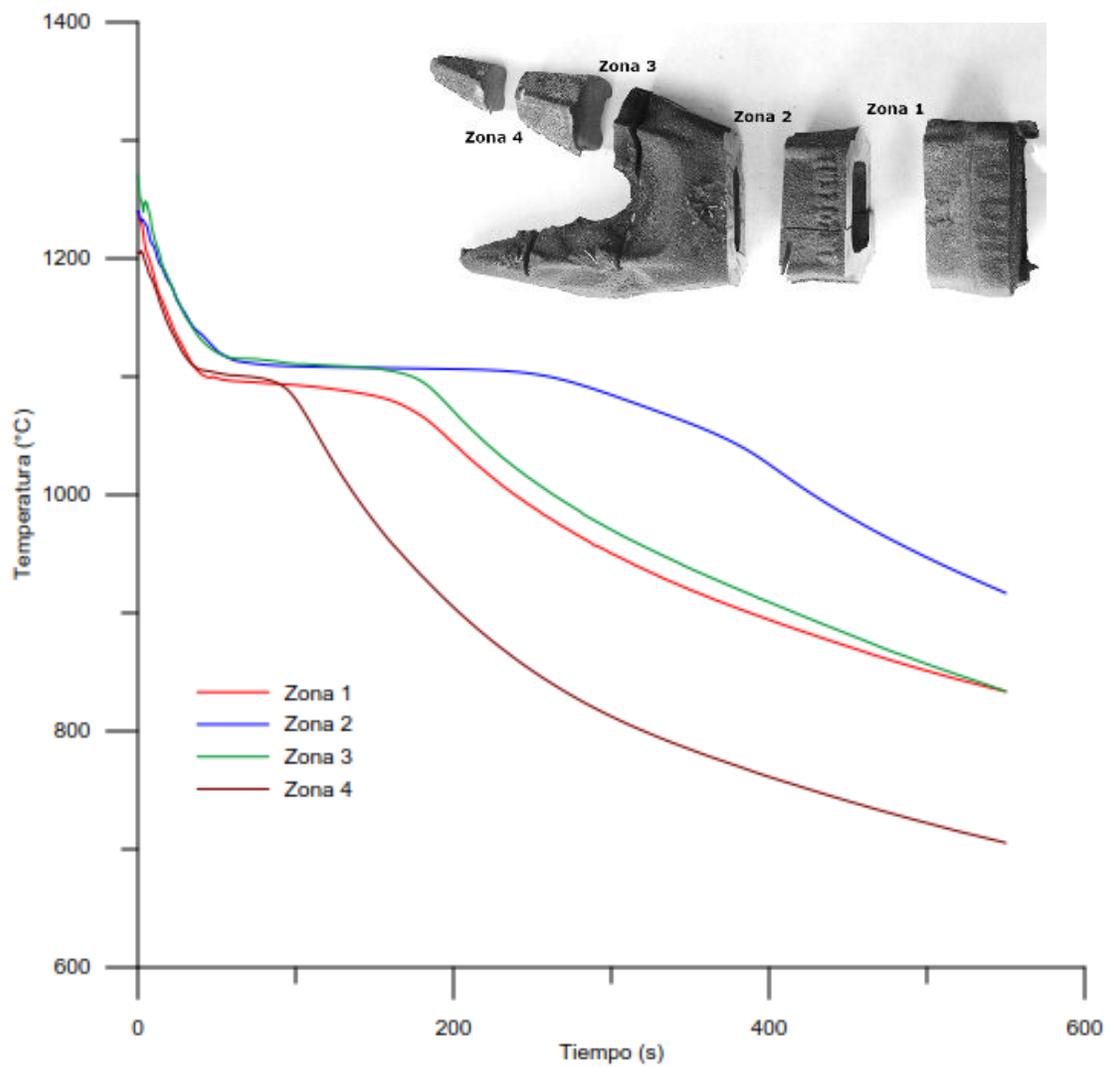


Figura VI-D Curvas de enfriamiento para una punta de excavadora en diferentes zonas, con una composición de 2.0%Cr, 0.5%V y 0.12%Si de Inoculación.

Curvas de enfriamiento clasificadas por punta y presentadas por zonas de forma individual así como sus respectivas derivadas

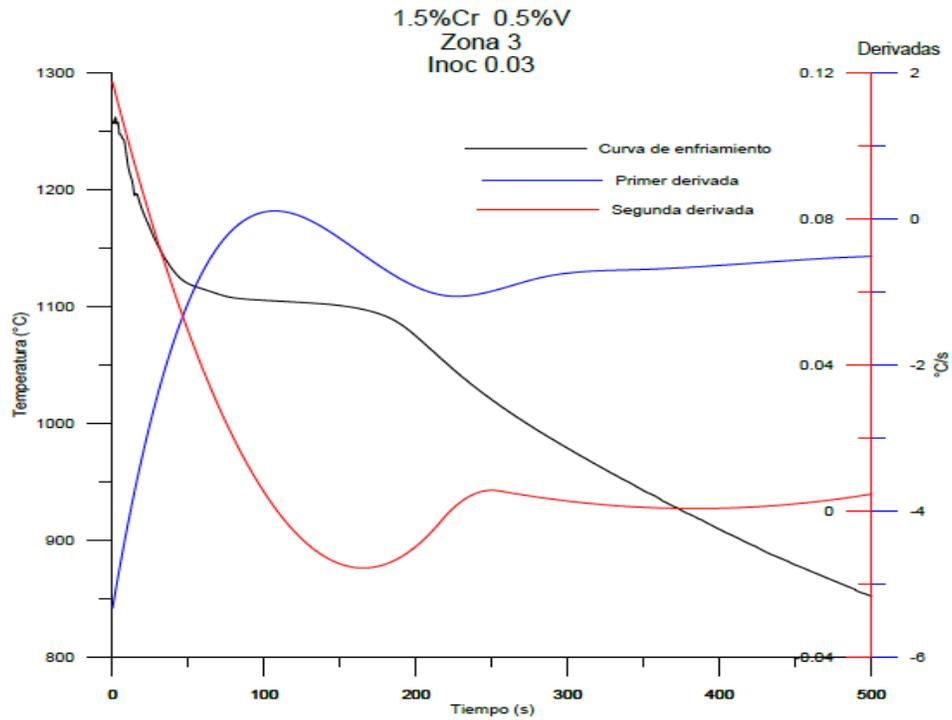


Figura VII-D Curva de enfriamiento en punta 1, zona 3 con sus respectivas derivadas

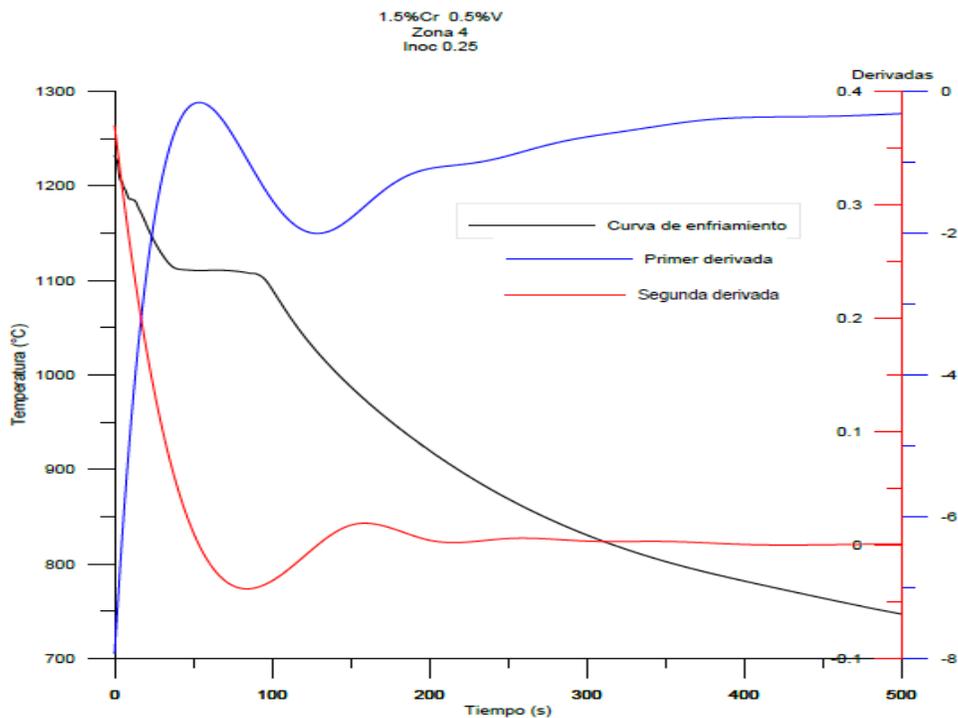


Figura VIII-D Curva de enfriamiento en punta 3, zona 4 con sus respectivas derivadas

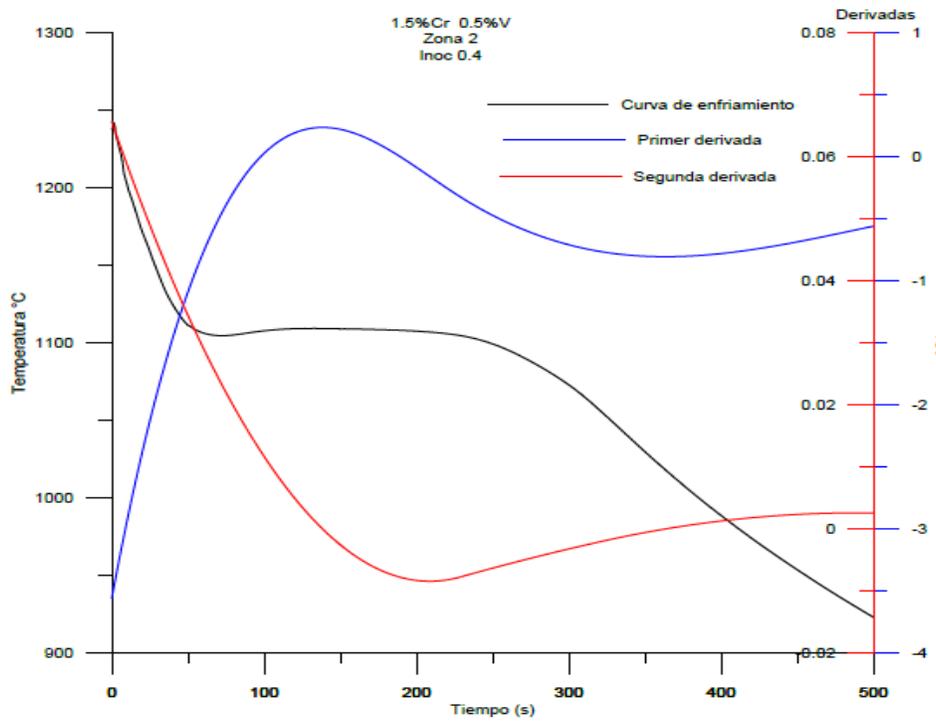


Figura IX-D Curva de enfriamiento en punta 4, zona 2 con sus respectivas derivadas

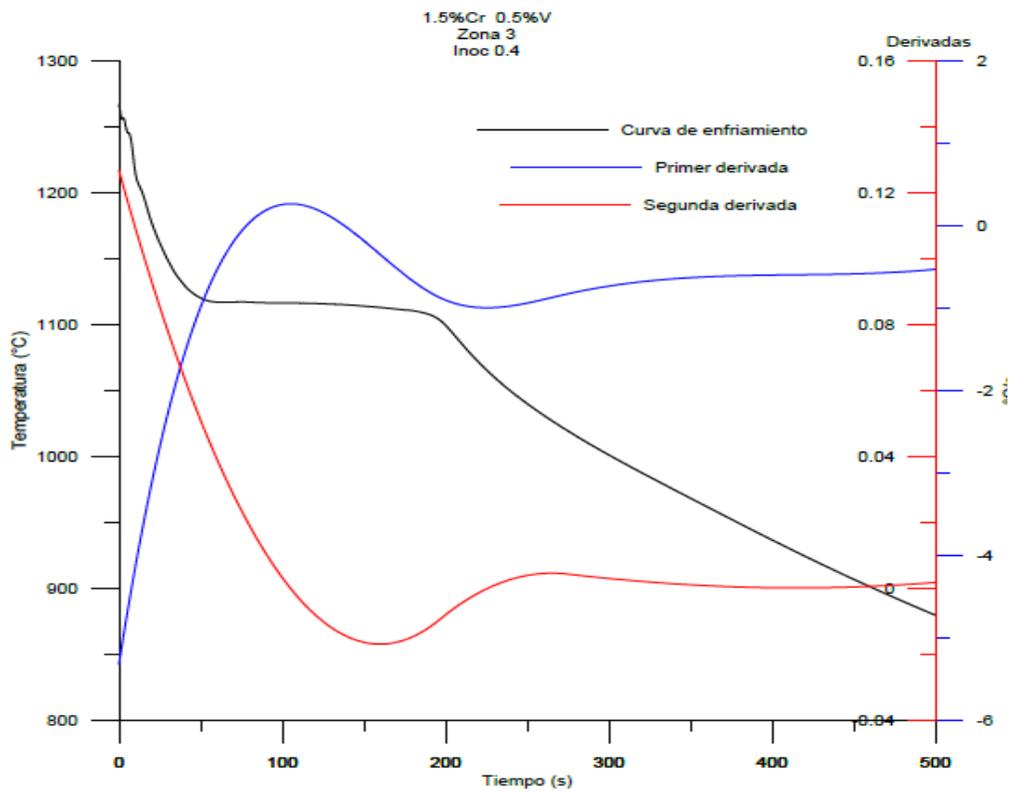


Figura X-D Curva de enfriamiento en punta 4, zona 4 con sus respectivas derivadas

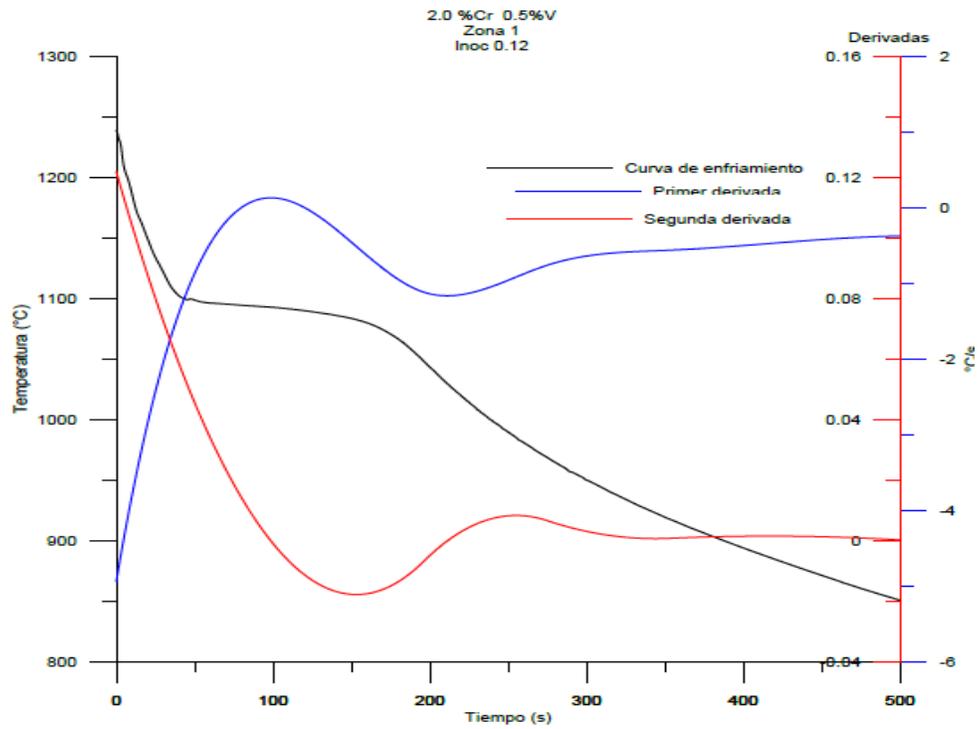


Figura XI-D Curva de enfriamiento en punta 6, zona 1 con sus respectivas derivadas

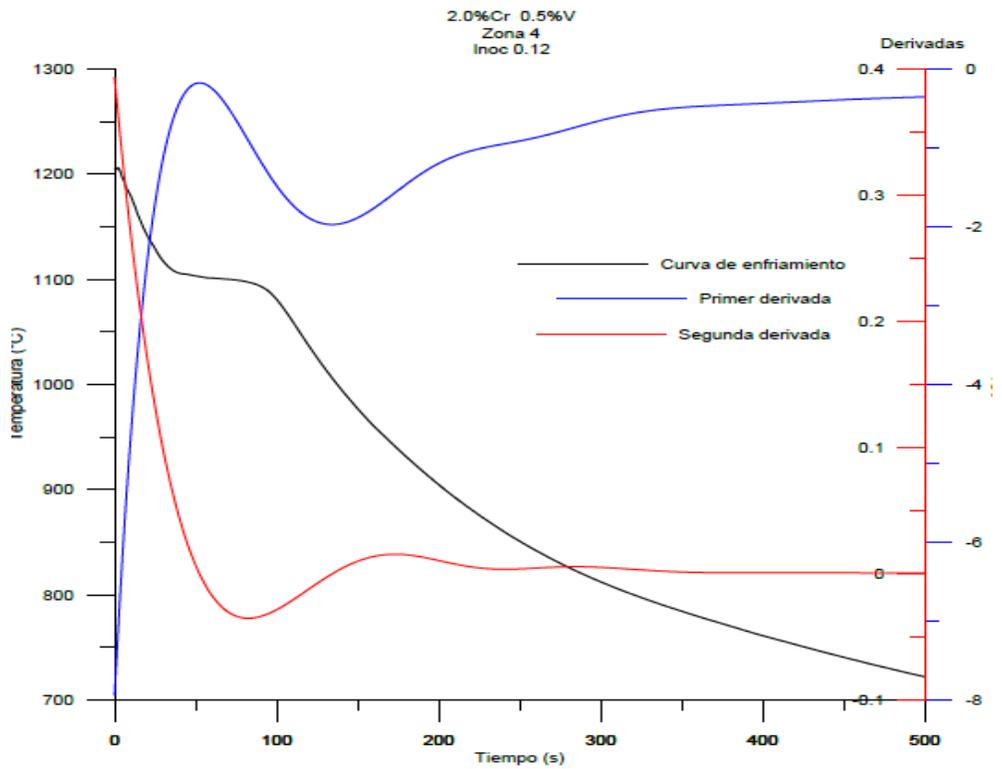


Figura XII-D Curva de enfriamiento en punta 6, zona 3 con sus respectivas derivadas