



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“Efecto de la Temperatura de Austenización en la
Disolución de Carburos en un Hierro Nodular con
Carburos, Aleado con Cr/V”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

MIGUEL ANGEL ESCALANTE FLORES



CDMX

2018



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: JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

VOCAL: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

SECRETARIO: VÍCTOR ANTONIO ARANDA VILLADA

1er SUPLENTE: HECTOR ISRAEL QUIROGA HERRERA

2do SUPLENTE: AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
EDIFICIO "D"

Asesor del Tema:

Dr. José Alejandro García Hinojosa.

Supervisor Técnico:

M. I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

Sustentante:

Miguel Angel Escalante Flores

Introducción.....	1
Hipótesis:	3
Objetivo Principal:.....	3
Objetivos Particulares:	3
Capítulo 1	4
Marco Teórico.....	4
1.1 Diagrama de Fases Fe-C y Fe-Fe ₃ C.....	5
1.2 Fases y Microconstituyentes Estables y Metaestables.	6
1.3 Elementos Aleantes.....	9
1.4 Hierros Colados o Fundiciones.	12
1.5 Tipos de Hierros Colados.....	13
1.6 Características de los Hierros Nodulares.....	18
1.7 Tipos de Hierro Nodular y sus Propiedades.	19
1.8 Obtención de Hierro Nodular.....	26
1.8.1 Selección de Material de Carga.....	27
1.8.2 Desulfuración.	27
1.8.3 Nodularización	28
1.8.4 Inoculación.....	28
1.9 Caracterización Microestructural de Hierros Nodulares.....	29
1.9.1 Tipo de Grafito.....	29
1.9.2 Tamaño de Nódulo.	31
1.9.4 Densidad o Conteo de Nódulos.....	33
Capítulo 2	34
Antecedentes	34
2.1 Hierro Nodular Austemperizado (ADI).	35
2.2 Propiedades Mecánicas de los Hierros Nodulares Austemperizados. (ADI).....	35
2.3 Obtención de un Hierro Nodular Austemperizado.	36
2.4 Ciclo de Tratamiento Térmico.	37
2.4.2 Enfriamiento	39
2.4.3.2 Ventana de Proceso del Austemperizado.	42

2.5 Aplicaciones de Hierro Nodular Austemperizado.	45
2.7 Formación de Carburos para Obtención de Hierros CADI.....	47
2.8 Ventajas y Desventajas de los Hierros CADI.....	48
Capítulo 3.....	49
Desarrollo Experimental	49
3.1 Muestreo de las piezas para la primera etapa.	51
3.2 Muestreo de las piezas para la segunda etapa.	52
3.3 Preparación metalográfica.	53
3.4 Tratamiento de Austenización	54
3.5 Determinación de Carburos Disueltos.	54
Capítulo 4.....	55
Resultados y Discusión	55
4.1 Caracterización de las piezas de llegada	56
4.2 Carburos Promedio de las muestras antes del tratamiento térmico de Austenización.	59
4.3 Carburos Promedio de las muestras después del tratamiento térmico de Austenización.....	59
Capítulo 5.....	67
Conclusiones.....	67
Conclusiones.....	68
Bibliografía.....	69

Introducción

Actualmente se producen millones de componentes metálicos en todo el mundo y prácticamente no hay industria que, de forma directa o indirecta, no se relacione con algún componente metálico, por lo cual la ingeniería metalúrgica sigue innovando los procesos de producción y creación de nuevos materiales, para que estos sean capaces de competir o sustituir a los materiales que hoy en día se emplean.

Un ejemplo de estos avances, es la creación de una familia de hierros denominados por sus siglas en inglés como CADI, los cuales presentan propiedades mecánicas que los hacen altamente competitivos frente algunos aceros con tratamiento térmico, ya que se puede producir en grandes volúmenes y con un menor costo.

Las propiedades mecánicas que presentan los hierro CADI, es una buena resistencia al desgaste y a la abrasión, pero sin sacrificar la tenacidad, esto gracias a que microestructuralmente, presenta una matriz de ausferrita, que proporciona tenacidad, y carburos sin disolver que proporcionan una elevada dureza.

El método empleado para producir una microestructura rica en carburos es con elementos formadores de carburos, tales como cromo, molibdeno, vanadio o titanio. También puede ajustarse el carbono equivalente (CE) para producir fundiciones de composición hipoeutécticas, lo cual promueve la formación de carburos ledeburíticos debido a una menor cantidad de elementos grafitizante (C, Si) en el material. Los carburos producidos por cualquiera de estas dos formas, tienden a disolverse total o parcialmente en el tratamiento térmico posterior, por lo tanto, la obtención de las propiedades mecánicas deseadas dependerá de un adecuado control de la microestructura.

El grado de disolución de los carburos dependerá de sus características (composición química, morfología) y de los parámetros de tratamiento térmico (tiempo y temperatura). Se ha demostrado que los carburos ledeburíticos, producidos ya sea por control del CE o por una elevada velocidad de enfriamiento, son menos estables,

es decir se disuelven más fácilmente, que los carburos aleados producidos por efecto de la micro segregación.

En el presente trabajo se estudia la estabilidad de los carburos que hay en las muestras de dos hierros nodulares aleados con cromo y vanadio, cuando estos son sometidos a un tratamiento térmico de austenizado. Para ello se evaluó la fracción de carburos presentes antes y después del tratamiento de austenizado.

Hipótesis:

El aumento de temperatura y tiempo de austenización promoverán la disolución de carburos en el hierro nodular, ya que se favorecen los procesos difusivos.

El contenido de Cr/V en las piezas estabilizarán un porcentaje de los carburos, por lo que se disolverán en menor medida cuando se aumenta el porcentaje de Cr y V.

La muestra con una menor cantidad de Si (inoculante), tendrá mayor porcentaje de carburos sin disolver.

Objetivo Principal:

Determinar el efecto de la temperatura y tiempo de austenización, así como la composición química, sobre la disolución de carburos durante el tratamiento térmico de austenización en hierros nodulares aleados con Cr/V.

Objetivos Particulares:

- 1) Caracterización del hierro nodular en condiciones de colada (hierro base) para obtener las muestras que se someterán al tratamiento térmico de austenizado.
- 2) Obtener información sobre la estabilidad que proporciona el Cr y el V sobre los carburos presentes en el hierro nodular.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Diagrama de Fases Fe-C y Fe-Fe₃C

Los aceros y los hierros colados son aleaciones principalmente formadas por hierro carbono los cuales se clasificarán dependiendo de la cantidad de carbono presente, así como de las fases y microconstituyentes que lo compongan.

Se considera hierros colados cuando su contenido de carbono es igual o superior 2.11% en peso. Los hierros colados, durante su solidificación, específicamente en la reacción eutéctica, puede sufrir diversas transformaciones las cuales se estudian empleando los diagramas de fases que son el Fe-C(grafito) o estable y el Fe-Fe₃C (Carburo de Hierro) o metaestable que se pueden observar en la **Figura 1**.

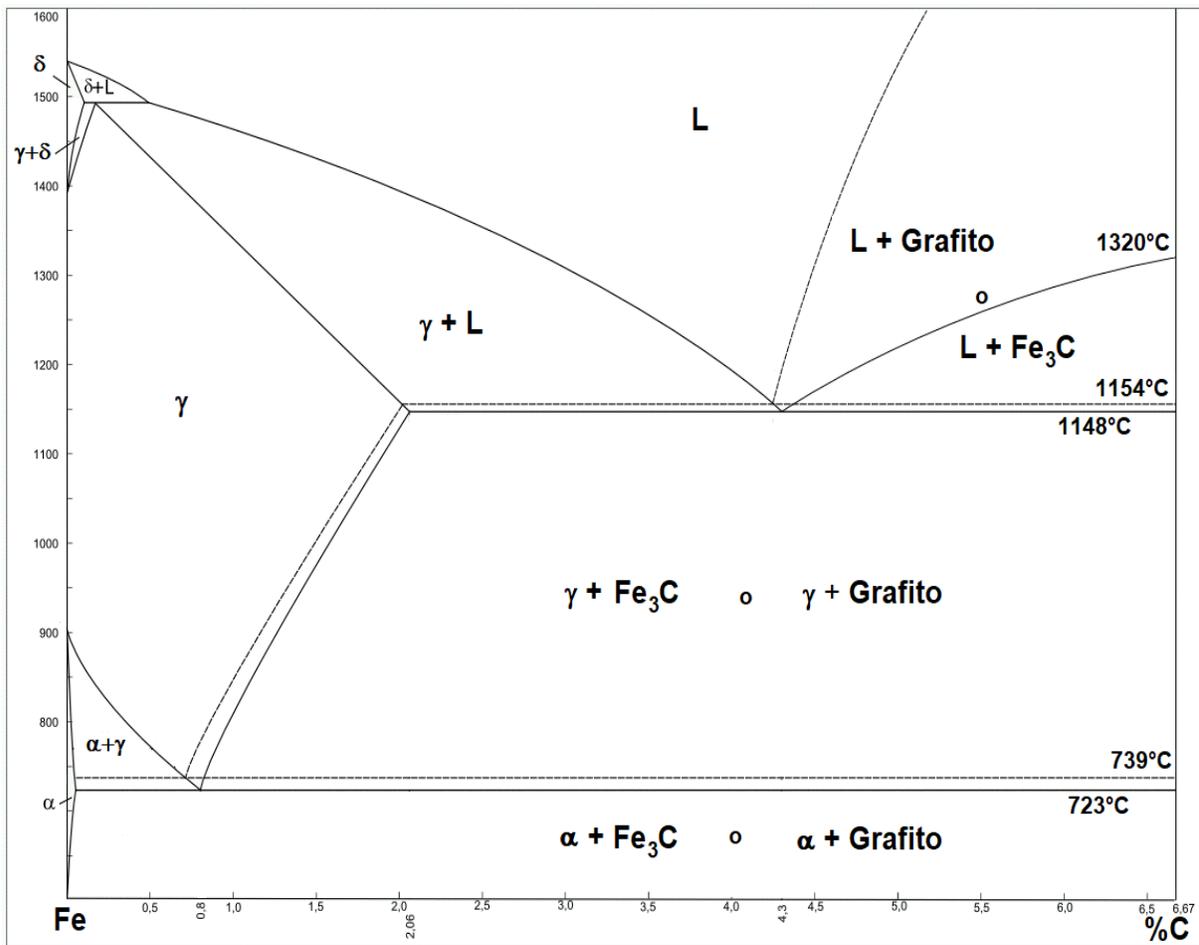


Figura 1. Diagrama de Fases: Fe-C(grafito) [---] y Fe-Fe₃C (Carburo de Hierro [—])^[1]

La formación de eutéctico estable o metaestable está en función de varios factores como velocidad de enfriamiento, composición química, potencial de nucleación, elementos aleantes, etc. Todos estos factores afectan sobre la microestructura final del hierro colado, por lo que se dividirán en familias de hierros, los cuales tienen sus propias características microestructurales y mecánicas. [1]

1.2 Fases y Microconstituyentes Estables y Metaestables.

Se considera fase a una porción homogénea de materia que presenta características físicas, mecánicas y químicas uniformes, así como una estructura cristalina única.

Un microconstituyente son aquellas unidades presentes a nivel microscópico que son formadas a partir de una o más fases (perlita = ferrita + cementita) y que a su vez forman y caracterizan a un material.

En las fundiciones o hierros colados, se consideran estables aquellas fases y microconstituyentes que se forman cuando el comportamiento de la solidificación sigue al diagrama estable Fe-C(grafito) y metaestables cuando siguen el diagrama Fe-Fe₃C. [2]

En el caso del diagrama estable las fases y microconstituyentes son:

Grafito: La aparición del grafito en lugar de cementita en las aleaciones Fe-C, es debida a la inestabilidad del carburo de hierro en determinadas circunstancias y condiciones que hacen imposible su existencia y favorecen la formación del grafito. Las principales circunstancias que favorecen la formación de grafito son, un elevado porcentaje de silicio y un enfriamiento relativamente lento. Experimentalmente se ha comprobado también que la presencia de núcleos en la cristalización en la fase líquida, ejerce gran influencia en la formación del grafito.

Se presenta en estado libre afectando en gran medida las propiedades y características micro estructurales del material, las cuales se ven afectadas también por la morfología que presenta el grafito. Cuando este se presenta en forma de esferoide favorece la resistencia a la fractura, la tenacidad y la elongación.

Ferrita: Se identifica con la letra alfa (α), se considera que esta fase es hierro casi puro, ya que puede contener en solución pequeñas partes de silicio, fósforo y otras impurezas. Cristaliza en un sistema cúbico centrado en el cuerpo, posee aproximadamente una resistencia de 28 kg/mm², 35% de alargamiento y una dureza de 90 HBN. Es el más blando de todos los micro constituyentes y este se encuentra tanto en el diagrama Fe-C como en el de Fe-Fe₃C.

Austenita: Es una solución sólida de carbono que conforma el hierro y puede contener carbono disuelto hasta un máximo del 1.76% cuando se encuentra a la temperatura de 1130°C. Los hierros y aceros contienen Austenita a altas temperaturas, sin embargo, es un microconstituyente inestable a bajas temperaturas.

Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, una resistencia de 88 a 105 kg/mm², y una dureza de 300 HBN y un alargamiento de hasta 60%. [1]

En el caso del diagrama metaestable las fases que se presentan son las siguientes:

Cementita: Es carburo de hierro, contiene 6.67% de carbono y 98.33% de hierro. Es el micro constituyente más duro y frágil de los hierros, su dureza es aproximada a 68 Rockwell C. No es coloreada por los reactivos utilizados normalmente, apareciendo de color blanco brillante.

Forma parte de la perlita, en ese caso se le conoce como cementita eutectoide, y toma la forma de láminas paralelas separadas.

Perlita: Es un microconstituyente eutectoide formado por láminas alternadas de hierro alfa (ferrita) y carburo de hierro (cementita). Es de composición química constante y definida de aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo, que corresponde

a 13.5% de carburo de hierro y 86.5% de hierro, Tiene una resistencia a la rotura de 80 kg/mm² y un alargamiento del 15% aproximadamente.

Ledeburita: Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones aproximadamente a 1147°C, en el momento que termina la cristalización, está formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada, la ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias, debido a que en el enfriamiento se transforma en un arreglo de cementita y perlita (ledeburita transformada). Sin embargo, en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita, por el aspecto eutéctico con que quedan esas agrupaciones de ledeburita transformada. [2]

Para poder diferenciar los distintos tipos de fases y/o microconstituyentes, se pueden observar esquemas como el mostrado en la **Figura 2**.

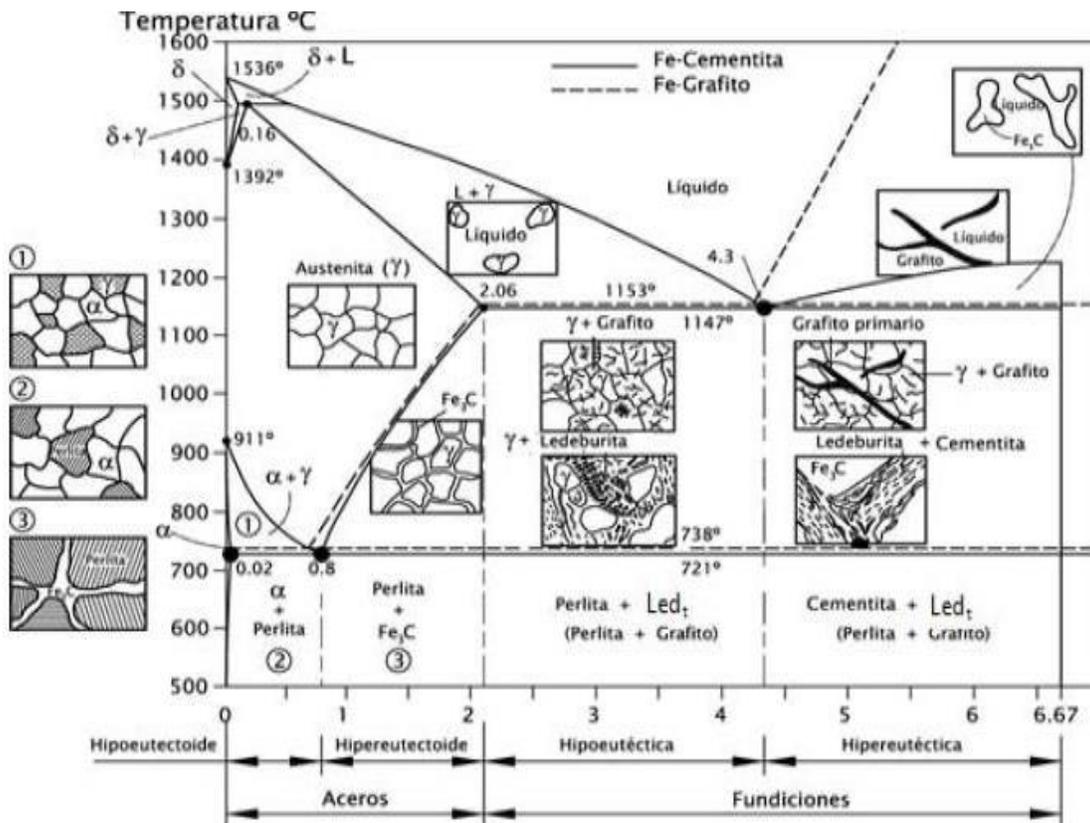


Figura 2. Diagrama estable y metaestable con esquemas de las fases y microconstituyentes, y región en la que se presentan

1.3 Elementos Aleantes.

Los elementos aleantes se adicionan a la fundición con el objetivo de mejorar propiedades, modificar microestructuras o neutralizar el efecto de algún otro elemento dentro de la aleación. Los elementos aleantes que se añaden al hierro suelen agruparse en dos distintos grupos, los grafitizantes y los blanqueadores.

Estos elementos tienen un efecto directo sobre la temperatura eutéctica tanto del diagrama estable como en el metaestable. Dicho efecto se puede observar en la **Figura 3**, donde se clasifican algunos elementos por su capacidad blanqueadora o grafitizante, así como el efecto que tienen sobre la temperatura eutéctica. [4]

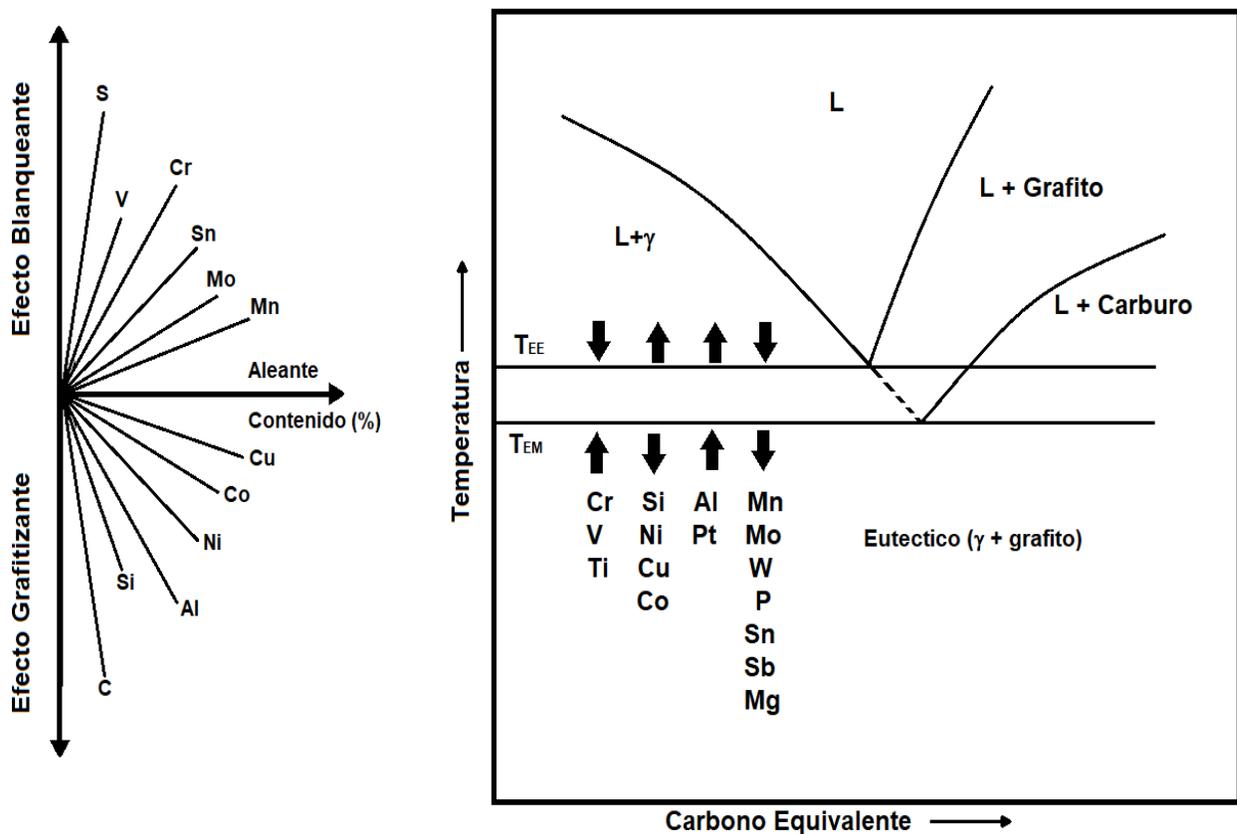


Figura 3. Clasificación de elementos como blanqueadores o grafitizantes y el efecto sobre la temperatura eutéctica en los diagramas estable y metaestable.

Cromo.

Es un elemento alfégeno por lo que aumenta la temperatura de austenización y disminuye la región gama, por lo que la solubilidad del carbono es menor.

Estabiliza la perlita de la misma manera que el manganeso, mediante el aumento de la solubilidad del carbono en la austenita, sin embargo, el cromo en comparación con el manganeso, produce una estructura de perlita fina aumentando así el contenido de Fe_3C de la perlita y suprime la nucleación del grafito.

El cromo segrega durante la solidificación promoviendo la formación de carburo en las últimas zonas que solidifican. Esta formación de carburos por segregación es debido al hecho de que los átomos de cromo pueden sustituir átomos de hierro en el carburo normal de hierro (Fe_3C) y así formar $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ estos carburos formados tienen un enlace atómico muy fuerte con los átomos de carbono. Esta sustitución resulta en un carburo muy estable que, a niveles de cromo en exceso de 0,1%, puede prevenir la disolución del carburo durante el tratamiento de austemperizado y en particular en la etapa de austenización.

Además, el cromo aumenta la templabilidad, número de nódulos y resistencia a la abrasión y como efecto negativo, tiende a favorecer subenfriamientos más severos.

[4][9]

Vanadio.

Combinado con el carbono presente en una aleación de hierro forma partículas de carburo de vanadio (VC o V_4C_3). El vanadio promueve la formación de carburos de hierro, los cuales resultan en un incremento de la formación de hierro blanco en secciones delgadas. Cantidades muy pequeñas de vanadio promueven y estabilizan la estructura perlítica.

El vanadio tiene este efecto debido a que causa un incremento significativo en la temperatura eutéctica metaestable, y una marcada disminución en la temperatura eutéctica estable. La adición de vanadio en el hierro nodular, incrementa la formación

de carburos y los precipitados que genera contribuyen al aumento en la dureza de los hierros CADI.

Puede formar carburo de Vanadio cuya dureza es del orden de 2800 HV la cual es mucho mayor que la de carburos de cromo que llega hasta 1800 HV. La morfología del carburo de vanadio (VC) puede reducir la división de la matriz, que puede ser útil para obtener una dureza superior. Cuando el contenido de vanadio es superior al 4%, se observa la precipitación de carburos secundarios de dispersión de tipo VC en austenita.

Por otra parte, el Vanadio puede refinar la austenita primaria y separar el líquido entre las dendritas en espacios más finos, reduciendo así los espacios donde crecen los carburos. Así mismo los compuestos de Vanadio pueden convertirse en núcleos que favorecen la nucleación de otros carburos acelerando así el blanqueamiento de la fundición.

Tanto el Cromo como el Vanadio, son elementos formadores de carburos, normalmente se desean cuando se requiere la fabricación de una pieza que demanda alta dureza y resistencia al desgaste. Ambos elementos presentan alta afinidad por el C y son capaces de formar distintos tipos de carburos los cuales dependen de la cantidad que se añada de estos elementos en la fundición. Los carburos más usuales son lo tipo M_3C y los M_7C_3 . ^{[5][9]}

Molibdeno.

Es un elemento muy útil para aumentar la resistencia mecánica, esto debido a que ayuda a afinar el grafito y asegura una mejor distribución del mismo. Su acción sobre la matriz es que favorece su temple.

Usualmente se añade en porcentajes de entre 0.35% a 0.55%. Se obtienen mejores resultados cuando el contenido de fósforo esté por debajo del 0.10%, debido a que se forma un complejo de Molibdeno eutéctico con fósforo el cual incrementa el módulo de elasticidad. Los carburos de Molibdeno reducen la ductilidad, resistencia al impacto

y maquinabilidad, estos carburos se forman cuando el Molibdeno presente en la aleación excede el 0.5%, estos carburos son muy estables y difíciles de disolver. [8]

Cobre.

Fortalece la matriz y disminuye la tendencia a formar bordes duros de carburo en las piezas, es un elemento grafitizante, aunque tiene un potencial de grafitización bajo, porcentajes mayores al 2%, puede causar dificultad en la nodularización del grafito.

La adición de 0.5% cobre en hierro gris, puede aumentar el límite elástico y el esfuerzo máximo de cedencia, pero concentraciones más altas la resistencia a la tracción y dureza aumenta de forma proporcional. [8]

Níquel.

Se comporta de manera similar que el cobre, también es un elemento grafitizante y su potencial es mayor que la del cobre, afina las hojuelas de grafito y a la perlita.

Titanio.

Se caracteriza por la gran estabilidad de su carburo y la insubilidad del mismo en la austenita, afina los granos de perlita y estabiliza los carburos formados.

1.4 Hierros Colados o Fundiciones.

Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio que generalmente contienen manganeso, fósforo, azufre, etc. Su contenido en carbono, teórico, va de 1.7 hasta 6.67% en peso, pero en la práctica se emplean contenidos del 2 al 4.5%. El contenido de silicio suele oscilar de 0.5 al 3.5% y el de manganeso de 0.4 a 2%. Los porcentajes de azufre oscilan el 0.01 a 0.20% y los de fósforo 0.04 a 0.80%. Estos valores son de forma general, ya que, para conseguir ciertas características especiales, se pueden emplear cantidades superiores a las mencionadas, así como la adición de elementos aleantes.

Las fundiciones se caracterizan porque las piezas producidas con este material, poseen su forma definitiva directamente por colada, ya que las propiedades generales de los hierros impiden ser deformados plásticamente por procesos de conformado mecánico, como el laminado en frío o caliente.

Algunas ventajas que tiene el hierro colado sobre otros materiales, es que su costo de producción es relativamente bajo cuando se produce en grandes volúmenes, facilidad de producir piezas de gran tamaño, es reciclable, su fabricación exige menos precauciones que la del acero. [3]

En la **Tabla 1** se puede apreciar los elementos químicos y la cantidad en porcentaje en masa que suelen presentar los diversos tipos de hierros.

Tabla 1. Rango de composición química para hierros colados no aleados. [3]

Tipo de Hierro	%C	%Si	%Mn	%P	%S
Gris	2.5 – 4.0	1.0 – 3.0	0.2 – 1.0	0.02 – 1.0	0.02 – 0.25
Vermicular	2.5 – 4.0	1.0 – 3.0	0.2 – 1.0	0.01 – 0.1	0.01 – 0.03
Dúctil	3.0 – 4.0	1.8 – 2.8	0.1 – 1.0	0.01 – 0.1	0.01 – 0.03
Blanco	1.8 – 3.6	0.5 – 1.9	0.25 - 0.8	0.06 – 0.2	0.06 – 0.2
Maleable	2.2 - 2.9	0.9 - 1.9	0.15 - 1.2	0.02 - 0.2	0.02 - 0.2

1.5 Tipos de Hierros Colados

Para facilitar su estudio, los hierros colados se pueden clasificar por la microestructura que estos presentan, dando como resultado la familia de los siguientes tipos de hierros. Cada una de estos grupos de hierros, se caracteriza de acuerdo a la presencia o carencia de grafito, la morfología del mismo y la microestructura que presente la matriz.

Hierro Blanco.

Este tipo de fundición presenta una fractura blanca y su microestructura casi no presenta grafito. La mayoría de las fundiciones blancas contienen del 1.7 al 3% de carbono y del 0.8 al 1.25% de silicio; la mayor parte del carbono se encuentra en la cementita (Fe_3C), la cual provoca que sean muy duros y frágiles. Debido a sus propiedades mecánicas, no son muy empleados, ya que es de difícil mecanizado y muy frágil para fines ingenieriles.

Los hierros blancos se pueden obtener dos tipos de piezas moldeadas. La mayoría son del tipo completamente blanco, obtenidas por moldes de arena, sin embargo, algunas piezas pueden ser sometidas a un tratamiento térmico para convertirlas en piezas de hierro maleable. ^[10]

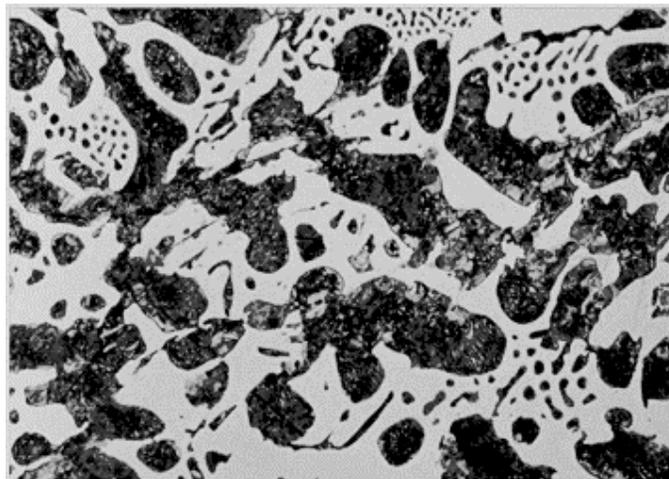


Figura 4. Microestructura típica de los hierros blancos. ^[10]

Hierro Gris.

El carbono se precipita en forma de hojuelas de grafito, este grafito es el que da la coloración gris oscuro a la superficie cuando este se fractura. Las propiedades físicas y en particular las mecánicas varían dentro de amplios intervalos respondiendo a factores como la composición química, rapidez de enfriamiento después del vaciado, tamaño y espesor de las piezas, práctica de vaciado, tratamiento térmico y parámetros

microestructurales como la naturaleza de la matriz y la forma y tamaño de las hojuelas de grafito.

La composición típica para obtener una microestructura con carbono en forma de grafito es de 2.5 a 4 % de carbono y de 1 a 3 % de silicio. El silicio juega un papel importante en diferenciar a la fundición gris de la fundición blanca; esto es debido a que el silicio es un estabilizador de grafito. Esto significa que ayuda a precipitar el grafito desde los carburos de hierro. Otro factor importante que ayuda a la formación del grafito es la velocidad de solidificación de la colada: una velocidad lenta tenderá a producir más grafito y una matriz ferrítica; una velocidad moderada tenderá a producir una mayor matriz perlítica.

La combinación de diferentes factores (nivel de inoculación, velocidad de enfriamiento, elementos aleantes, etc.) hace que el grafito se presente en diversas formas, como se observa en la **Figura 5**. Este cambio en la morfología del grafito, tiene influencia directamente en las propiedades mecánicas de los hierros grises. ^[10]

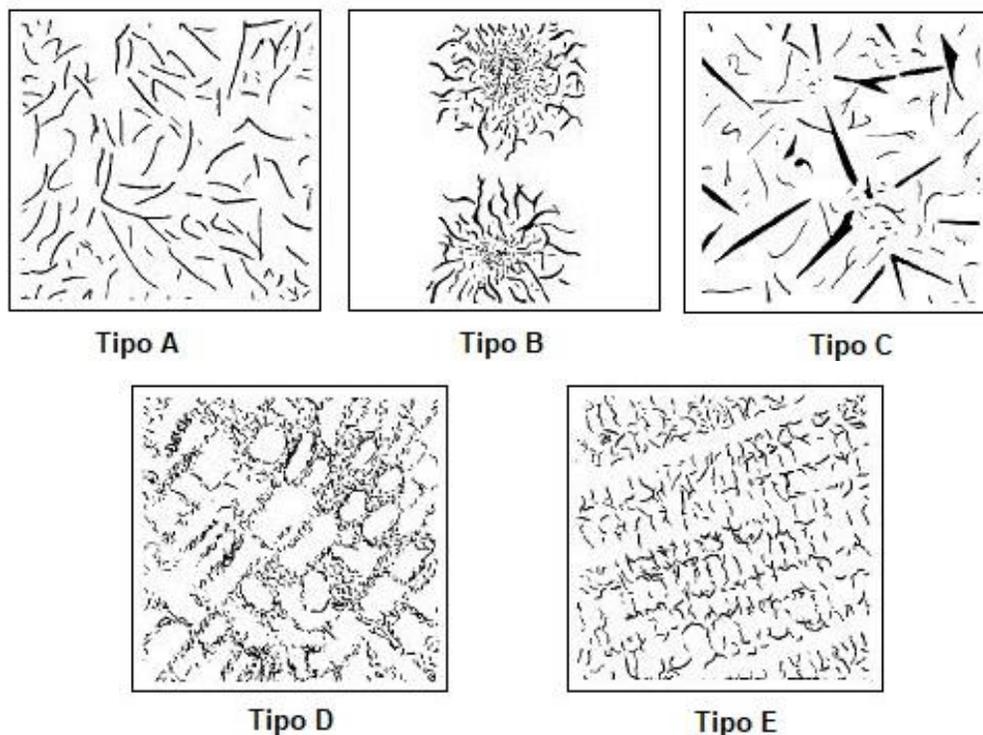


Figura 5. Clasificación del grafito en hierros grises de acuerdo a su morfología. AFS, ASTM A247. ^[11]

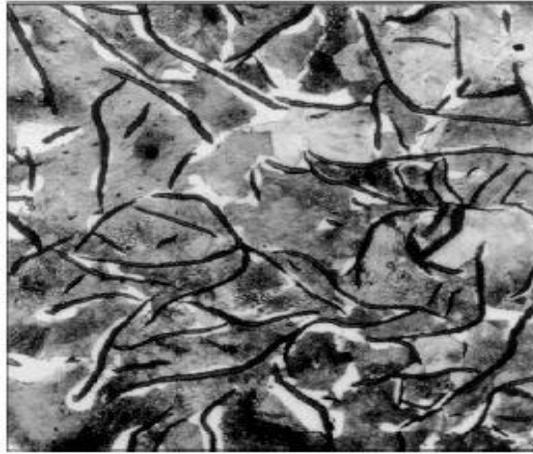


Figura 6. Microestructura de un hierro gris. ^[10]

Hierro Maleable.

Es una fundición de hierro que se obtiene mediante un tratamiento térmico que consta de dos etapas. La primera etapa, llamada grafitización, es llevar las piezas de fundición blanca a temperaturas superiores a los 900 ° C por un período de tiempo prolongado, que está en función de la composición química, estructura y tamaño de la pieza, en una atmósfera neutra para evitar la oxidación, donde se obtiene una descomposición de la cementita, formando austenita y grafito.

El grafito en los hierros maleables se presenta en forma de agregados modulares irregulares que reciben el nombre de carbono revenido o maleabilizado. La matriz final de hierro depende directamente de la segunda etapa, enfriamiento, ya que, dependiendo de la velocidad de enfriamiento, se puede llegar a obtener matriz ferrítica, perlítica o martensítica.

En el caso de un hierro maleable Martensítico, es necesario una tercera etapa, que es el revenido que se realiza a temperaturas de entre 600 y 700°C.

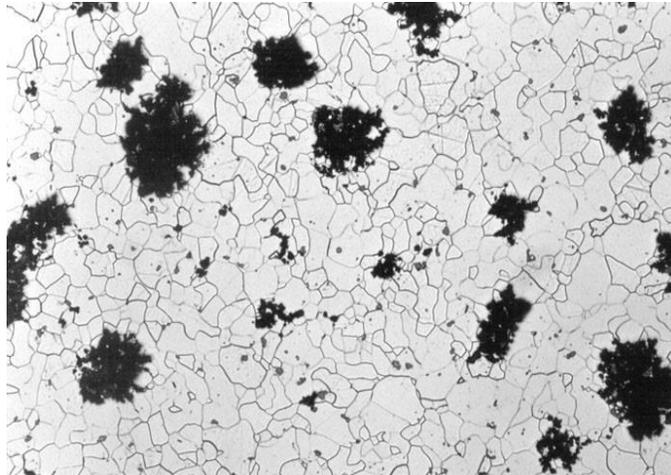


Figura 7. Microestructura de hierro maleable ferrítico. ^[12]

Hierro Vermicular

El hierro vermicular, también conocida como fundición de grafito vermicular o compacto, reúne unas cualidades de elasticidad, resistencia y conductividad térmica intermedias entre la fundición grafitica esferoidal y laminar. Estas propiedades favorecen su utilización en aplicaciones donde es imprescindible la evacuación de calor junto con cierta resistencia y ductilidad, tales como bloques de motor, colectores de escape, discos de freno para aerogeneradores, etc.

Los diferentes grados de vermicularidad depende del balance existente entre los diferentes elementos modificadores de la estructura grafitica (Mg, Ce, S, Ti, Al, O, etc.), la velocidad de enfriamiento y la habilidad para formar núcleos grafiticos.

Otros factores que fomentan la formación de grafito vermicular son:

- Bajo contenido de magnesio activo.
- Tiempo excesivo entre la nodulización y la colada.
- Alto contenido de azufre en el hierro base
- Alta temperatura de nodulización.
- Bajas cantidades de cerio o tierras raras.

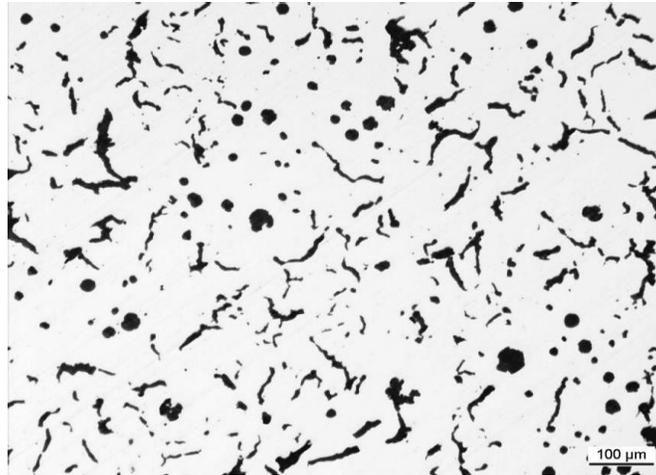


Figura 8. Microestructura de hierro vermicular. [12]

Hierro Nodular o Dúctil.

Hierro gris que se diferencia por la morfología del grafito que se presenta en su microestructura, ya que este se encuentra precipitado en forma de nódulos o esferoides, esto debido a la presencia de elementos aleantes como el Magnesio o Cerio. Como su nombre lo indica, este tipo de hierro se caracteriza por presentar una ductilidad muy superior en comparación a otro tipo de hierros colados. [10]

1.6 Características de los Hierros Nodulares.

La fundición nodular tiene una estructura de colada que contiene partículas de grafito en forma de pequeños esferoides (Grafito Tipo I y II) en una matriz ferrítica, perlítica o combinación de ambas. La aplicabilidad de este tipo de fundición es muy amplia ya que posee, resistencia a la corrosión, bajo precio de producción y una buena maquinabilidad

Para que la fundición presente grafito esferoidal, esta debe contener un porcentaje de Mg residual en el hierro (aproximadamente 0.035%), la presencia de este elemento hace que el grafito al momento de su cristalización, se vaya creando en forma de nódulos y no en forma laminar, que es la que se encuentra en las fundiciones grises.

En caso de que el hierro contenga una alta concentración de azufre hay una etapa previa de “Desulfuración” que tiene el fin de eliminar la mayor cantidad de azufre para evitar que este reaccione y consuma el magnesio al formar sulfuros de magnesio (MgS), lo que disminuiría la calidad y cantidad de nódulos en el hierro.

Para garantizar la homogeneidad de los nódulos, tanto en tamaño como en densidad, se realiza un tratamiento de inoculación al igual que en las fundiciones grises. Esta se realiza mediante la adición de FeSi, con niveles de 0.1 a 0.4%Si, antes de hacer la colada a los moldes. ^[11]

1.7 Tipos de Hierro Nodular y sus Propiedades.

En lo que respecta a la composición química, los hierros nodulares o dúctiles, son similares al hierro gris, aunque con adiciones especiales de magnesio y cerio para provocar la formación del carbono en una forma nodular o esferoidal, y dependiendo de la estructura de la matriz existen los siguientes tipos de acuerdo a la norma ASTM A536:

- Hierro Nodular Ferrítico (Clase 60-40-18)
- Hierro Nodular Ferrítico-Perlítico (Clase 65-45-12)
- Hierro Nodular Perlítico-Ferrítico (Clase 80-55-06)
- Hierro Nodular Perlítico (Clase 100-70-03)
- Hierro Nodular Martensítico (Clase 120-90-02)

- Hierro Nodular Austenítico ASTM A439
- Hierro Nodular Austemperizado (ADI) ASTM A879
- Hierro Nodular Austemperizado con Carburos (CADI), sin designación ASTM.

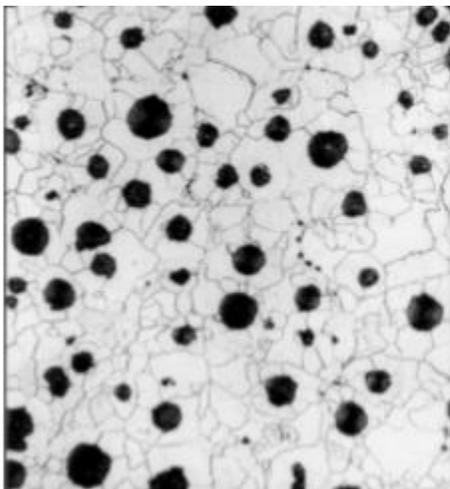
Hierro Nodular Ferrítico

Hierro nodular en donde los esferoides de grafito (grafito tipo I y II) se encuentran inmersas en una matriz completamente ferrita obtenida por tratamiento térmico, lo que le proporciona la resistencia a la tensión más baja y la mayor ductilidad en comparación de las otras variantes de hierro dúctil. Las propiedades más importantes de esta aleación son: ^[11]

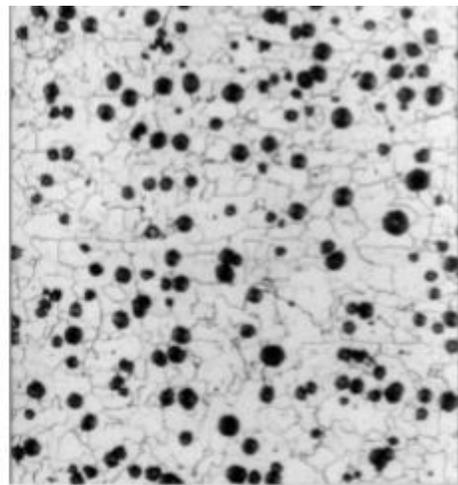
- Alta resistencia al impacto
- Moderada conductividad térmica
- Alta permeabilidad magnética
- En algunas ocasiones, buena resistencia a la corrosión
- Buena maquinabilidad

Tabla 2. Composición química de los hierros nodulares ferríticos. ^[14]

Elemento	%
C	3.30 - 3.80
Si	2.60 - 3.00
Mn	0.20 máx.
Si	0.02 máx.
P	0.10 máx.
Mg	0.04 - 0.07



A)



B)

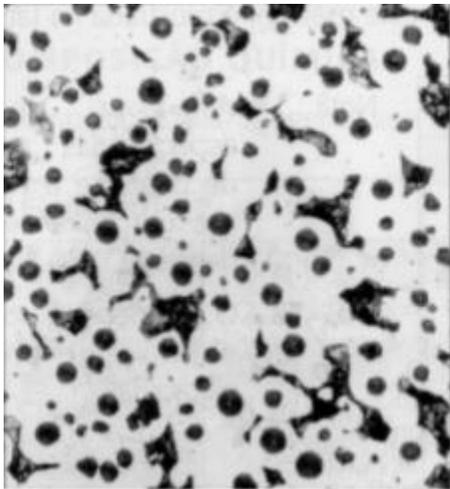
Figura 9. Microestructura típica de los hierros nodulares ferríticos: A) Sección intermedia de la pieza, B) Orillas de la pieza. ^[14]

Hierro Nodular Ferrítico - Perlítico

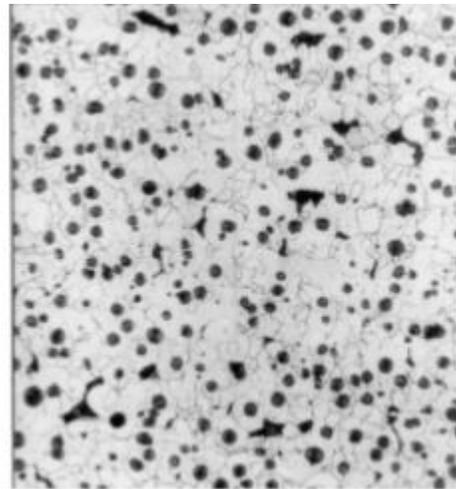
Hierro nodular en donde los esferoides de grafito (tipo I y II) se encuentran inmersas en una matriz ferrítica con un máximo del 25% perlítica, obtenida por tratamiento térmico o directa de la fundición. Lo que le proporciona una excelente maquinabilidad, buen acabado superficial y alta resistencia a las picaduras. ^[11]

Tabla 3. Composición química de los hierros nodulares ferrítico-perlítico. ^[14]

Elemento	%
C	3.30 - 3.80
Si	2.60 - 3.00
Mn	0.20 máx.
Si	0.02 máx.
P	0.10 máx.
Mg	0.04 - 0.07



A)



B)

Figura 10. Microestructura típica de los hierros nodulares ferrítico-perlítico: A) Sección intermedia de la pieza, B) Orillas de la pieza. ^[14]

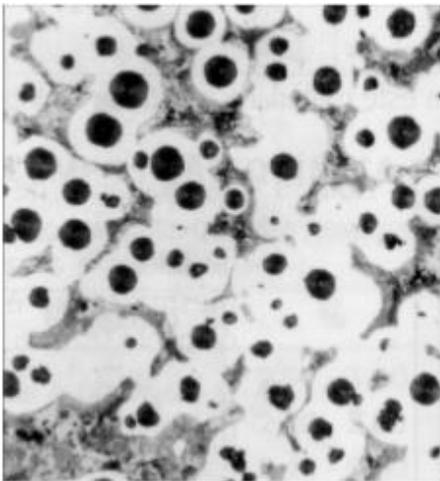
Hierro Nodular Perlítico - Ferrítico

En esta aleación, los esferoides de grafito (tipo I y II) están inmersos en una matriz perlítica – ferrítica. Este tipo de matriz provee un buen acabado superficial, altas propiedades mecánicas y una buena templabilidad, lo cual permite que se pueda emplear en piezas que requieran alta resistencia a la tracción y al desgaste. ^[11]

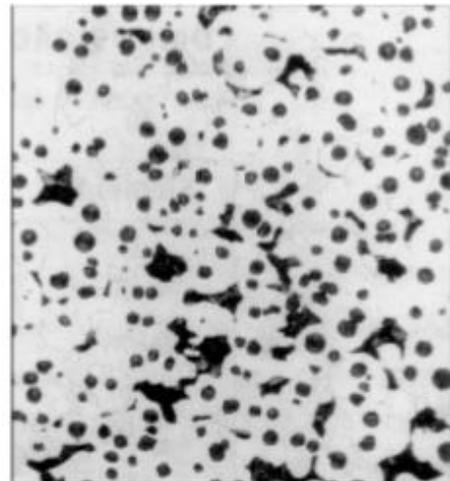
- Buena maquinabilidad
- Menor costo de fabricación de las aleaciones de Hierro Nodular.

Tabla 4. Composición química de los hierros nodulares perlítico-ferríticos. ^[14]

Elemento	%
C	3.30 - 3.80
Si	2.60 - 3.00
Mn	0.20 – 0.65
Si	0.02 máx.
P	0.10 máx.
Mg	0.04 - 0.07
Cu	0.10 - 0.25



A)



B)

Figura 11. Microestructura típica de los hierros nodulares perlítico-ferríticos: A) Sección intermedia de la pieza, B) Orillas de la pieza. ^[14]

Hierro Nodular Perlítico

En esta aleación los esferoides de grafito se encuentran en una matriz de perlita y sus principales propiedades son:

- Relativamente duro
- Alta resistencia a la tensión y cedencia
- Buena resistencia al desgaste
- Moderada resistencia al impacto
- Poca conductividad térmica
- Baja permeabilidad magnética
- Buena maquinabilidad

Tabla 5. Composición química de los hierros nodulares perlíticos. ^[14]

Elemento	%
C	3.30 - 3.80
Si	2.60 - 3.00
Mn	0.20 - 0.65
Si	0.02 máx.
P	0.10 máx.
Mg	0.04 - 0.07
Cu	0.10 - 0.25

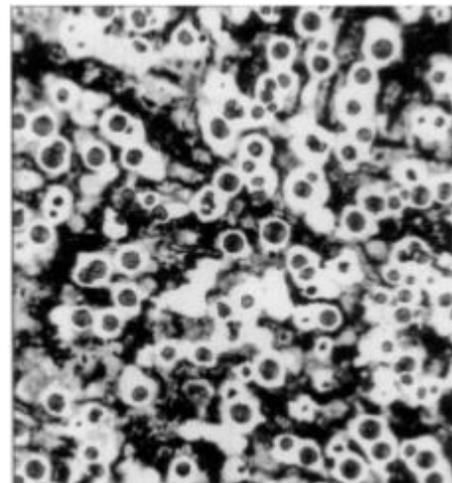
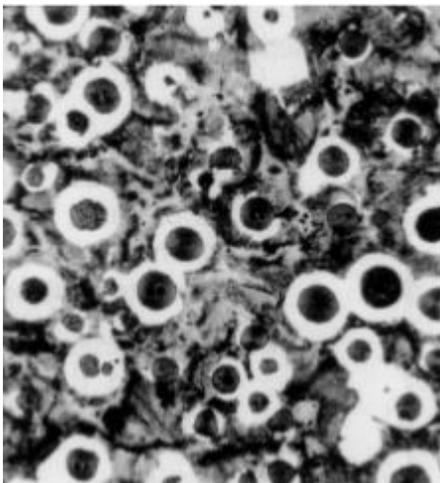


Figura 12. Microestructura típica de los hierros nodulares perlíticos: A) Sección intermedia de la pieza, B) Orillas de la pieza. ^[14]

Hierro Nodular Martensítico

Este tipo de hierro se obtiene por medio de un tratamiento térmico de templado y revenido. La aleación tiene una alta resistencia tanto mecánica como a la corrosión, además de una alta dureza la cual puede tener un rango de 250 HBN (Dureza Brinell) a 300 HBN después del tratamiento de revenido. En comparación a los otros hierros nodulares, es el que posee mayor resistencia a la tensión y la menor ductilidad. [11]

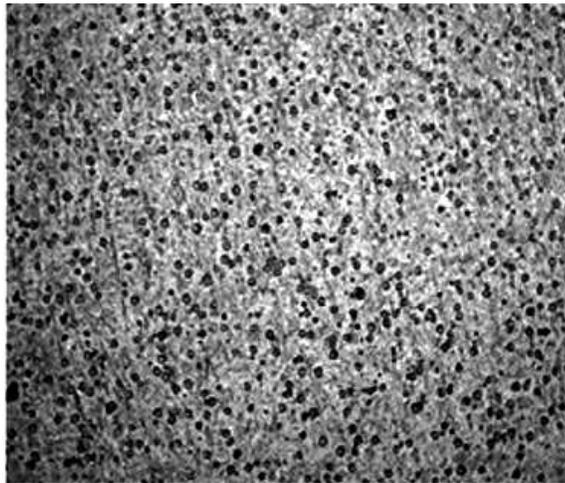


Figura 13. Ejemplo de microestructura de un hierro nodular martensítico. [22]

Los cambios en la composición microestructural de la matriz, ocasiona que la familia de los hierros dúctiles tenga un amplio rango en sus propiedades mecánicas, esto se puede observar en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de los hierros nodulares. [13]

	Grado				
	60-40-18	65-45-12	80-55-06	100-70-03	120-90-02
Resistencia a la tensión, MPa	414	448	552	689	827
Esfuerzo de cedencia, MPa	276	310	379	483	621
Elongación, %	18	12	6.0	3.0	2.0

Hierro Nodular Austenítico

Estos tipos de aleaciones son utilizados por su buena resistencia mecánica, así como por su resistencia a la corrosión, propiedades magnéticas y una alta estabilidad de sus propiedades mecánicas y dimensionales frente a elevadas temperaturas.

Para la obtención de este tipo de hierro, es necesario la adición de elementos aleantes como níquel y cromo. En la norma ASTM A439, se incluyen nueve tipos de hierros austeníticos. Cada uno con su respectiva composición química y sus propiedades mecánicas que se puede observar en la **Tabla 7** y **Tabla 8** respectivamente.

Tabla 7. Composición química de los hierros nodulares austeníticos. ASTMA439. ^[13]

Elementos	Tipo					
	D-2 ^A	D-2B	D-2C	D-3 ^A	D-3A	D-4
	Composición, %					
Carbono, máx.	3.00	3.00	2.90	2.60	2.60	2.60
Silicio	1.50–3.00	1.50–3.00	1.00–3.00	1.00–2.80	1.00–2.80	5.00–6.00
Manganeso	0.70–1.25	0.70–1.25	1.80–2.40	1.00 max ^B	1.00 max ^B	1.00 max ^B
Fosforo, máx.	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Níquel	18.00–22.00	18.00–22.00	21.00–24.00	28.00–32.00	28.00–32.00	28.00–32.00
Cromo	1.75–2.75	2.75–4.00	0.50 max ^B	2.50–3.50	1.00–1.50	4.50–5.50

Elementos	Tipo		
	D-5	D-5B	D-5S
Carbono, máx.	2.40	2.40	2.30
Silicio	1.00–2.80	1.00–2.80	4.90–5.50
Manganeso	1.00 max ^B	1.00 max ^B	1.00 max
Fosforo, máx.	0.08	0.08	0.08
Níquel	34.00–36.00	34.00–36.00	34.00–37.00
Cromo	0.10 max	2.00–3.00	1.75–2.25

^A Adición de 0.7 a 1.0% de molibdeno incrementa las propiedades mecánicas por encima de los 425°C

^B No añadido intensionalmente

Tabla 8. Propiedades mecánicas de los hierros nodulares austeníticos. [13]

	Tipo				
	D-2	D-2B	D-2C	D-3	D-3A
Resistencia a la Tensión, MPa	400	400	400	379	379
Esfuerzo de Cedencia, MPa	207	207	193	207	207
Elongación, %	8.0	7.0	20.0	6.0	10.0
Dureza Brinell (3000 kg)	139–202	148–211	121–171	139–202	131–193

	Tipo			
	D-4	D-5	D-5B	D-5S
Resistencia a la Tensión, MPa	414	379	379	449
Esfuerzo de Cedencia, MPa	...	207	207	207
Elongación, %	...	20.0	6.0	10
Dureza Brinell (3000 kg)	202–273	131–185	139–193	131–193

1.8 Obtención de Hierro Nodular.

El hierro dúctil se produce por medio de un tratamiento de metal líquido, con una composición similar a la utilizada para la fabricación de hierro gris (3.7%C, 2.5%Si, 0.3%Mn, 0.01%S y 0.01%P). El tratamiento consiste en la adición de ferro-aleaciones que contengan elementos nodulizantes (Mg, Ce), es decir, elementos que permitan la formación del grafito en forma esferoidal. [15]

La producción de hierro nodular se puede dividir en 6 etapas:

- Selección del Material de la Carga
- Fusión
- Desulfuración
- Nodularización
- Inoculación
- Colada

1.8.1 Selección de Material de Carga.

Retorno de hierro nodular:

La carga es de aproximadamente el 50% chatarra de hierro nodular, es muy importante que este retorno sea separado de otro tipo de hierros, ya que si esta no es seleccionada de forma adecuada, la base del hierro nodular será contaminada, impidiendo o dificultando la obtención del hierro nodular deseado.

Chatarra de acero:

El nivel de manganeso en el hierro nodular es responsable de la cantidad de perlita presente en la matriz del hierro; la chatarra de acero puede contener de 0.50 a 0.70% de manganeso y deben ser usados en la producción de grados perlíticos como lo son: 80-55-06 y 100 -70-03. Pero si la cantidad de manganeso que presenta de 0.15 a 0.25%, este puede ser usado para producir hierro nodular ferrítico.

1.8.2 Desulfuración.

Es muy importante que el material de carga contenga la menor cantidad posible de azufre, debido a que el magnesio tiene gran afinidad al oxígeno y el azufre, reaccionando con estos elementos para formar MgO y MgS, por lo consiguiente, no se dispondrá de magnesio necesario para la desoxidación del hierro colado y eventualmente para nodularizar el grafito.

Un contenido lo más bajo posible de azufre en la fundición líquida es importante para poder eliminar la escoria del metal líquido, pero a su vez dejar la suficiente cantidad de Mg para la nodularización.

La experiencia demuestra que el bajo contenido de azufre permite escoriar hasta el máximo posible. Los productos de reacción (sulfuros, óxidos y también silicatos) hace mucho más difícil el llenado de moldes y a la vez daña la calidad de piezas fundidas

cambiando las propiedades mecánicas del material colado hasta el extremo de hacer inutilizable la pieza si antes de que solidifique el caldo no se consigue la separación de aquellos. ^[16]

1.8.3 Nodularización

La formación del grafito esferoidal se logra mediante la adición de pequeñas cantidades de magnesio y/o cerio, que se encuentran en forma de ferro-aleaciones como FeSiMg, el cual generalmente se añade para alcanzar un porcentaje residual que ronda el 0.03 y 0.04% en peso de Mg, que es el requerido para que se dé el efecto esferoidizante.

Aunque la adición de estos aleantes no son el único factor que se debe considerar, sino que también depende de la velocidad de enfriamiento, tipo de enfriamiento, y la carga empleada. ^[16]

1.8.4 Inoculación

La inoculación consiste en someter la fundición nodularizada a un tratamiento especial con el fin de evitar que pase parcial o totalmente a fundición blanca e impedir que los nódulos se disuelvan en el baño metálico, desvaneciéndose la acción nodulizante del magnesio.

Este proceso se realiza cada vez que el metal sale del horno en el chorro o en la cuchara, algunos de los inoculantes más empleados son: Ferrosilicio (FeSi), el Ferrosilicio cromo (FeSiCr), el silicato de calcio (CaSiO_3) por mencionar algunos. Un bajo nivel en la inoculación puede provocar que la fundición no presente grafito del tipo I ni II, sino que este se forme en forma de grafito compacto o vermicular. ^[16]

1.9 Caracterización Microestructural de Hierros Nodulares.

Para obtener las características microestructurales de un hierro nodular, es necesario realizar un análisis metalográfico, donde se determinará la calidad metalúrgica del metal obtenido.

Durante este análisis metalográfico, se puede obtener la información del tipo de grafito, nodularidad, densidad y tamaño de nódulos, clasificación de fases y microconstituyentes, así como la densidad de los mismos o porcentajes de las fases presentes.

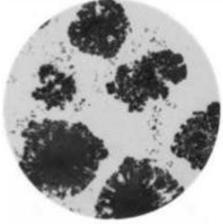
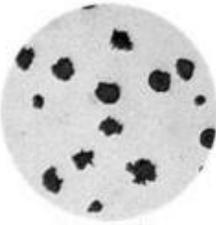
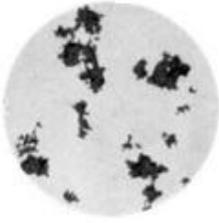
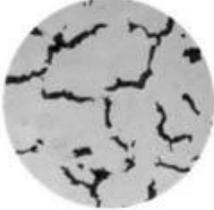
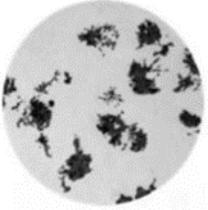
Se recomienda que las evaluaciones o comparaciones que se realicen para la caracterización del material, empleando un aumento total de 100x para el caso del grafito. ^[13]

1.9.1 Tipo de Grafito.

En el caso de los hierros grises la clasificación de la morfología del grafito se realiza en base a la clasificación especificada en la norma ASTM A247, en la cual se muestran 7 tipos de morfologías distintas del grafito, estas se reportan en números romanos (I – VII). Esta clasificación se muestra en la **Tabla 9**.

En el caso de los hierros nodulares, se busca el grafito posea las formas del tipo I y II ya que esta morfología tiene un efecto directo sobre las propiedades mecánicas del material. Además de la forma, otros puntos importantes a considerar es el tamaño, distribución y nodularidad del grafito. ^[11]

Tabla 9. Clasificación del grafito por su morfología. [11]

Tipo	Descripción	Patrón AFS	Tipo	Descripción	Patrón AFS
I	Grafito esferoidal		VI	Nódulos en forma irregular abierta	
II	Grafito esferoidal imperfectamente formado		VII	Grafito en forma de hojuela	
III	Grafito maleabilizado				
IV	Grafito Compacto				
V	Grafito en forma de cangrejo				

Porcentaje de Nodularidad

El porcentaje de nodularidad, sirve para determinar que tanto se aproxima a una forma esférica el esferoide de grafito, en la **Figura 14** se muestran el patrón elaborado por la AFS que se emplean para determinar este porcentaje. ^[19]

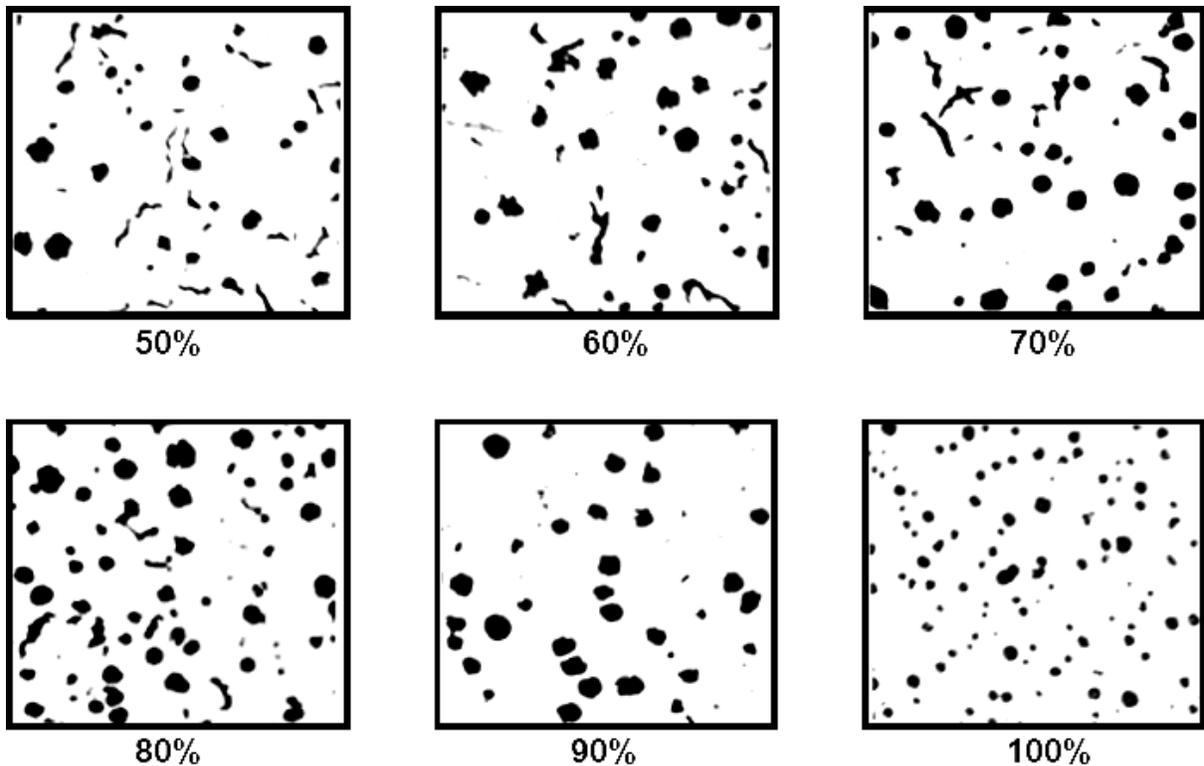


Figura 14. Patrones para la determinación del porcentaje de nodularidad. ^[19]

1.9.2 Tamaño de Nódulo.

El tamaño de nódulo se determina al medir el tamaño máximo del diámetro que este presenta, siendo clasificados desde el tamaño 1 hasta el número 8, la correspondiente medida en mm a aumentos de 100x se muestra en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Dimensión máxima del diámetro del nódulo para determinar su tamaño. ^[19]

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

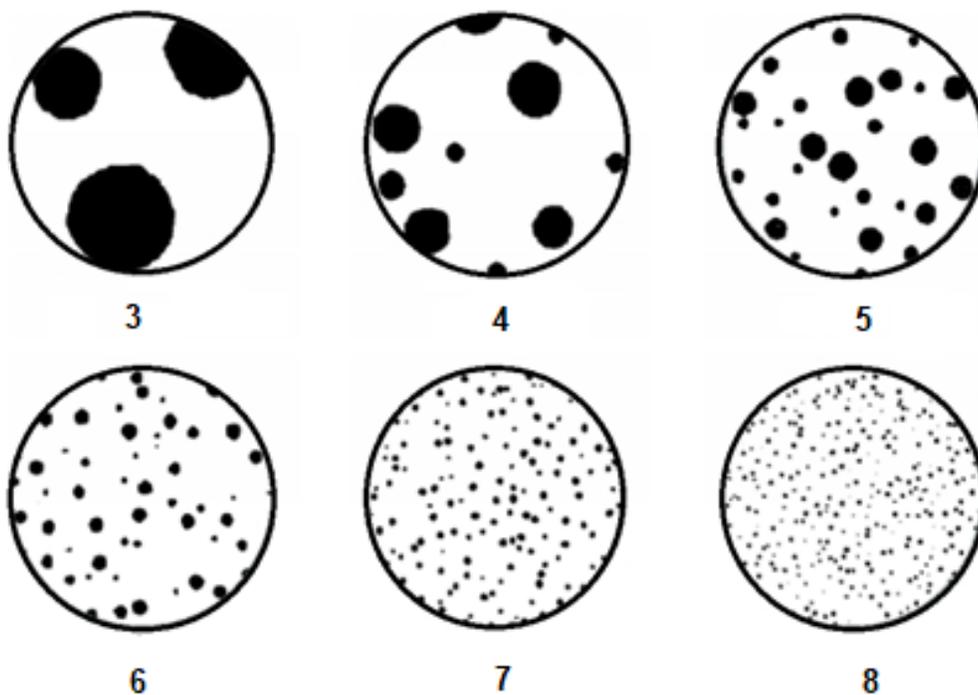


Figura 15. Patrón para la determinación del tamaño de nódulo. ^[19]

1.9.4 Densidad o Conteo de Nódulos

La densidad de nódulos se expresa en nódulos/mm², que igualmente debe realizarse el conteo a un aumento de 100x y comparando con los patrones propuestos por la AFS, los cuales se muestran en la figura 15. ^[19]

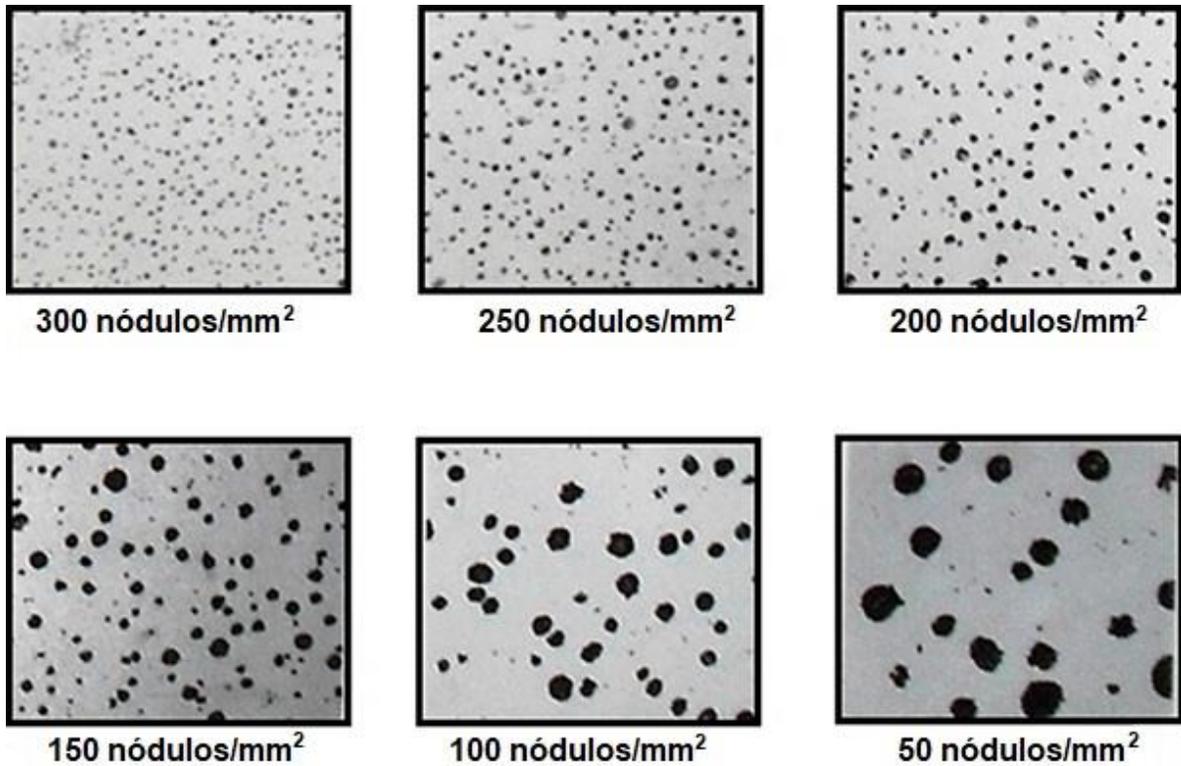


Figura 15. Patrones para determinar la densidad de nódulos. ^[19]

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Hierro Nodular Austemperizado (ADI).

Los hierros dúctiles austemperizados o ADI por sus siglas en inglés (Austempered Ductile Iron), juntos con los hierros nodulares austemperizados con carburos o CADI (Carbide Austempered Ductile Iron), son los desarrollos más recientes dentro de la familia de los Hierros Nodulares y representa a un grupo de aleaciones de Hierro que ofrecen una buena combinación de resistencia mecánica, elevada dureza y resistencia al desgaste.

Adicionalmente, este tipo de aleaciones tiene una excelente capacidad de deformación y alta tenacidad, es por ello que estas aleaciones son utilizadas para reducir el peso y el costo en la fabricación de diversos componentes que demanden dichas propiedades. [23]

2.2 Propiedades Mecánicas de los Hierros Nodulares Austemperizados. (ADI)

Las propiedades relevantes de los ADI son obtenidas por medio de un tratamiento térmico (con un control riguroso de la temperatura y el tiempo del tratamiento) y tiene como objetivo desarrollar una matriz con una estructura de ausferrita con ferrita acicular (60%) y austenita estabilizada (con alto contenido de carbono). La austenita retenida es térmicamente estable a bajas temperaturas, la ventaja de esta característica hace que los ADI sean utilizados en piezas en las que se desea que la dureza del material aumente conforme se van experimentando tensiones de carga locales. Además, los esfuerzos superficiales pueden ser puestos deliberadamente en una pieza antes de entrar en servicio, por ejemplo, se pueden inducir esfuerzos térmicos superficiales en una pieza, con los que se logra obtener una excelente resistencia al desgaste y a los esfuerzos por fatiga, esto se aplica por ejemplo en la fabricación de dientes de engranes o las superficies de rodamiento de los cigüeñales.

[24]

Los ADI tienen las siguientes aplicaciones generales:

Grado 1600-1300; son utilizados básicamente para engranes y aplicaciones donde es necesario tener una resistencia al desgaste.

- Grado 1400-1100-1; se utilizan en piezas donde se sacrifica un poco la resistencia al desgaste, con el fin de aumentar el límite de ductilidad y tenacidad.

En la **Tabla 11**, se presentan las principales propiedades mecánicas de los ADI de acuerdo a la norma ASTM A897

Tabla 11. Clasificación y Propiedades Mecánicas de Hierros ADI. ^[13]

Grado	Resistencia a la Tensión (MPa)	Esfuerzo de Cedencia (MPa)	Deformación (%)	Resistencia al Impacto (J)	Dureza (HBN)^B
850/550/10	850	550	10	100	269-321
1050/700/7	1050	700	7	80	302-363
1200/850/4	1200	850	4	60	341-444
1400/1100/1	1400	1100	1	35	388-477
1600/1300/-	1600	1300	A	A	444-555

2.3 Obtención de un Hierro Nodular Austemperizado.

Para la obtención de un hierro ADI, es importante que el hierro nodular base presente buena calidad metalúrgica, es decir, libre de porosidad, entre el 80 y 90% de nodularidad y un mínimo del 80% de matriz perlítica. ^[24]

2.4 Ciclo de Tratamiento Térmico.

El Hierro Nodular Austemperizado, se obtiene sometiendo el hierro nodular base a un ciclo de tratamiento térmico que consiste en la austenización, enfriamiento y el ciclo de tratamiento térmico de austemperizado, con la finalidad de que al término del ciclo de tratamiento térmico se obtenga una microestructura consistente en ferrita acicular y austenita estable de alto contenido de carbono, llamada Ausferrita. [25]

2.4.1 Austenización

El tratamiento térmico de austenización consiste en calentar la aleación dentro de un rango de temperatura entre 840 a 950°C, con la finalidad de formar estructuras de austenita homogénea. La temperatura elegida para este tratamiento depende de las propiedades mecánicas que se deseen obtener al final del tratamiento, ya que estas varían de acuerdo a la temperatura a la que se realice la austenización, esto se puede observar en la **Figura 16**. [26]

Mientras que el tiempo dependerá de la geometría de la pieza a ser tratada, aunque estudios reportan que tiempos más largos dan beneficio a las propiedades mecánicas finales, ya que al extender el tiempo de austenización, el contenido de carbono aumenta en la austenita, lo cual mueve la curva de TTT a posiciones más bajas, es decir, la microestructura es más propensa que se parezca a una Ausferrita superior, dando un aumento en la elongación y en la resistencia al impacto. Así mismo tiene efecto en la grafitización de carburos residuales, provocando una mejor distribución del carbono en toda la matriz, lo cual puede ser la razón de que se vea un aumento en la dureza y la resistencia al impacto, tal como se observa en la **Figura 17**. [27]

Una vez que se ha seleccionado la temperatura y tiempo de austenización, la temperatura debe ser controlada con una diferencia de +/- 10°C durante todo el tratamiento.

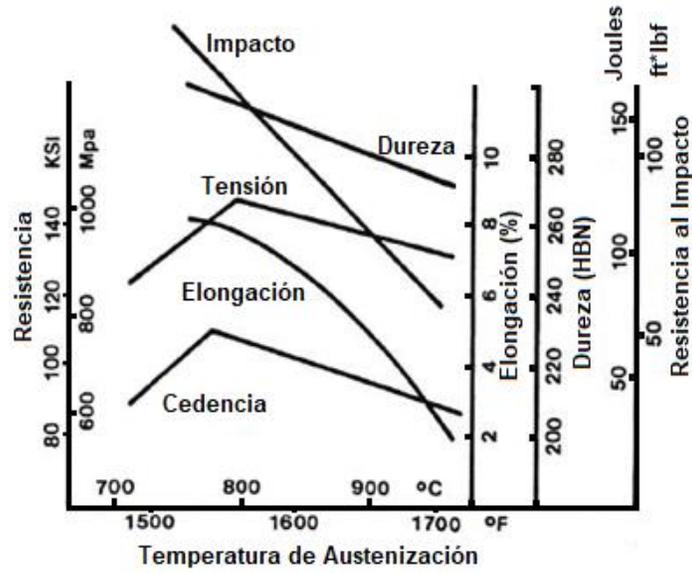


Figura 16. Efecto de la temperatura de austenización en un hierro ADI grado 1. [26]

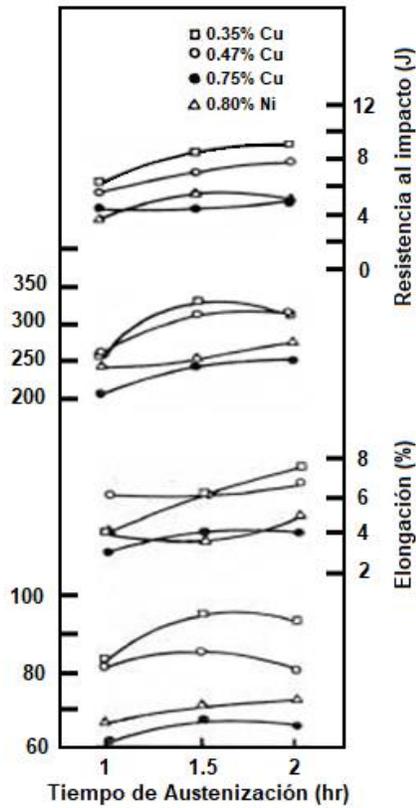


Figura 17. Influencia del tiempo de austenización sobre la elongación y al impacto, en un hierro ADI. Temperatura de austenización 900°C, austemperizado a 350°C por 1 hora. [27]

2.4.2 Enfriamiento

La segunda etapa consiste de un enfriamiento rápido hasta la temperatura de austemperizado. Durante esta etapa deben considerarse los siguientes criterios:

- 1) La rapidez de enfriamiento debe ser suficientemente alta para evitar la formación de perlita
- 2) La temperatura de austemperizado debe alcanzarse en toda la pieza antes de que inicie la reacción de austemperizado (nucleación y crecimiento de ferrita acicular).

La **Figura 18** muestra tres curvas de enfriamiento en las cuales la formación de perlita es evitada (primer criterio), pero las propiedades mecánicas en las tres piezas pueden ser diferentes. En una pieza con la curva de enfriamiento No. 3, las propiedades de resistencia son significativamente más altas que las obtenidas en una pieza con la curva No. 1. [26]

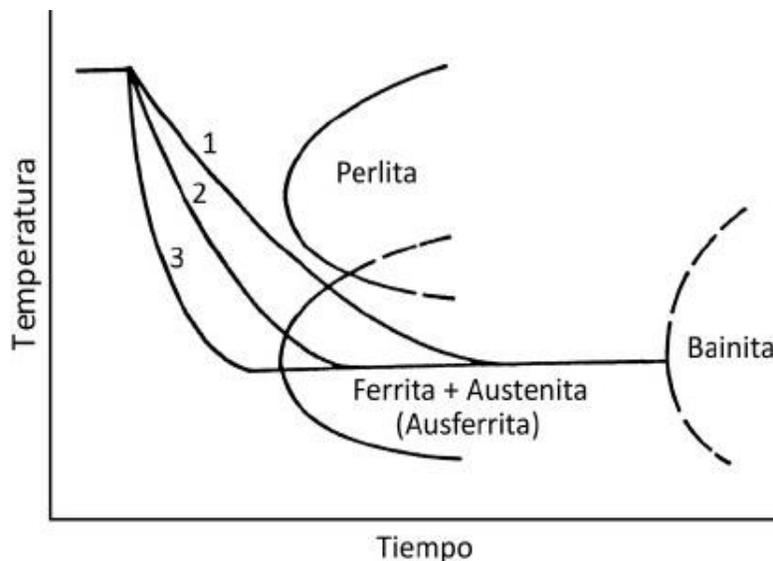


Figura 18. Efecto de la velocidad de enfriamiento, sobre la reacción a la temperatura de austemperizado. [26]

2.4.3 Austemperizado

Una vez la aleación se ha transformado en Austenita homogénea, se transfiere rápidamente al horno de austemperizado, en donde se utilizan diferentes tipos de baños de sales para mantener la temperatura en un rango de 230 a 400°C, en este paso se busca la transformación de la Austenita en Ausferrita. De acuerdo con las propiedades requeridas de la aleación, es como se selecciona la temperatura de austemperizado, aquí el control de temperatura y el tiempo del tratamiento térmico es de suma importancia como se observa en la **Figura 19**. [25]

2.4.3.1 Etapas de la Transformación en Tratamiento de Austemperizado.

En la **Figura 19** se puede apreciar un ciclo típico del tratamiento térmico de austemperizado, en donde la pieza de fundición es austenitizada a una temperatura entre los 850 y 950°C por un tiempo aproximado de 2 horas, posteriormente deberá ser templada en un baño de sal o aceite en un rango de temperatura entre los 300 y 500°C donde deberá mantenerse por el tiempo necesario para lograr la transformación de la austenita en ausferrita. [25]

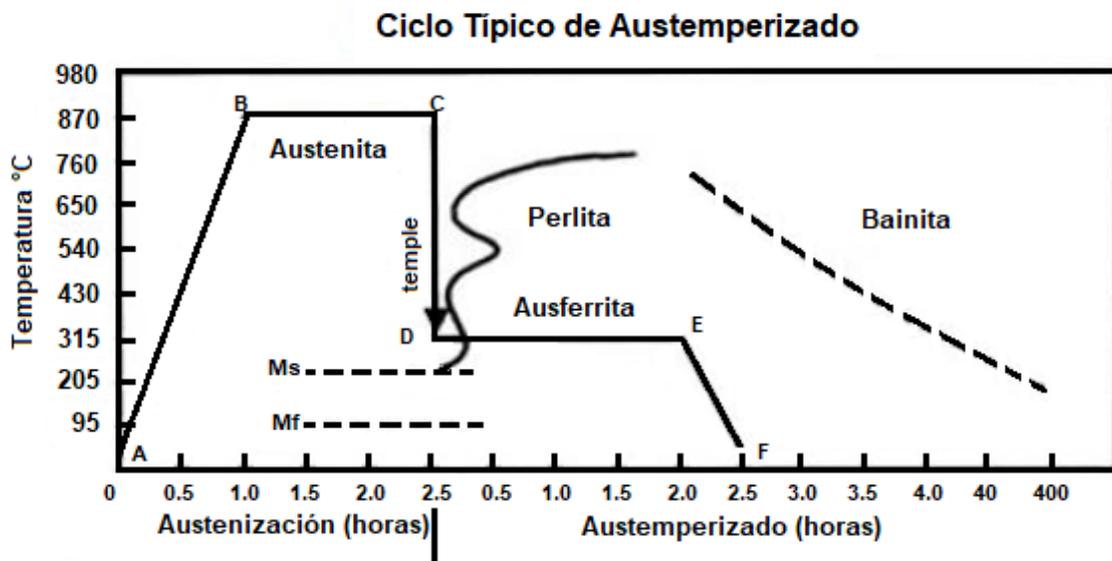
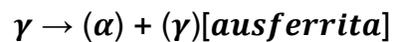


Figura 19. Ciclo típico de tratamiento térmico de austemperizado. [27]

La transformación isotérmica, en el intervalo de temperatura del austemperizado se realiza en dos etapas, en la **Figura 20** se muestra el momento en la que se lleva cada una de las etapas:

- Etapa I (transformación parcial de austenita):



- Etapa II (descomposición de la austenita metaestable):



donde:

γ : austenita homogénea

(α) : ferrita sobresaturada con carbono

(γ) : austenita metaestable con alto contenido de carbono

α : ferrita α + carburos: bainita superior o inferior.

Para obtener una buena matriz rica en ausferrita, es importante que no se lleve a cabo la transformación de la etapa II, por lo que el tiempo de tratamiento está definido por el concepto de ventana de proceso, el cual define el tiempo en el que el material debe estar sometido al tratamiento térmico de austemperizado. [25]

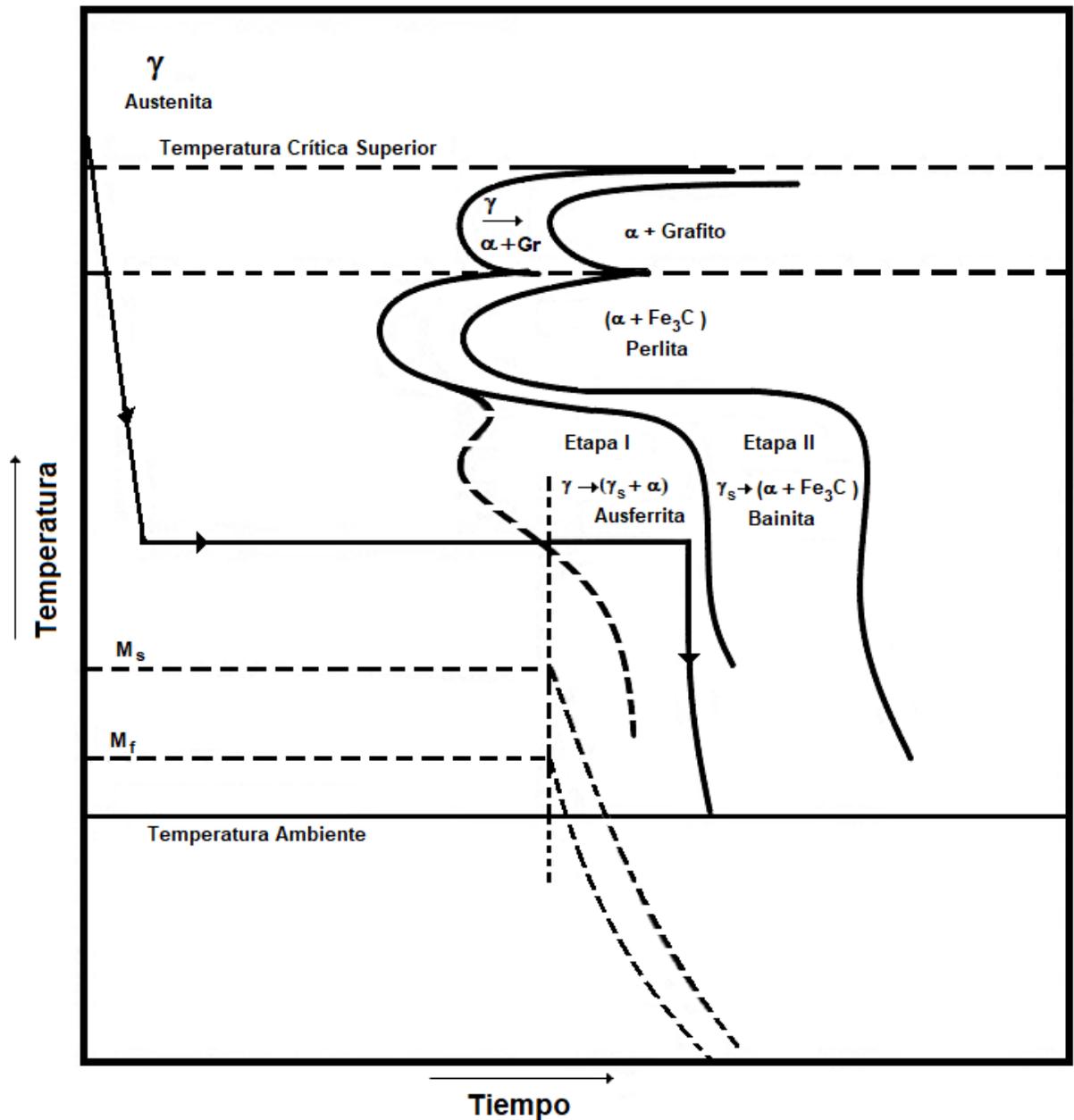


Figura 20. Diagrama del tratamiento de austemperizado, mostrando las etapas de transformación. ^[28]

2.4.3.2 Ventana de Proceso del Austemperizado.

La “ventana de proceso” define el tiempo de austemperizado en el cual se alcanzan las propiedades mecánicas deseadas, en base a la formación de ausferrita. Este intervalo de tiempo es donde se llevan a cabo las etapas I y II de la reacción de

austemperizado. El inicio de la ventana de proceso (tiempo t_1) es definido como el tiempo en el cual la cantidad de austenita de bajo contenido de carbono sin reaccionar ha sido reducida a un 3%, es decir, la cantidad de marténsita que puede formarse a partir de esta austenita metaestable es del 3%. El final de la ventana de proceso (tiempo t_2) se define como el tiempo en el cual el contenido máximo de austenita de alto carbono, ha sido reducido a un 10%, es decir, en la microestructura final permanecerá como mínimo un 90% de ausferrita estable de alto contenido de carbono.

En la **Figura 21** se muestra el efecto de la temperatura de austenización sobre la ventana de proceso para un ADI con la siguiente composición química: 3.5% C, 2.6% Si, 0.48% Cu, 0.96% Ni, 0.27% Mo y 0.25% Mn. [29]

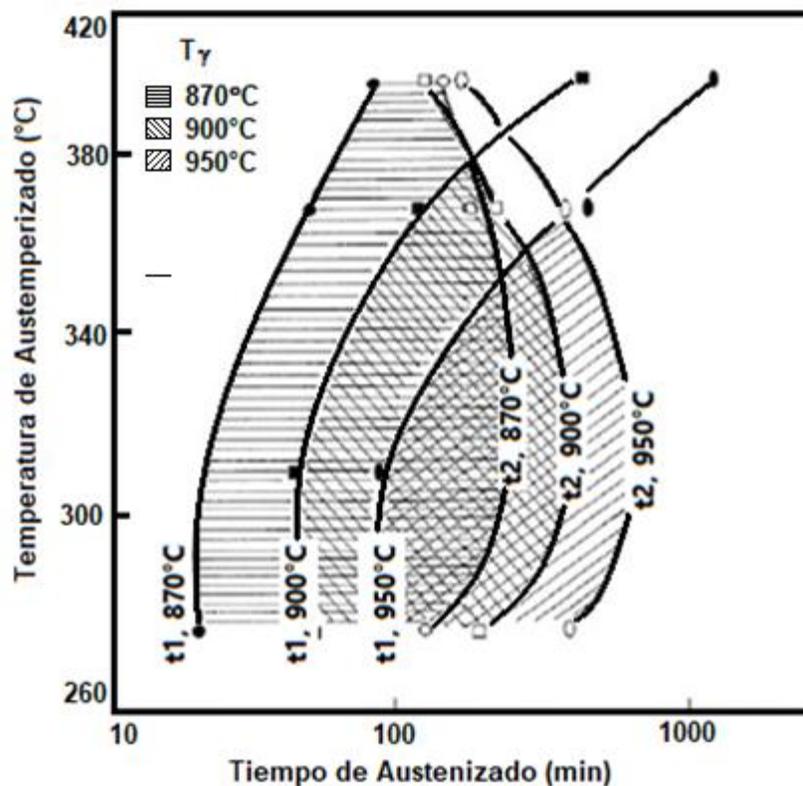


Figura 21. Ventana de proceso para distintas temperaturas de austenización. [29]

La magnitud de la ventana de proceso depende de la temperatura de austemperizado, temperatura de austenización y de la concentración de elementos aleantes.

Las observaciones que se realizan son: para cada temperatura de austenización, la ventana de proceso es relativamente amplia para temperaturas bajas de austemperizado, en las cuales se obtienen grados ADI de alta resistencia. A altas temperaturas de austemperizado la ventana es más estrecha y eventualmente se cierra (existe un traslape entre las etapas I y II). A bajas temperaturas de austenización la ventana de proceso se mueve a tiempos de austemperizado más cortos.

2.4.3.3 Propiedades Mecánicas en Austemperizado a Bajas y Altas Temperaturas.

Las propiedades mecánicas pueden ser explicadas en función de la cantidad relativa de ferrita acicular y austenita estable, así como de la morfología de la ferrita acicular. Altas temperaturas de austemperizado producen una microestructura gruesa consistente de grandes fracciones en volumen de austenita estable y menor ferrita acicular, resultando en baja resistencia y alta ductilidad. El austemperizado a bajas temperaturas produce grandes fracciones en volumen de ferrita acicular y bajas cantidades de austenita estable, resultando en alta resistencia y baja ductilidad, esto se observa mejor en la **Figura 22**. [26]

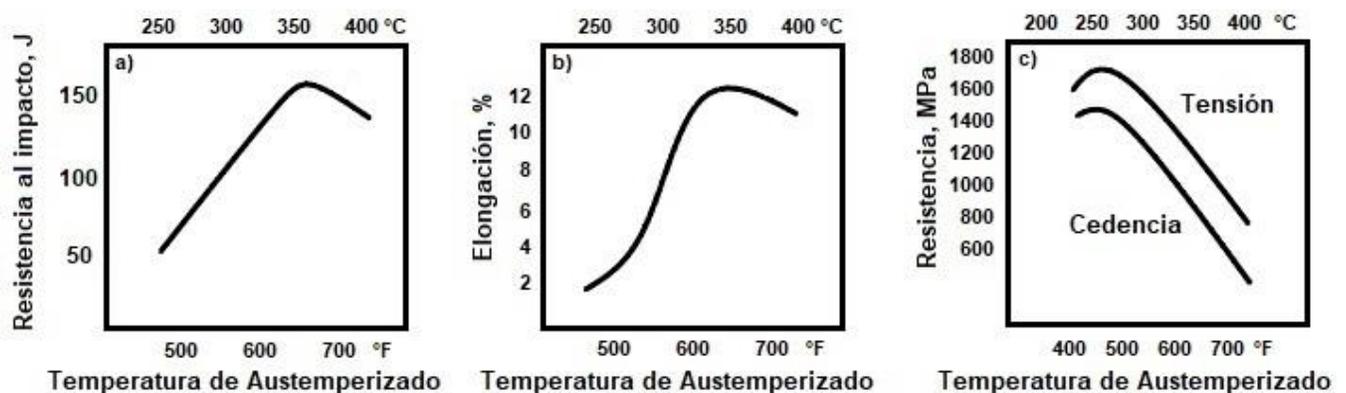


Figura 22. Efecto de la temperatura de austemperizado sobre: a) Resistencia al impacto, b) % de Elongación y c) Resistencia a la Tensión y Cedencia. [26]

2.5 Aplicaciones de Hierro Nodular Austemperizado.

A continuación, en la **Tabla 12**, se muestran algunas de las aplicaciones típicas del Hierro Nodular Austemperizado en la industria automotriz, en la que se señala las ventajas al emplear este tipo de material, con respecto al material sustituido. ^[30]

Tabla 12. Ejemplos de materiales reemplazados por el hierro ADI en diversos tipos de componentes. ^[30]

Nombre de la Pieza	Material reemplazado	Ventajas	Imagen
Engranajes axiales (transmisión)	<ul style="list-style-type: none"> Acero Forjado 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor Producción Menores costos Mejor maquinabilidad Operación más silenciosa Reducción de peso 	
Engranajes de tiempo de Motor Diesel	<ul style="list-style-type: none"> Acero 1022 Forjado 	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del 30% en costos 	
Cigüeñal	<ul style="list-style-type: none"> Acero Forjado 	<ul style="list-style-type: none"> Menor costo Mayor resistencia a la fatiga Mayor Durabilidad Reducción de peso 	
Disco de Embrague	<ul style="list-style-type: none"> Acero Aluminio 	<ul style="list-style-type: none"> Menor Costo Menor Peso Mejor resistencia al desgaste 	
Engranajes de caja de transmisión	<ul style="list-style-type: none"> Acero Forjado 	<ul style="list-style-type: none"> Menor costo de producción Operación silenciosa Reducción de peso 	

2.6 Hierros Nodulares Austemperizados con Carburos (CADI).

Como su nombre lo indica, los hierros CADI, son una variación de los hierros ADI con la diferencia de que contiene carburos, lo cual modifica además de su microestructura, sus propiedades mecánicas mostrando un aumento en la dureza y resistencia al desgaste en comparación a los hierros ADI. El aumento de la resistencia al desgaste con relación a su dureza, se ve aumentada con forme se aumenta la cantidad de carburos presentes en la microestructura final, esto se observa en la **Figura 23**.^[29]

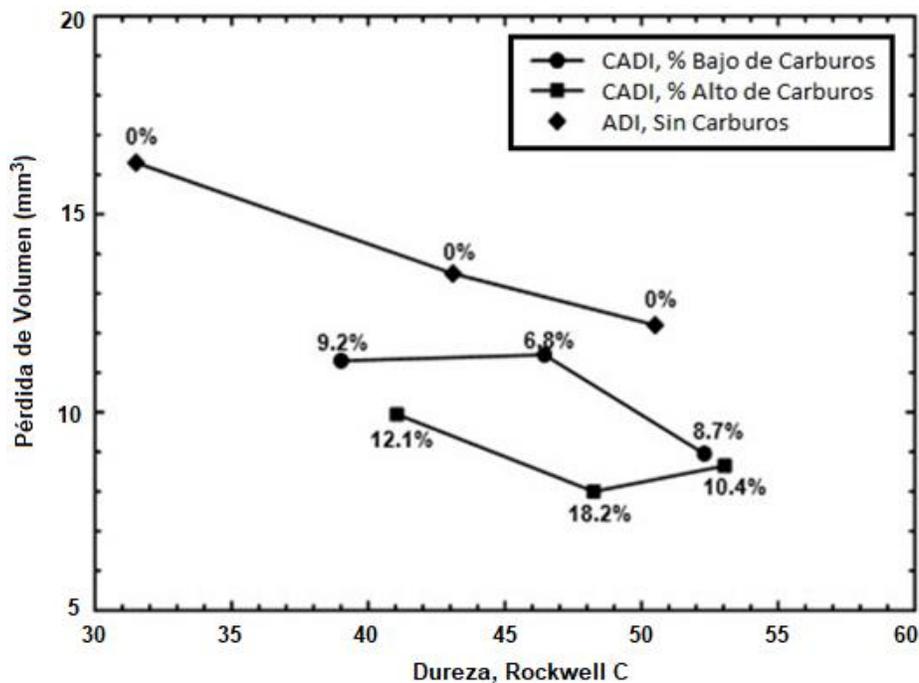


Figura 23. Resistencia al desgaste y dureza de los hierros CADI comparada con la resistencia de los hierros ADI^[29]

El hierro CADI fue introducido a principios de los años 90 para producir componentes con una mejor resistencia al desgaste que el hierro ADI con un precio y diseño competitivo respecto a los hierros y otros aceros comerciales resistentes a la abrasión. Una de sus primeras aplicaciones fue realizada por una empresa manufacturera de componentes para maquinaria agrícola, la cual desarrolló un proceso de fundición que

permitió producir un hierro fundido con una mezcla de grafito esferoidal, ausferrita y carburos, las propiedades mecánicas resultantes principalmente fueron resistencia al desgaste y además de una dureza adecuada que permitía una alta resistencia a los impactos con rocas. [35]

2.7 Formación de Carburos para Obtención de Hierros CADI.

Para la producción de los hierros CADI, es importante que el hierro nodular base presente un porcentaje entre el 4.5 y el 6.5% de carburos y que estos no se disuelvan durante la austenización ni el austemperizado.

Los carburos más estables o carburos aleados, se obtienen mediante la adición de elementos aleantes capaces de estabilizarlos, tales como el Cromo, Vanadio, Molibdeno y/o Titanio, pero así mismo se puede optar por el ajuste de elementos grafitizantes y/o aumentarse el grado de subenfriamiento para fomentar la formación de carburos ledeburíticos, aunque este tipo de carburos no aleados suelen ser menos estables y tienden a disolverse más fácilmente en la etapa de austenización. Estos procesos implican emplear composiciones hipoeutécticas que complican el proceso de llenado de los moldes. El grado de disolución o estabilidad de los carburos depende de sus características químicas y morfológicas, así como de los parámetros del tratamiento térmico. [34]

El efecto que tienen principalmente los elementos estabilizadores de carburos, es reducir el intervalo de temperatura entre los eutécticos estables y metaestables, lo cual promueve la solidificación siguiendo el diagrama metaestable. Igualmente, cuanto menor sea la velocidad de enfriamiento, tanto mayor será el efecto de la micro segregación, **Figura 24**, la cual da lugar al enriquecimiento en elementos formadores de carburos en las últimas regiones en solidificar y por ende se promoverá la formación de carburos muy aleados, que varían de tamaño, composición y morfología, de acuerdo a las características de la aleación, tamaño de pieza y proceso de fabricación.

[35],[32]

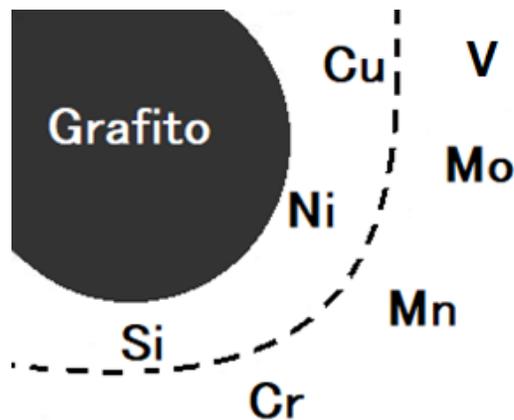


Figura 24. Segregación de los elementos estabilizadores de Carburos, que se concentran en mayor medida a bajas velocidades de enfriamiento. ^[36]

2.8 Ventajas y Desventajas de los Hierros CADI

Las principales ventajas del hierro CADI son:

- Tiene mayor resistencia al desgaste que el ADI Grado 5 y que algunos aceros templados y revenidos.
- Es más económico en comparación con el hierro blanco con 18% Cr utilizado en componentes que demandan elevada resistencia al desgaste denominado Ni-Hard.
- No es costoso el proceso de manufactura, en obtener el hierro nodular con carburos para posteriormente obtener CADI.

Desventajas:

- Tiene limitada maquinabilidad.
- El costo puede incrementarse cuando el hierro base se fabrica mediante la adición de aleantes caros, como el molibdeno.
- Necesita de un estricto control del tratamiento de austemperizado para evitar la disolución de los carburos. ^[30]

Capítulo 3

Desarrollo Experimental

Desarrollo Experimental

Para el desarrollo experimental se contó con 2 piezas de hierro nodular con carburos, que fueron identificadas como pieza A y B, estas fueron previamente fabricadas en el laboratorio de fundición, del Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

En la **Tabla 13** se presenta la composición química de las piezas de llegada con las que se llevó a cabo este trabajo.

Tabla 13. Composición Química de las Piezas de Llegada.

% masa	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mg	C.E.
Pieza A	3.909	2.453	0.553	0.0254	0.0263	1.881	0.0458	0.3224	0.4087	0.0647	4.73
Pieza B	3.745	2.263	0.564	0.0189	0.0124	1.512	0.0353	0.3517	0.4513	0.055	4.48

❖ Los niveles de inoculación en las piezas A y B son 0.12% y 0.03% respectivamente, las cuales fueron inoculadas con aleación. FeSi75.

La primera etapa consistió en caracterizar microestructuralmente a las piezas A y B.

La segunda etapa, en la que se centra más este trabajo, es la evaluación del % de carburos que se han disuelto durante el del tratamiento térmico de austenización.

3.1 Muestreo de las piezas para la primera etapa.

Para la realización de la caracterización microestructural del material fue cortado para obtener 5 muestras, **Figura 25**.

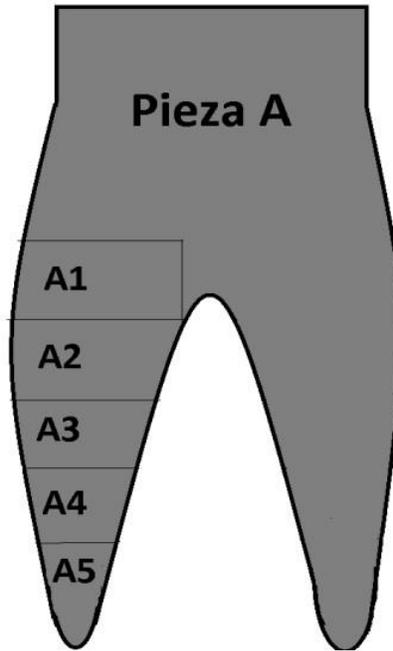


Figura 25. Secciones en las que se realizaron los cortes de las piezas A y B, para obtener las muestras de la primera etapa 1.

A cada una de las muestras resultantes por los cortes, se les indicó como A1, A2, A3, A4 y A5. De igual manera se obtuvieron las 5 muestras de la pieza B, como B1, B2, B3, B4 y B5.

3.2 Muestreo de las piezas para la segunda etapa.

Para la segunda etapa del desarrollo experimental, la parte superior de las piezas A y B, fueron cortadas para obtener 10 muestras aproximadamente todas del mismo tamaño, **Figura 26**.

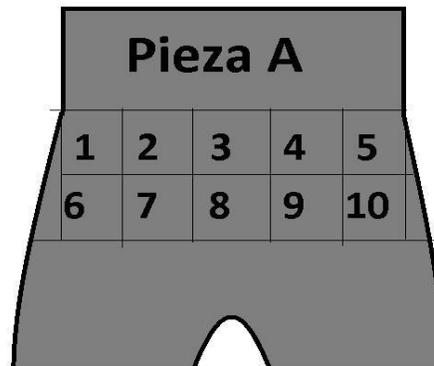


Figura 26. Toma de muestras para la segunda etapa del desarrollo experimental.

Para su identificación, estas muestras se etiquetaron indicando la pieza de la que provienen, el tiempo y temperatura de tratamiento de austenización al que fueron sometidos, de acuerdo al siguiente ejemplo:

Muestra A_20_850: Indica que es muestra proveniente de la pieza A, sometida a 20 minutos de tratamiento de austenización a una temperatura de 850°C.

3.3 Preparación metalográfica.

- 1.- Cada muestra se desbasta desde la lija número 80 hasta la lija 600.
- 2.- Pulido en un paño fino empleando como abrasivo alúmina de 0.3 micras.
- 3.- Una vez que la pieza queda con acabado espejo, se enjuaga, se seca con aire y se observa a microscopio óptico a 100x y se toma imagen.
- 4.- Utilizando los patrones de la American Foundrymen's Society (AFS), se lleva a cabo la caracterización del grafito (tipo, tamaño, densidad de nódulos y % de nodularidad).
- 5.- Cada muestra se atacó con Nital 2 para identificar los microconstituyentes de la matriz, con especial atención en los carburos presentes.
- 6.- Se observa cada pieza en el microscopio óptico para ver que se haya atacado correctamente y se toma fotografías a 100x en diferentes zonas, como se muestra en la **Figura 27**.
- 7.- Para poder realizar el conteo de los carburos se oscureció la microestructura atacando con la solución; 4%HF, 10%HNO₃ y agua destilada en relación volumen/volumen. Se cuantifico los carburos empleando el software, Image Pro Plus.

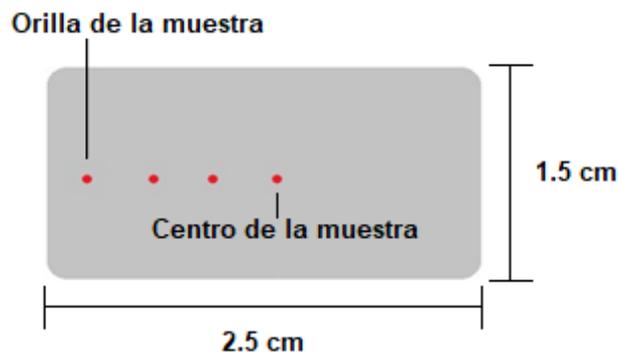


Figura 27. En cada una de las muestras, se tomó fotografías en zonas cercanas a la orilla, al centro y dos puntos intermedios.

3.4 Tratamiento de Austenización

Se realizaron los siguientes pasos:

- 1.- Primero se formaron 2 grupos de 10 muestras, 5 provenientes de la pieza A y 5 de la pieza B, a las cuales se evaluó el % de carburos para seleccionar aquellas que posean un % de carburos similar.
- 2.- Se tomó uno de los grupos, y se austenizaron a una temperatura de austenización de 850°C en una mufla, después de alcanzar la temperatura de tratamiento, se dio un tiempo de permanencia de 20, 40, 60, 80, y 100 minutos retirando 2 piezas respectivamente, una de las muestras A y otra de las muestras B, y enfriándolas en agua a temperatura ambiente.
- 3.- Se repitió el procedimiento anterior para el segundo grupo de muestras, tomando los mismos tiempos de permanencia, pero cambiando la temperatura de austenización a 950°C.

3.5 Determinación de Carburos Disueltos.

Para determinar el % de Carburos disueltos se empleó la siguiente expresión.

$$\% \text{Carburos disueltos} = 100\% - \left[\frac{(\% \text{Carburos Residuales} * 100)}{\% \text{Carburos Originales}} \right]$$

Ejemplo de cálculo, suponiendo que la muestra tuviera originalmente 20% de Carburos y al finalizar el tratamiento esta presentara únicamente el 17% de ellos.

$$\% \text{Carburos disueltos} = 100\% - \left[\frac{(17\% * 100)}{20\%} \right] = 15\% \text{ Carburos Disueltos}$$

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Caracterización de las piezas de llegada

Durante la caracterización de las piezas, se encontró que estas carecen de homogeneidad microestructural, ya que presentan variaciones tanto en la densidad como en el tamaño de los nódulos.

En cuanto a tamaño de nódulo, de acuerdo a AFS, la mayoría se encuentran en un rango entre el tamaño 6 al 8 (4mm a 1mm), sin embargo, en varias secciones se pueden localizar nódulos de tamaño 5 (8mm) inclusive hasta 4 (16mm). Este tipo de variaciones no únicamente se presentan en la pieza A, observar **Figura 28**, sino que también en la pieza B, **Figura 29**, aunque con una clara disminución en la cantidad de carbono grafito, debido al menor nivel de inoculación de esta pieza.

La **Tabla 14**, muestra el rango de valores que se encontraron en 5 secciones diferentes de las piezas. En cuanto a tipo de grafito, % grafito, % nodularidad, densidad de nódulos y % de carburos.

En algunos apartados presentan rangos muy amplios, lo que hablan de una falta de homogeneidad en ambas piezas. Estas variaciones pueden deberse a consecuencia de un mal tratamiento de metal líquido o los niveles de inoculación son muy bajos para la composición química que presentan las piezas.

Tabla 14. Reporte de las características del grafito en las piezas.

Pieza	Tipo de Grafito	% Grafito	% Nodularidad	Densidad (nódulos/mm²)	% Carburos
A	I y II	1.5 - 5	60 - 80	25 - 40	18 - 23
B	I y II	4.0 - 8	70 - 80	50 - 70	15 - 20

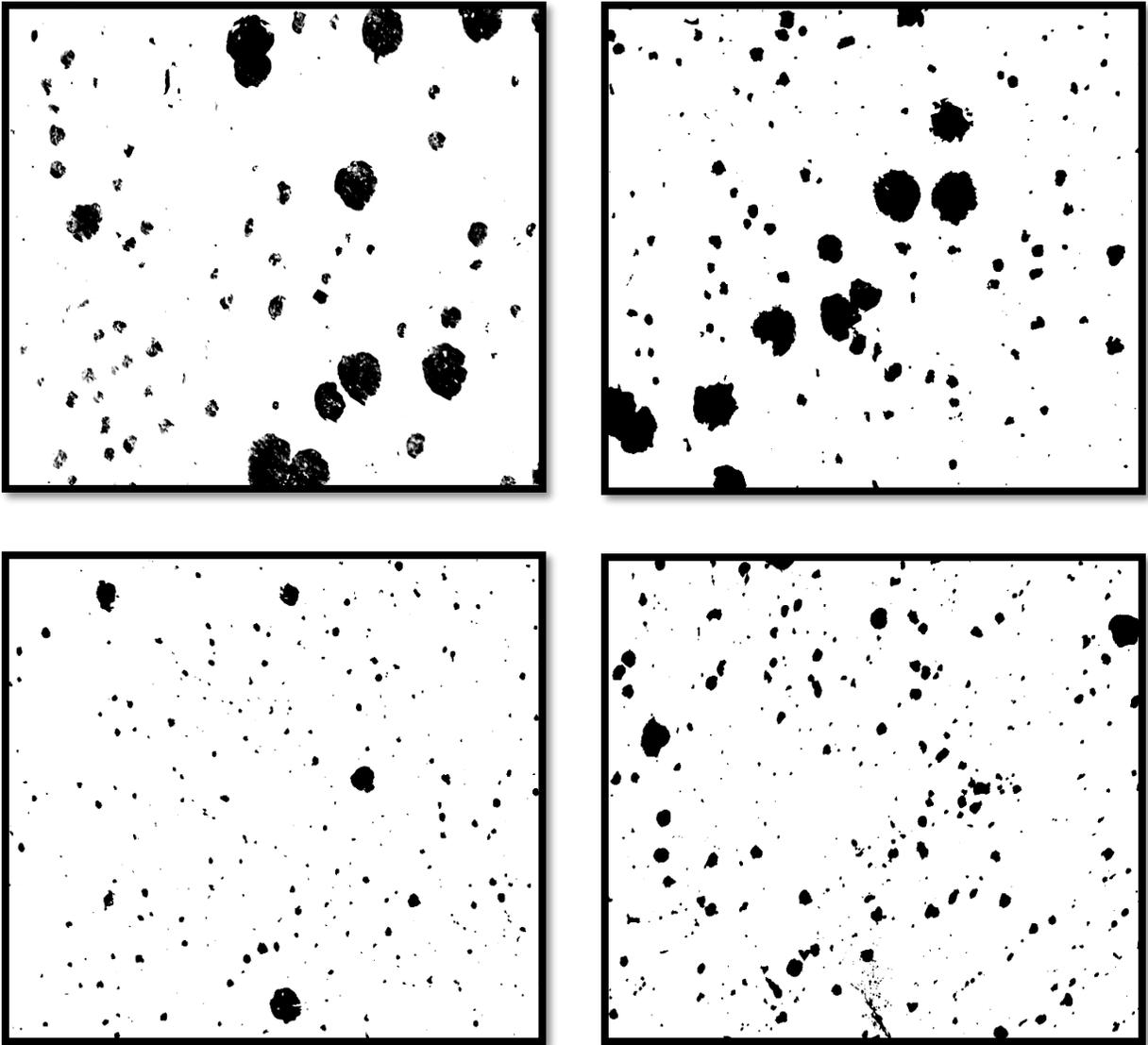


Figura 28. Variaciones en la densidad y tamaños de los nódulos en la pieza A (0.12% inoculación) en diferentes zonas a 100x.

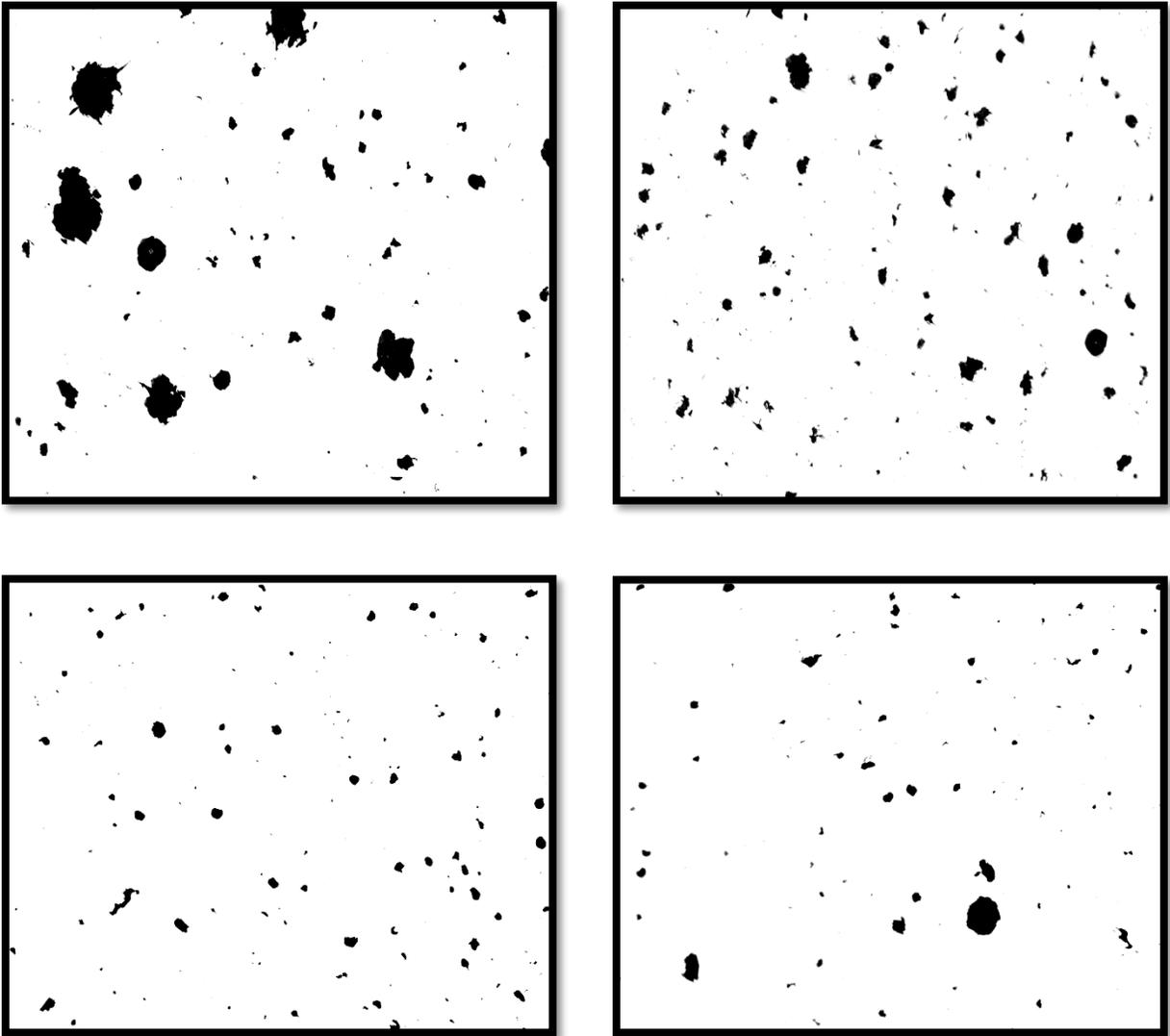


Figura 29. Variaciones en la densidad y tamaños de los nódulos en la pieza B (0.03%inoculación) en diferentes zonas a 100x.

4.2 Carburos Promedio de las muestras antes del tratamiento térmico de Austenización.

En la **Figura 30**, se observan fotografías representativas de los carburos presentes en las muestras que fueron seleccionadas para realizar el tratamiento de austemperizado.

Las 5 muestras de la pieza A, presentaron un % de Carburos alrededor del 20% mientras que las muestras provenientes de B un valor de 23%.

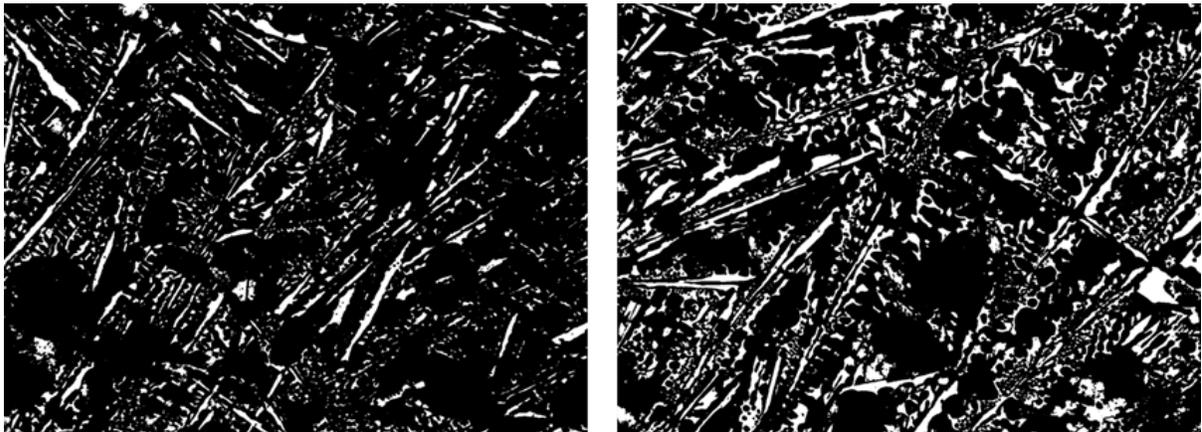


Figura 30. Lado izquierdo aproximadamente 20% de Carburos en las muestras A.

Lado derecho aproximadamente 23% de Carburos en las muestras B. Vistas a 100x.

4.3 Carburos Promedio de las muestras después del tratamiento térmico de Austenización.

Los resultados indican que, una cierta fracción de los carburos que se encontraban en la matriz provenientes de la colada, han sido solubilizados durante el tratamiento de austenización, en la **Figura 31** se observa las microestructuras representativas de los carburos residuales en las muestras provenientes de la pieza A y en la **Figura 32**, se observan los resultados de las muestras de la pieza B, después de austenizarse a 950°C. Los resultados, tanto de las muestras A y muestras B a ambas temperaturas de austenización (850 y 950°C), se encuentran en las **Tabla 15** y **Tabla 16**, mostrando en ellas los valores promedios de los carburos solubilizados y residuales

respectivamente, mientras que en las **Figura 33** y **Figura 34** se muestran los mismos resultados, pero en forma gráfica para facilitar su análisis.

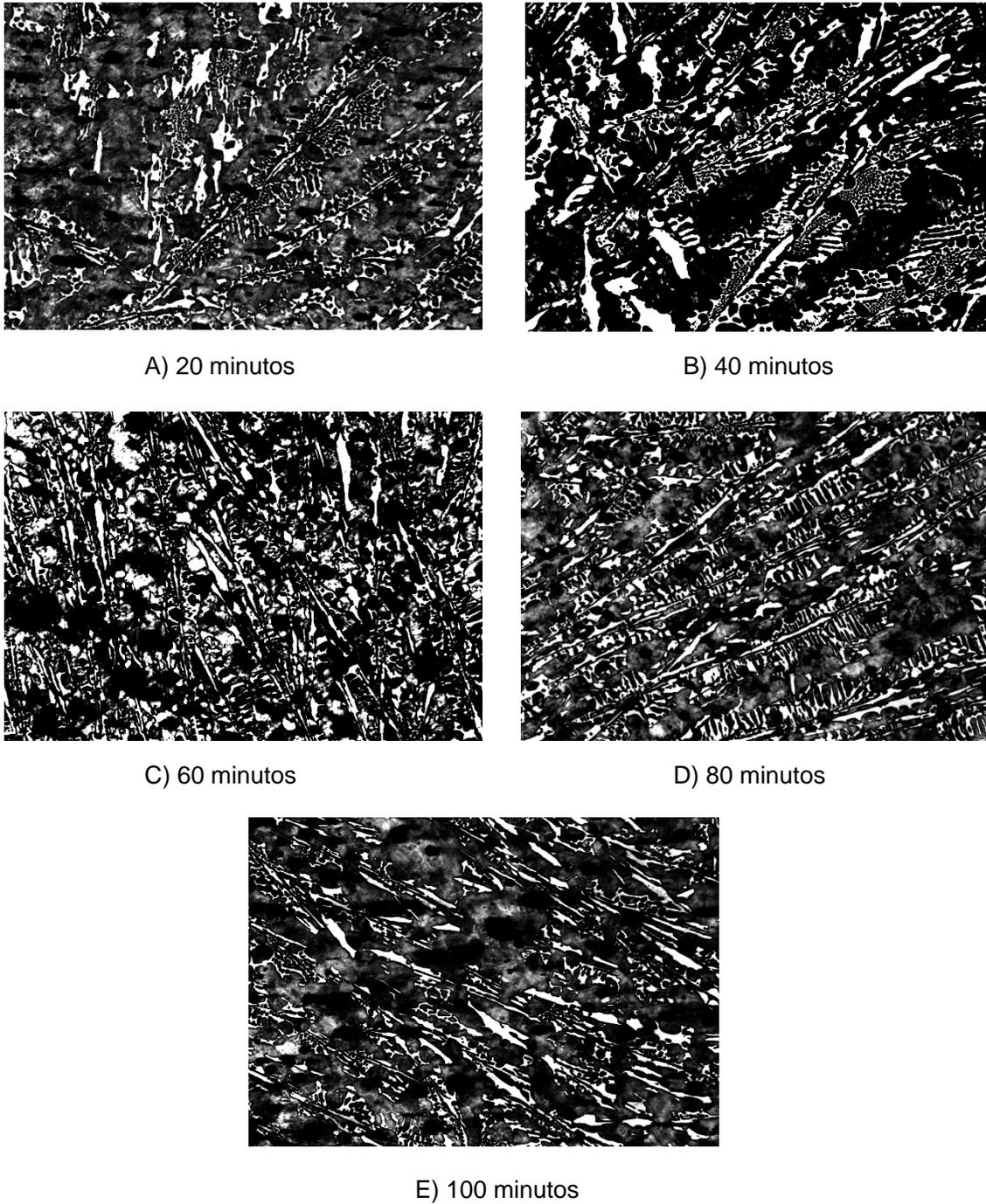
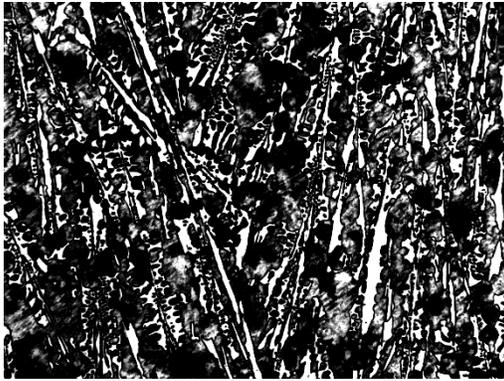
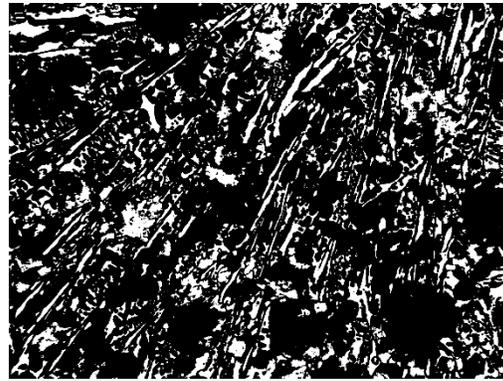


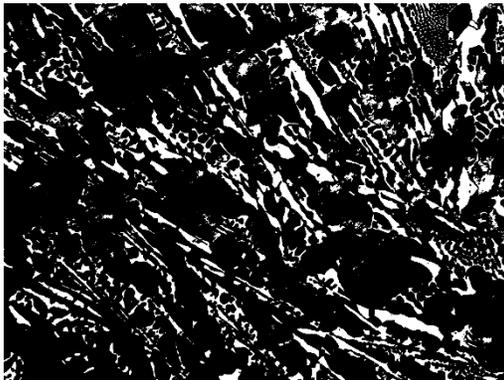
Figura 31. Imágenes representativas del % de Carburos promedio después del tratamiento de austenizado a 950°C en las muestras provenientes de la pieza A. A) 22.34%, B) 22.16%, C) 20.81%, D) 20.23% y E) 19.25%. Vistas a 100x.



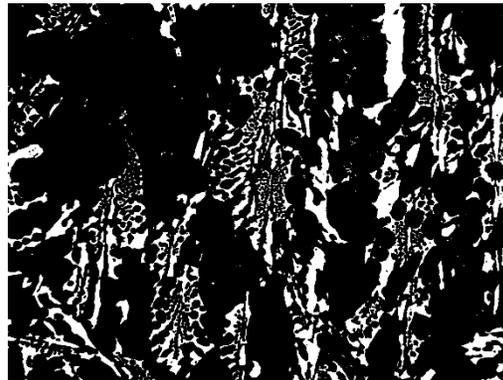
A) 20 minutos



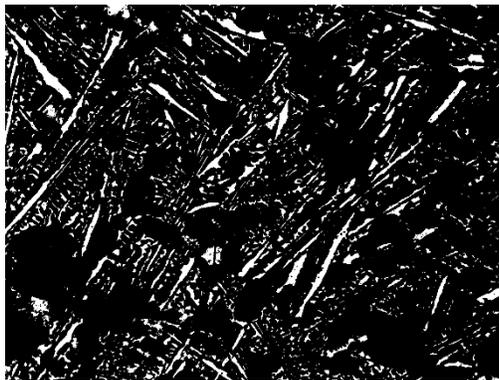
B) 40 minutos



C) 60 minutos



D) 80 minutos



E) 100 minutos

Figura 32. En las siguientes imágenes se muestran de forma representativa el % de Carburos después del tratamiento de austemperizado a 950°C en las muestras provenientes de la pieza B. A) 22.34%, B) 22.16%, C) 20.81%, D) 20.23% y E) 19.25%. Vistas a 100x.

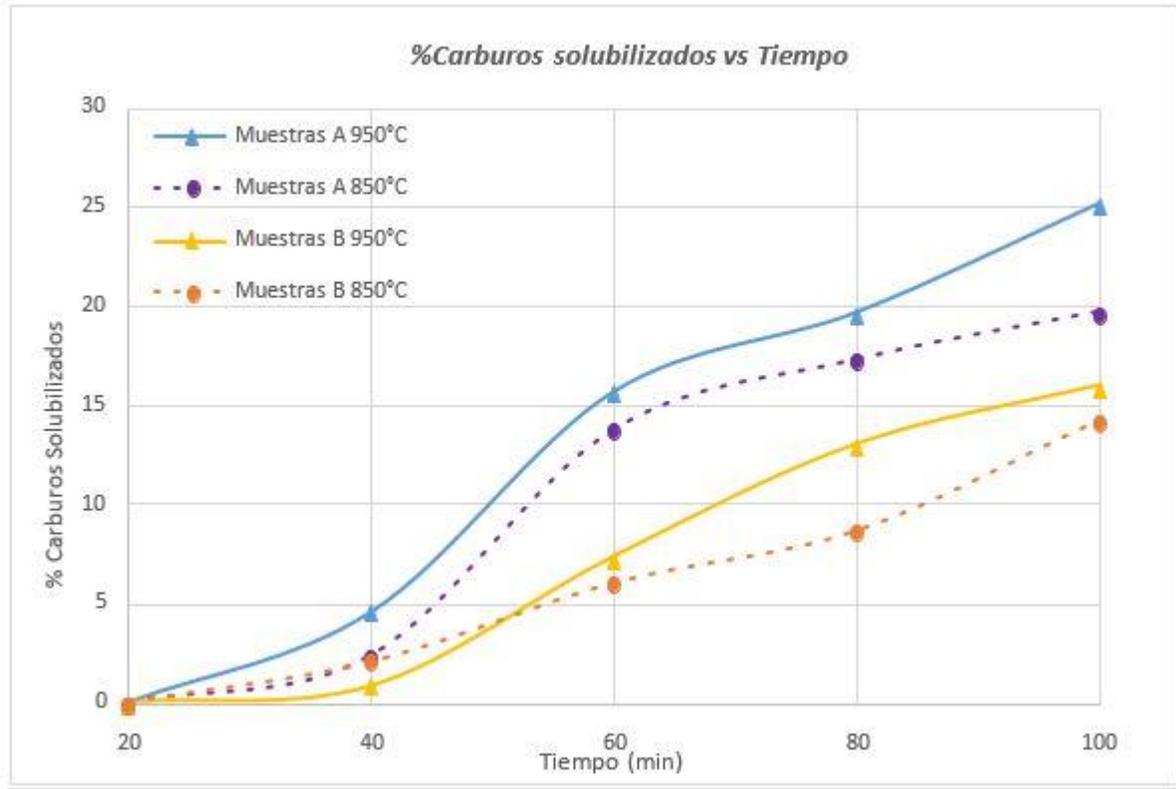


Figura 33. % de Carburos disueltos después de austenizarse a 850 y 950°C a distintos tiempos, para las muestras A y B.

Tabla 15. Resultados promedio del % de Carburos solubilizados de todas las muestras.

Temperatura de Austenización	Muestras A		Muestras B	
	850°C	950°C	850°C	950°C
	%Carburos Solubilizados			
Tiempo de Austenización (min)				
20	0.25	0.49	3.74	2.87
40	0.65	3.1	5.70	3.65
60	12.2	14.35	9.52	9.96
80	15.8	18.4	12.04	15.43
100	18.25	23.95	16.30	18.30

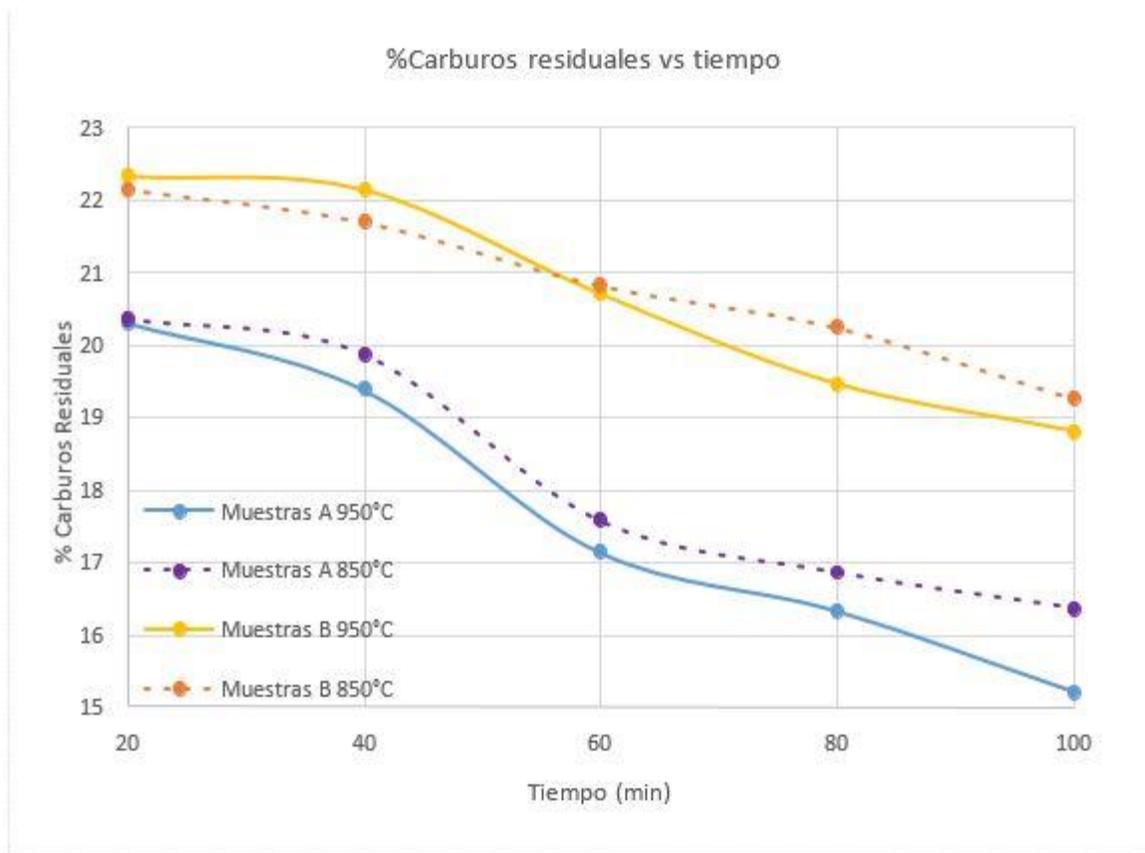


Figura 34. % de Carburos residuales después de austenizarse a 850 y 950 °C a distintos tiempos, para las muestras A y B

Tabla 16. Resultados promedio del % de Carburos residuales de todas las muestras.

Temperatura de Austenización	Muestras A		Muestras B	
	850°C	950°C	850°C	950°C
	%Carburos Residuales			
Tiempo de Austenización (min)				
20	20.35	20.3	22.14	22.34
40	19.87	19.38	21.69	22.16
60	17.56	17.13	20.81	20.71
80	16.84	16.32	20.23	19.45
100	16.35	15.21	19.25	18.79

Al analizar los resultados con respecto a la composición química, se puede observar en la figura 25, que existe una menor solubilidad de los carburos en las muestras de la pieza B con respecto a los de la muestra A. Esto se debe a que las muestras de B presentan carburos que son más estables debido al menor nivel de inoculación (0.03% pieza B y 0.12% pieza A), el mayor contenido de Cr (1.88% pieza B y 1.51% pieza A), así como el Vanadio presente en la microestructura.

Por otra parte, aunque hay un aumento en la solubilidad de los carburos cuando se aumentó la temperatura de 850°C a 950°C, este no representa una gran variación en los resultados, ya que estos varían únicamente entre el 0.5 al 1% menos de carburos residuales en la muestra.

Finalmente, al tratarse de un fenómeno difusivo, conforme aumenta el tiempo la solubilidad de los carburos también fue aumentando de forma proporcional. En las figuras 26 a 29, se muestra el gráfico y la regresión lineal realizada a los resultados obtenidos para todas las muestras.

En todas las muestras se obtuvo un comportamiento tipo S, es decir, a tiempos muy cortos, lo mejor sería tener resultados con intervalos menores de tiempo y en un rango más amplio que confirmen esta tendencia o en que rango se cumple esta.

La pendiente de la ecuación, representa un aproximado del porcentaje de carburos que pierde la muestra por cada minuto que esté sometido al tratamiento de austenizado.

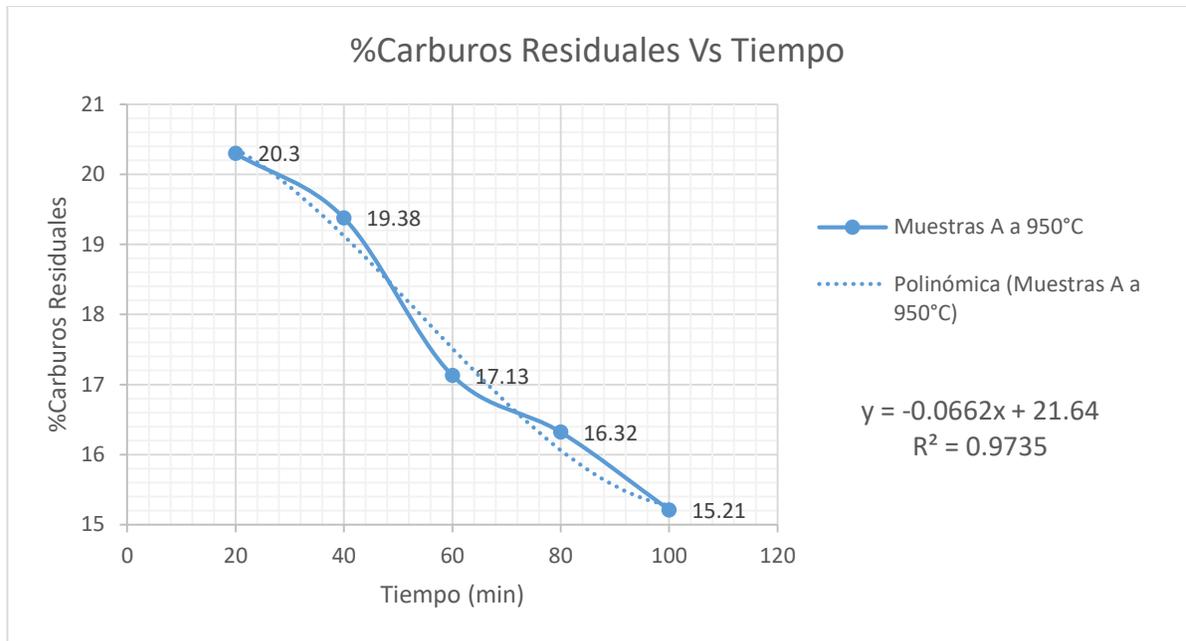


Figura 35. %Carburos residuales de las muestras A a 950°C a distintos tiempos y ecuación obtenida por regresión lineal.

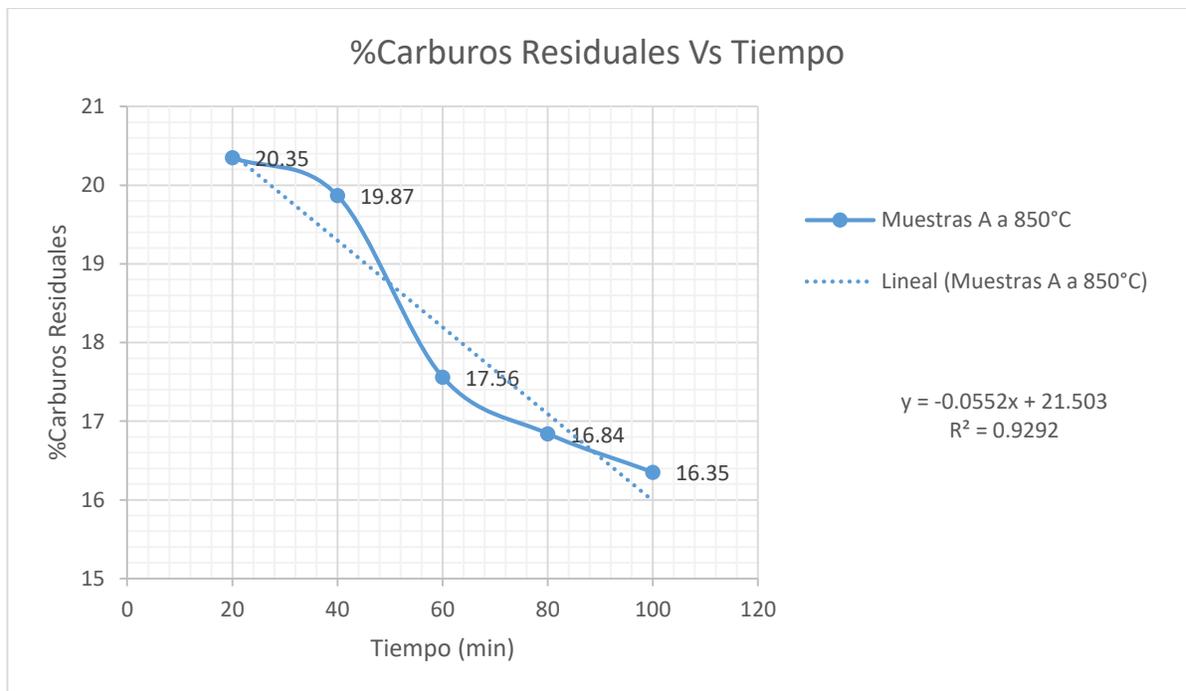


Figura 36. %Carburos residuales de las muestras A a 850°C a distintos tiempos y ecuación obtenida por regresión lineal.

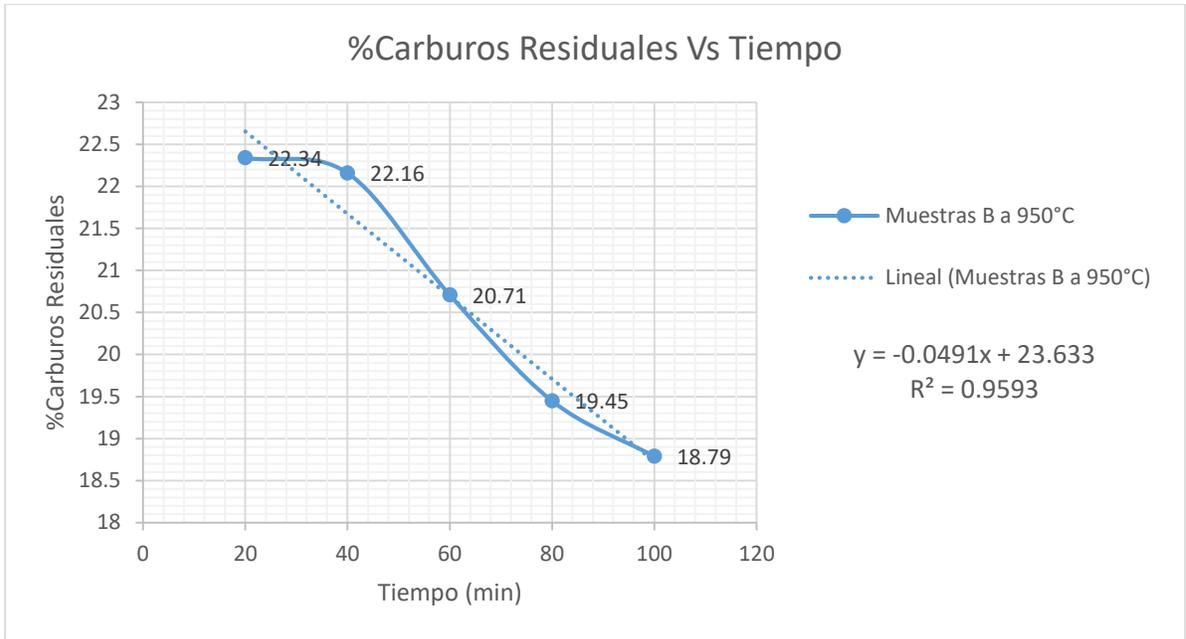


Figura 37. %Carburos residuales de las muestras B a 950°C a distintos tiempos y ecuación obtenida por regresión lineal.

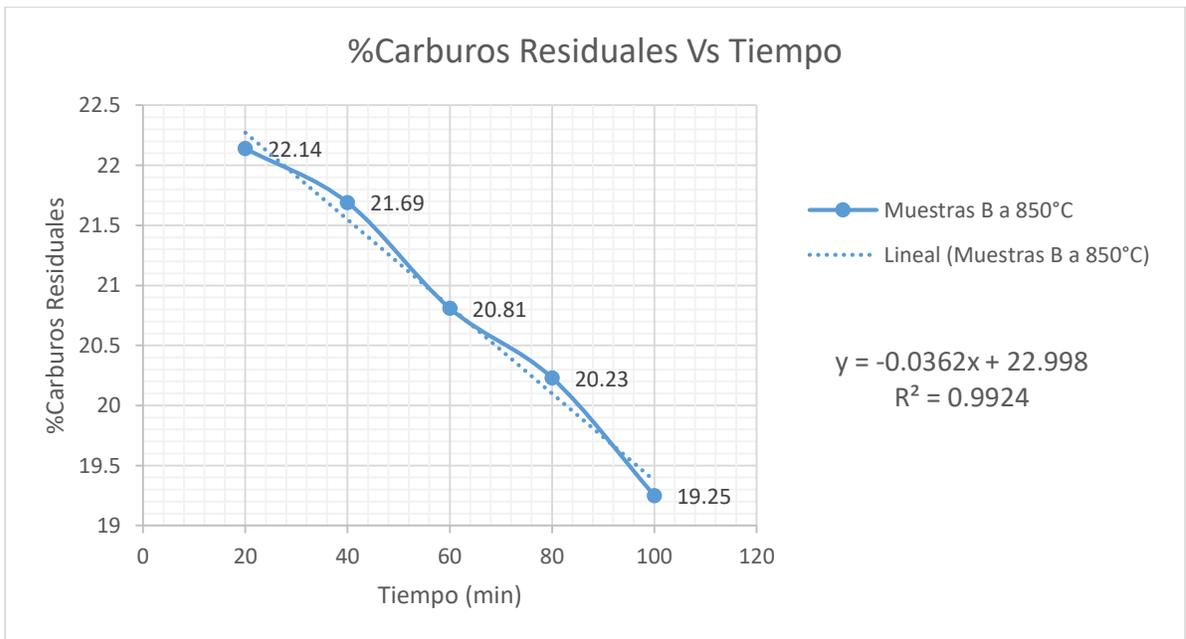


Figura 38. %Carburos residuales de las muestras B a 850°C a distintos tiempos y ecuación obtenida por regresión lineal.

Capítulo 5

Conclusiones

Conclusiones.

Un bajo nivel de inoculación, junto con el aumento de elementos como el Cr y V, fomentan la estabilidad de los carburos, disminuyendo su solubilidad durante un tratamiento de austenizado.

La solubilidad de los carburos presenta una relación directamente proporcional con el tiempo cuando se trabaja a las temperaturas de austenización 850 y 950°C.

La temperatura es el factor que menos variación presenta, siendo diferencias menores del 1% en el porcentaje de carburos residuales entre las condiciones de 850 y 950°C de austenización.

Bibliografía

1. **Apraiz B.J., “Fundiciones”, 3a edición, Ed. Dossat S.A., Madrid España,1977, pp 12-13,22.**
2. **Apraiz B.J., “Tratamientos Térmicos de los Aceros”, 10a edición, Ed. Dossat S.A., Madrid España,2002, pp 107-124.**
3. **Metals Handbook, “Proprieties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys”, Vol. 1 10th Edition, Ed. ASM International, pp 17-18, 79-80 (1993).**
4. **Janawak Gundlach, “A Modern Approach to Alloying Gray Iron”, AFS, Vol.90, 1982, pp 847-862.**
5. **Kovacs B. V., “The Effect of Alloying Elements and their Segregation in ADI”, World Conference on Austempered Ductil Iron, Vol I, Bloomingdale, IL, USA, 1991, pp. 241-270.**
6. **L. Zhenhua, L. Yanxiang, “Effect of Sb on the Graphite Morphology and Mechanical Properties in Heavy Section Ductile Iron,” Materials Science Forum, vol.475, 2014, pp.222–228,**
7. **Alhussein, M. Risbet, A. Bastien, J.P. Chobaut, D. Balloy, and J. Favergeon, “Influence of Silicon and Addition Elements on the Mechanical Behavior of Ferritic Ductile Cast Iron,” Materials Science and Engineering A, vol. 605, 2014, pp.222–228.**
8. **Bagesh, R. Kumar, K. Anil Singh, “Effect on the Mechanical Propierties of Gray Cast Iron with Variation of Copper and Molybdenum as Alloying Elements”, International Journal of Engineering Research of Technology. Vol. 3, May 2014.**

9. H. Cheng, H. Fu, J. Lin. "Effect of Cr Content on Microstructure and Mechanical Properties of Carbide Austempered Ductile Iron". Beijing University. 2015.
10. D. Verhoeven, "Metallurgy of Steel for Bladesmiths and Others Who Heat Treat and Forge Steel. 2005. Pp 171-182.
11. J.R. Davis. "ASM Speciality Handbook Cast Iron: Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron". 1996, pp 1-12.
12. ASM HandBook. Vol. 9 "Metallography and Microstructures. Ohio, USA, 2010, pp. 565,578,612 y 615.
13. ASTM, Annual Book of ASTM Standars, Vol. 01.02. "Ferrous Castings and Ferroalloys". 2006. Normas: A47, A220, A247, A395, A436, A439, A644, A842 y A897.
14. TUPY-VERSA-Bar, "Continuos Cast Iron: Technical Catalogue" pp. 19 – 26.
15. Walton C. F and Opar T. J., "Iron Casting Handbook Covering Data on Grey, Malleable and Ductil Iron", Iron Casting Society Inc. New York, pp 378-401, 1981.
16. Rio Tinto Iron & Titanium Inc., "Ductil Iron Data for Design Engineers", Canada, 1990, pp. 7.1-7.10.
17. M. Mahmoud, S. El-Hadad, I. Merva, N.A. Abdelmonem, "Effect of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Iron". Hindawi Publishingnng Corpotation: Journal of Metallurgy. Central Metallurgical Research and Development Institute. Cairo, Egypt 2015.
18. Laird, G., Gundlach, R. and Rohrig, K., "Abrasion Resistant Cast Iron Handbook", 1st ed. American Foundry Society, Des Plaines, IL (2000).

19. American Foundrymen's Society (AFS), Inc. "Foundrymen's Guide to Ductile Iron Microstructures" Des Plaines, Illinois, pp 1-19, 24-26, 28-31,36-39,41-48, USA,1984.
20. Gupta, C. D.; Keough, J. R.; Pramstaller, D. M. "Austempered Ductile Iron Process Development", Annual Report, Sep. 1985 - Aug. 1986 Atmosphere Furnace Co., Wixom, PA
21. American Society Metallurgical (ASM) "Casting", Vol. 15, 9th Edition, Metals Handbook, Ed. ASM International, pp. 1485-1494, 1500-1506, 1992.
22. Janina M. Radzikowska, "Metallography and Microstructures of Cast Iron", The Foundry Research Institute, Kraków, Poland, 1990.
23. Keough, J.R. and Hayrynen, K.L., "Carbide Austempered Ductile Iron (CAD)The New Wear Material", Ductile Iron News, Issue 3, 2000.
24. R. A. Harding. Kovove Mater., "The Production, Properties and Automotive Applications of Austempered Ductile Iron", The University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom, 2006.
25. J, Crisanti. "CAD: Obtención de Ausferrita a partir de Fundiciones Esferoidales y su uso". Univ. Palermo. 2007
26. B. V. Kovacs, "Heat Treating of Austempered Ductil Iron", AFS transactions, Vol. 99, (1991), pp. 281-286.
27. S. C. Lee, C. C.Lee, "The Effect of Heat Treatment and Alloying Elements on Fracture Toughness of Bainitic Ductil Iron", AFS Transactions, Vol. 96, 1988. pp 827-838.

28. **Metals Handbook, “Heat Treating”, vol. 4, 9th edition, ASM, 1991, pp. 1485.**
29. **M. Bahmani, R. Elliot, N. Varahram, “The Austempering Kinetics and Mechanical Properties of an Austempered Cu-Ni-Mo-Mn Alloyed Ductil Iron”, Journal of Materials Science, 1997, pp 4783-4791.**
30. **Acosta M.- Martinez M., “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, pp 1-57, 2000**
31. **Rizzo Downes. Fundición Nodular de Alto Rendimiento, Cuaderno Tecnológico N°9. Instituto Nacional Tecnológico, Buenos Aires, Arg. 2014. PP. 12 - 20.**
32. **J.A. Nelson, Cast Irons, “Metallography and Microstructures”, Vol 9, ASM Handbook, American Society for Metals, 1985, pp 242**
33. **G. F. Alabi, F. I. Aluko, “Production of Austempered Ductile Iron with Optimum Sulphur Level for Effective Mechanical Properties”, The International Journal of Engineering and Science (IJES), 2 (2013) 12, pp. 67-71.**
34. **J. Keought, K. Hayrymen. “Designing with Austempered Ductil Iron (ADI), AFS Proceedings, IL USA, American foundrymen Society. 2010, pp 1–15.**
35. **Laino S. Dommarco R. Sikora J. “Fundición Nodular Austemperada con Carburos (CADI)”, El Fundidor de la Cámara de Industriales Fundidores de la República Argentina, No. 123, pp4-16, 2007**
36. **Glacopini, R. Boerl, Sikora J. “Disolución de Carburos en Piezas de Fundición”, Jornadas SAM CONAMET, Argentina, pp 165-172, 2001.**

37. **Pedro Arturo Callejas, Tania Sharim Bobadilla. "Fabricación de puntas de excavadora por fundición, con hierro nodular obteniendo alta fracción de carburos mediante la adición de Cr y V", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2017. pp 14-20**

38. **Juárez Tamayo Hiram. "Cinética de la Disolución de Carburos en un Hierro Nodular Aleado con 2.2%Cr", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, 2013. pp 14-16, 32-39**

39. **Rodrigo Godoy Serrano. "Efecto del Tiempo de Tratamiento Isotérmico en las Propiedades y Microestructura de un Hierro CADI. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2014. Pp 24-30.**

40. **Aranda Villada Víctor Antonio, "Efecto de la Temperatura y Tiempo de Austenización en la Disolución de Carburos en un Hierro Nodular Blanqueado" Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, 2010. pp 27-29, 40-41.**

41. **Adrián Felipe López Betancourt, "Efecto del Vanadio en la Formación de Carburos en un Hierro Nodular", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2016. Pp. 12-15, 39,86.**