

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ACERO AL
CARBONO DE ALTA CALIDAD MEDIANTE FUNDICIÓN”**

INFORME

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR

URBANO LUNA NILO JAVIER

ASESOR

ING° CARMEN AVELINO CARHUARICRA

CALLAO – SETIEMBRE – 2017

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

El presente Informe fue Expuesto por el señor Bachiller **URBANO LUNA NILO JAVIER** ante el **JURADO DE EXPOSICIÓN DE INFORME** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios :

ING°	SUERO IQUIAPAZA POLICARPO	PRESIDENTE
ING°	ÓSCAR CHAMPA HENRÍQUEZ	SECRETARIO
ING°	ROBERTO LAZO CAMPOSANO	VOCAL
ING°	CARMEN AVELINO CARHUARICRA	ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 2 de Exposición de Informes Folio N° 15 y Acta N° 210 de fecha **VEINTIDOS DE DICIEMBRE DE 2016**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Informe, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012

ÍNDICE

	Pag
I	
INTRODUCCIÓN	01
II	
RESEÑA DE LA EMPRESA	02
2.1	
POLÍTICA DE LA EMPRESA	03
III	
OBJETIVOS	05
3.1	
OBJETIVO GENERAL	05
3.2	
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	05
IV	
RESUMEN	06
V	
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FUNDICIÓN	07
5.1	
ANTECEDENTES	07
5.2	
FUNDICIÓN	08
5.2.1	
PROCESOS DE FUNDICIÓN	08
5.2.2	
TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN	10
5.2.2.1	
MODELOS	11
5.2.2.2	
TOLERANCIA EN EL MODELO	11
5.2.2.3	
CALENTAMIENTO DEL METAL	12
5.2.2.4	
VACIADO DEL METAL FUNDIDO	12
5.2.2.5	
ANÁLISIS INGENIERIL DEL VACIADO	14
5.2.2.6	
FLUIDEZ	14
5.2.3	
FUNDAMENTO TEÓRICO DEL HORNO DE INDUCCION	15
5.2.3.1	
SOLIDIFICACION	19
5.2.3.2	
TIEMPO DE SOLIDIFICACION	22
5.2.4	
TRATAMIENTO TERMICO	26
5.2.5	
TRATAMIENTOS TÉRMICOS FUNDAMENTALES	29
5.2.6	
METALOGRAFÍA	30
5.2.7	
ATAQUE QUÍMICO	31
5.2.8	
MICROSCOPIO	32
VI	
TÉCNICA PARA LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ACERO AL CARBONO	33
6.1	
CALCULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	33

	Pag	
6.1.1	CALCULO DEL PESO DE LA MUESTRA	34
6.1.2	CALCULO DEL PESO DEL ALIMENTADOR	34
6.1.3	CALCULO DEL DIAMETRO DEL ALIMENTADOR	35
6.1.4	CALCULO DEL LA DISTANCIA DE ALIMENTACIÓN	36
6.1.5	CALCULO DEL ALIMENTADORES POR PIEZA	36
6.2	CALCULO DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL ACERO CARBONO	37
6.2.1	MOLDEADO Y COLADA	37
6.2.2	ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS	38
6.3	TÉCNICA ANALÍTICA EMPLEADA	39
6.3.1	CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN QUIMICA	41
6.4	CALCULO DE LA CURVA DE TRATAMIENTO TERMICO	41
VII	APORTES REALIZADOS EN LA EMPRESA	45
VIII	EVALUACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	47
8.1	COMPOSICION QUÍMICA DE LA MUESTRA	47
8.1.1	BALANCE DE CARGA N° 1	47
8.1.2	BALANCE DE CARGA N° 2	48
8.1.3	BALANCE DE CARGA N° 3	49
8.2	TRATAMIENTO TERMICO – NORMALIZADO	50
8.2.1	TIEMPO vs TEMPERATURA N° 1	50
8.2.2	TIEMPO vs TEMPERATURA N° 2	51
8.2.3	TIEMPO vs TEMPERATURA N° 3	52
8.3	EVALUACIÓN DEL COSTO DEL PROCESO	53
8.3.1	COSTO DE PRODUCCIÓN	53
8.3.2	COSTO DE MATERIA PRIMA	54
IX	CONCLUSIONES	55
X	RECOMENDACIONES	56
XI	BIBLIOGRAFIA	57
	ANEXOS	58

I INTRODUCCIÓN

Se denomina fundición o esmelter (del inglés smelter, 'fundidor') al proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas pero también de plástico, consistente en fundir un material e introducirlo en una cavidad, llamada molde, donde se solidifica.

El proceso más común es la fundición en arena, por ser ésta un material refractario muy abundante en la naturaleza y que, mezclada con arcilla, adquiere cohesión y moldeabilidad sin perder la permeabilidad que posibilita evacuar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido. La fundición en arena consiste en colar un metal fundido, típicamente aleaciones de hierro, acero, bronce, latón y otros, en un molde de arena, dejarlo solidificar y posteriormente romper el molde para extraer la pieza fundida.

Para la fundición con metales como el hierro o el plomo, que son significativamente más pesados que el molde de arena, la caja de moldeo es a menudo cubierta con una chapa gruesa para prevenir un problema conocido como "flotación del molde", que ocurre cuando la presión del metal empuja la arena por encima de la cavidad del molde, causando que el proceso no se lleve a cabo de forma satisfactoria.

También se conoce como fundición al proceso de extraer metales a partir de sus menas, que suele ser la etapa previa al moldeo metálico

II RESEÑA DE LA EMPRESA

Con inicio del nuevo milenio, nació FAYCONAPI en el 2000 y se encuentra ubicado en Chacra Cerro MZ B-2 Comas – Lima. Surgió con el espíritu de innovación de la nueva era. Está constituida por la familia Narváez Pinedo; actualmente no solo abastece la industria nacional con piezas de calidad, también provee desde el 2010 a países como Ecuador, Bolivia y con la convicción de seguir creciendo.

Hoy la capacidad de producción sigue incrementándose. Cuenta con dos hornos de inducción, un laboratorio metalográfico, un espectómetro de emisión óptica, hornos de tratamiento térmico, taller de mecanizado, equipos automatizados de vaciado y moldeo, y sigue modernizándose para producir aleaciones de alta calidad.

Acero SAE 1020, 1030, 1045, 1060; Al Cromo Molibdeno, Al Manganeso, Hierro Nodular, Hierro Gris, Ni-Hard, son solo algunos de los productos más requeridos que se producen.

FAYCONAPI, fundición peruana especializada en brindar soluciones contra el desgaste mediante la fabricación de piezas; aleaciones ferrosas y no ferrosas de excelente calidad, para la industria.

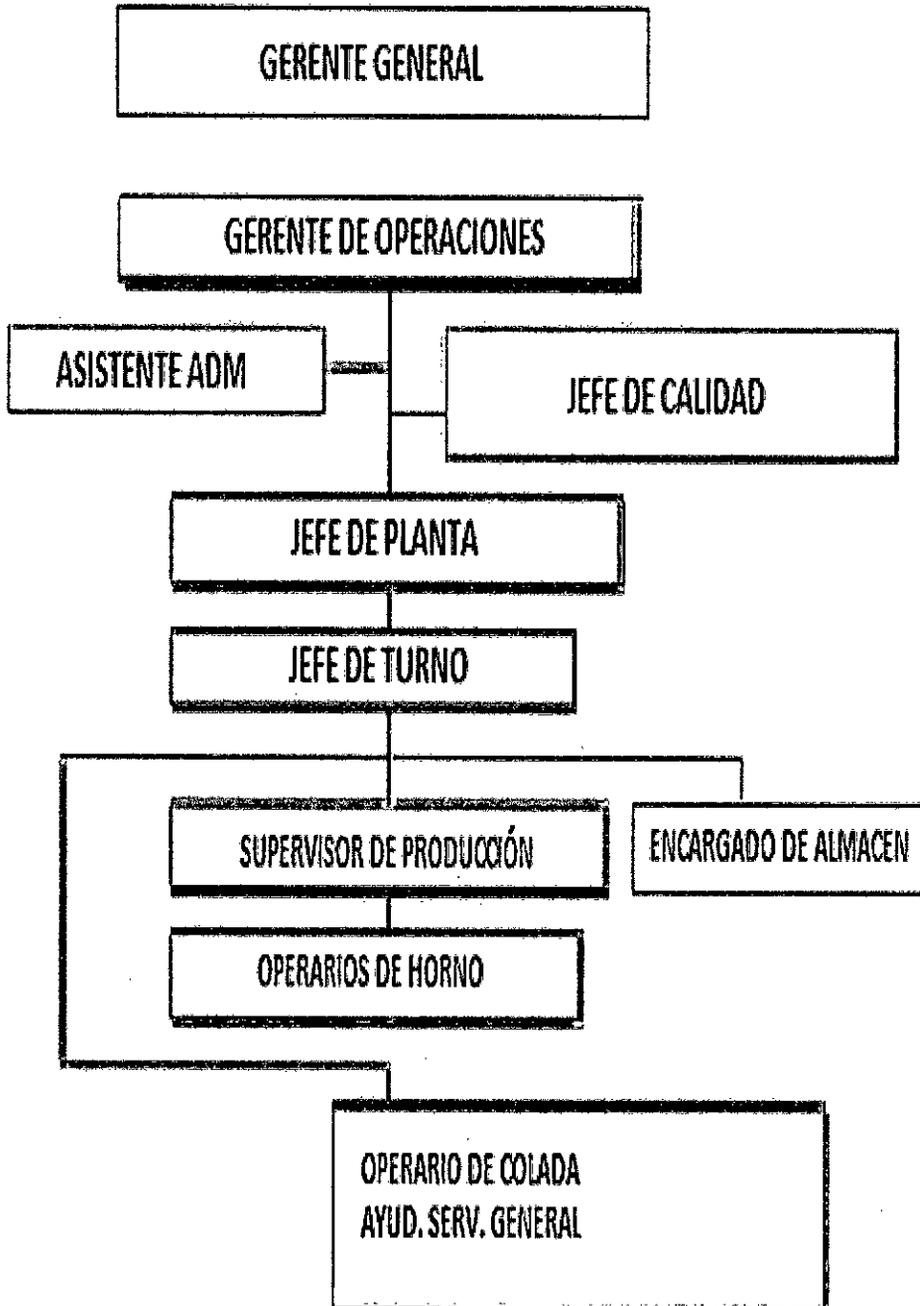
La empresa cuenta con un laboratorio metalográfico, lográndose una buena precisión y rendimiento. Se funden materiales ferrosos y no ferrosos, según norma técnica de acuerdo al requerimiento del cliente.

2.1 POLÍTICA DE LA EMPRESA

La empresa es una organización enfocada al cliente que constantemente identifica y entiende las necesidades presentes y futuras, esforzándose por superar sus requisitos.

FAYCONAPI, fundición peruana especializada en brindar soluciones contra el desgaste mediante la fabricación de piezas; aleaciones ferrosas y no ferrosas de excelente calidad, para la industria.

DIAGRAMA N° 1
ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA



Fuente : Elaboración propia

III OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Dar a conocer el proceso de obtención de piezas de acero al carbono de alta calidad, mediante fundición

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Dar a conocer el proceso de la fabricación de piezas de acero al carbono
- 2) Calcular la óptima composición química del acero carbono.
- 3) Elaborar la curva de tratamiento térmico de las piezas de acero al carbono

IV RESUMEN

El presente estudio consiste en el proceso de obtención de aleación de acero carbono a nivel industrial, primero se realiza el diseño del sistema de alimentación en base al modelo a obtener.

Para el diseño de sistema de alimentación se calcula el peso teórico de la pieza además del cálculo de manguitos exotérmicos.

Después del diseño de sistema de alimentación, se calcula la composición química óptima, este proceso se realiza en una muestra del caldo del horno de tratamiento térmico utilizando un crisol y el espectrofotómetro.

Finalmente se harán diferentes pruebas a unas temperaturas adecuadas para obtener la curva de tratamiento térmico.

Luego se evaluará los resultados para determinar la óptima composición química del acero carbono.

V FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FUNDICIÓN

5.1 ANTECEDENTES

Nuestro país es catalogado comúnmente como un productor primario de minerales; sin embargo, existen notables ejemplos de empresas que operan en nuestro territorio que producen minerales refinados con buenos resultados, sumando de esta manera un importante valor agregado. Tenemos compañías como Southern Perú, que cuenta con la Fundición y Refinería de Ilo, Siderperú en Chimbote y Votorantim Metais con la Refinería de Cajamarquilla.

Ubicada a diecisiete kilómetros del puerto de Ilo, la fundición opera desde 1960. Esta se maneja actualmente con la tecnología Isasmelt, gracias a la cual se logra capturar más del 95% del dióxido de azufre que ingresa al proceso, cantidad superior a la que exigen las leyes ambientales vigentes. Trabaja con temperaturas mayores a los 1 100°C y cuenta con una capacidad de fusión aproximada de un millón 200 mil Ton/año, además de producir aproximadamente 355 mil Ton. de ánodos de cobre con 99,7% de pureza.

La refinería, ubicada también en la región Moquegua a nueve kilómetros del puerto de Ilo, fue adquirida por Southern Perú en 1994. En ella los ánodos de cobre son sometidos a un proceso electrolítico de refinación, al ser introducidos en tanques con ácido sulfúrico y sulfato de cobre.

Luego, se les aplica una carga eléctrica de baja intensidad y, mediante una solución química, el cobre de los ánodos migra hacia las placas de arranque, dejando las impurezas en la solución. Las placas contienen cátodos de cobre con 99,99% de pureza. La refinera produce un aproximado de 280 mil toneladas de cátodos anuales.

5.2 FUNDICIÓN

5.2.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN

Existen diversos métodos para la fundición de formas, lo cual hace de este proceso uno de los más versátiles en manufactura. Sus posibilidades y ventajas son las siguientes:

- a) La fundición se puede usar para crear partes de compleja geometría, incluyendo formas externas e internas.
- b) Algunos procesos de fundición pueden producir partes de forma neta que no requieren operaciones subsecuentes para llenar los requisitos de la geometría y dimensiones de la parte.
- c) Se puede usar la fundición para producir partes de unos cuantos gramos hasta formas que pesan más de 100 toneladas (coronas dentales, joyería, estatuas, bloques y cabezas para motores automotrices, bases para máquinas, ruedas para ferrocarril, tubos, carcasas para bombas, etc.)
- d) El proceso de fundición puede realizarse en cualquier metal que pueda calentarse y pasar al estado líquido.

- e) Algunos métodos de fundición son altamente adaptables a la producción en masa.

Se debe mencionar también las desventajas asociadas con el proceso de fundición. Estas incluyen:

- a) Las limitaciones de algunos procesos
- b) Se pueden obtener piezas con propiedades mecánicas no homogéneas
- c) Piezas con porosidad
- d) Baja precisión dimensional
- e) Acabado deficiente de la superficie
- f) Los riesgos que los trabajadores corren durante el procesamiento
- g) Problemas ambientales.

Se pueden fundir todas las variedades de metales ferrosos y no ferrosos polímeros y cerámicos. En este tema revisamos los fundamentos que se aplican prácticamente a todas las operaciones de fundido; se describen los procesos de fundición individualizados, junto con los aspectos que deben considerarse en el diseño de productos de fundición.

5.2.2 TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

El proceso de fundición se realiza en una fundidora. Una fundidora es una fábrica equipada para hacer moldes, fundir y manejar el metal en estado líquido, desempeñar los procesos de fundición y limpieza de las piezas terminadas.

El primer paso que se da en el proceso de fundición es la fabricación del molde. El molde contiene una cavidad que dará la forma geométrica de la parte a fundir. La cavidad debe diseñarse de forma y tamaño ligeramente sobredimensionados, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferentes porcentajes de contracción, por tanto, la cavidad debe diseñarse para el metal particular que se va a fundir.

La cavidad del molde proporciona la superficie externa de la fundición; pero además puede tener superficies internas, que se definen por medio de corazones, los cuales son formas colocadas en el interior de la cavidad del molde para formar la geometría interior de la pieza. Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo a los diferentes tipos de moldes.

5.2.2.1 MODELOS

El modelo es una forma usada para preparar y producir la cavidad en el molde. El diseño debe ser lo más simple que sea posible para facilitar el retiro del molde. El modelo tiene en esencia la forma de la pieza a fundir con formas para bebederos, mazarotas, etc. El modelo puede estar en dos piezas una para la semicaja superior y la otra para la semicaja inferior para facilitar la construcción de la cavidad del molde, algunas piezas pueden ser sueltas para que sean removidas por separado y evitar la destrucción del modelo o del molde.

La madera es el material que generalmente se usa para fabricar los modelos ya que es sencilla de trabajar y se la encuentra fácilmente, la madera empleada deberá estar casi seca con 5% á 6 % de humedad para evitar que se tuerza o la formación de grietas lo que ocasionaría una distorsión en el molde final. Se usa el modelo en madera cuando se tiene un número discreto de piezas a fabricar, o cuando la pieza es demasiado grande lo cual facilitara el manejo de la misma.

5.2.2.2 TOLERANCIA EN EL MODELO

El modelo con el cual se fabrica la cavidad del molde debe ser un tanto diferente de la pieza a producir tanto en forma como en dimensiones. Estas diferencias intencionales incorporadas al modelo se llaman tolerancias del modelo. La tolerancia por contracción compensa la disminución de tamaño que experimenta la pieza al solidifican y enfriar.

5.2.2.3 CALENTAMIENTO DEL METAL

Se usan varias clases de hornos, para calentar el metal a la temperatura necesaria. La energía calorífica requerida es la suma de:

- a) Calor para elevar la temperatura hasta el punto de fusión
- b) Calor de fusión para convertir el metal sólido a líquido
- c) Calor para elevar al metal fundido a la temperatura de vaciado

El calor por inducción es un medio de calentamiento, o de fundición de metal que utiliza corrientes eléctricas para calentar el material, el calor eléctrico es limpio y eficiente. Proporciona calor rápido y consistente a lo largo del horno y permite que el material se caliente uniformemente.

El calor de inducción se basa en una bobina hecha con un tubo de cobre, el agua fluye a través de las bobinas que trabajan junto a los elementos de calefacción de cobre y ayudan a enfriar el horno según sea necesario. El tamaño y forma de la bobina puede ser determinada según la aplicación específica para la que se utilice el horno.

5.2.2.4 VACIADO DEL METAL FUNDIDO

Después del calentamiento, el material está listo para vaciarse. La introducción del metal fundido en el molde y su flujo dentro del sistema de vaciado y de la cavidad es un paso crítico en el proceso. Para que este paso tenga éxito, el metal debe fluir antes de solidificarse a través de todas las regiones del molde, incluida la región más

importante que es la cavidad principal. Los factores que afectan la operación de vaciado son la temperatura de vaciado, la velocidad de vaciado y la turbulencia.

La temperatura de vaciado es la temperatura del metal fundido al momento de su introducción en el molde. Lo importante aquí es la diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura a la que empieza la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura líquidos para una aleación) A esta diferencia de temperaturas se le llama algunas veces sobrecalentamiento.

La velocidad de vaciado es el caudal con que se vierte el metal fundido dentro del molde. Si la velocidad es muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad. Si la velocidad de vaciado es excesiva provoca turbulencia y puede convertirse en un problema serio.

La turbulencia de flujo se caracteriza por variaciones erráticas de la velocidad del fluido; cuando éste se agita, genera corrientes irregulares en lugar de fluir en forma laminar. El flujo turbulento debe evitarse durante el vaciado por varias razones. Tiende a acelerar la formación de óxidos metálicos que pueden quedar atrapados durante la solidificación, degradando así la calidad de la fundición. La turbulencia provoca una erosión excesiva del molde, que es el desgaste gradual de las superficies del molde debido al impacto del flujo de metal fundido. La erosión es especialmente seria cuando ocurre en la cavidad principal porque afecta la forma de la parte fundida.

5.2.2.5 ANÁLISIS INGENIERIL DEL VACIADO

Varias relaciones gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de vaciado y dentro del molde. Una relación importante es el teorema de Bernoulli, el cual establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica, energía cinética y fricción) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye es igual.

5.2.2.6 FLUIDEZ

Las características del metal fundido se describen frecuentemente con el término fluidez, una medida de la capacidad del metal para llenar el molde antes de enfriar. Existen métodos normales de ensayo para valorar la fluidez, como el molde espiral de prueba, donde la fluidez se mide por la longitud del metal solidificado en el canal espiral. A mayor longitud, mayor fluidez del metal fundido.

Los factores que afectan la fluidez son la temperatura de vaciado, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y el calor transferido de los alrededores. Una temperatura mayor, con respecto al punto de solidificación del metal, incrementa el tiempo que el metal permanece en estado líquido permitiéndole avanzar más, antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas como la formación de óxido, la porosidad gaseosa y la penetración del metal líquido en los espacios intersticiales entre los granos de arena que componen el molde. Este último problema causa que la superficie de la fundición incorpore partículas de arena que la hacen más rugosa y abrasiva de lo normal.

5.2.3 FUNDAMENTO TEÓRICO DEL HORNO DE INDUCCION

Un Horno de inducción es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (un metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.

El principio de calentamiento de un metal por medio de la inducción fue descubierto por Michael Faraday en 1831 mientras se encontraba experimentando en su laboratorio.¹

Una ventaja del horno de inducción es que es limpio, eficiente desde el punto de vista energético, y es un proceso de fundición y de tratamiento de metales más controlable que con la mayoría de los demás modos de calentamiento. Otra de sus ventajas es la capacidad para generar una gran cantidad de calor de manera rápida. Los principales componentes de un sistema de calentamiento por inducción son: el cuerpo de bobinas , conformado por las bobinas de fuerza (donde como están dispuestas físicamente es donde hay mayor agitación del baño líquido) y por las bobinas de refrigeración , la fuente de alimentación, la etapa de acoplamiento de la carga, una estación de enfriamiento, el material refractario que protege a las bobinas del baño líquido y la pieza a ser tratada.

TIPOS DE HORNO

Existen dos tipos básicos de hornos de inducción: el horno sin núcleo, de alta frecuencia, el cual consta en 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. Estos hornos se emplean prácticamente con todas las aleaciones ordinarias, su temperatura máxima sólo está limitada por el refractario y la eficacia del aislamiento frente a las pérdidas del calor.

Los sistemas de alta frecuencia facilitan un buen control de la temperatura y la composición, cuentan con capacidades desde 3.0 onzas, para fundir oro, hasta 320 toneladas, para galvanización de zinc, y su gran ventaja es que no contaminan y producen un metal muy puro. Dado que se presenta una fuerte acción de agitación electromagnética durante la calefacción por inducción, este tipo de horno tiene excelentes características de mezcla para aleaciones y para agregar nuevas cargas de metal.

El otro tipo, llamados horno de núcleo o de canal, de baja frecuencia (60 Hz), estos equipos tienen una bobina que rodea una pequeña porción de la unidad; es decir, la bobina o bobinas hace las veces de primaria y el bucle, o movimiento cerrado del propio metal fundido, de secundario, como el secundario, tiene una sola espira, éste se induce a sí mismo una corriente eléctrica de baja tensión y gran amperaje que produce el calor necesario para fundir. Lo que quiere decir que para iniciar el funcionamiento de un horno de inducción de baja frecuencia debe emplearse un poco de metal fundido, de modo que forme el secundario.

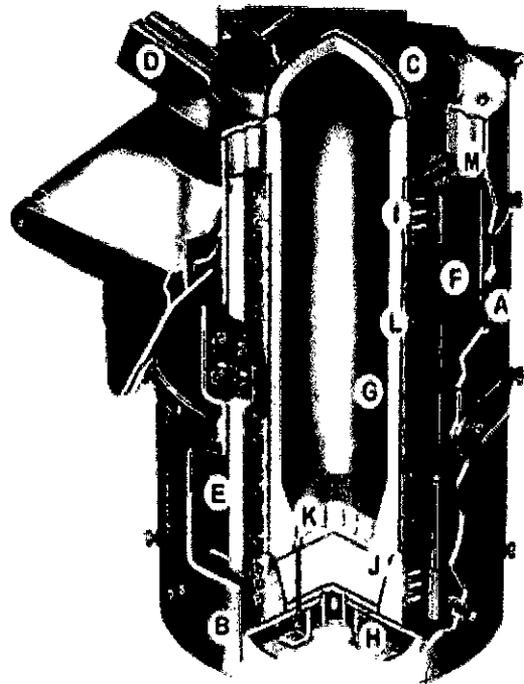
En estos equipos la velocidad de calentamiento es muy elevada y la temperatura se controla fácilmente, lo que hace que dichos hornos sean muy útiles y

se empleen ampliamente en el mundo, aunque poco en Colombia. Se utiliza comúnmente en fundidoras no ferrosas y es particularmente adecuado para sobrecalentar (calentamientos por encima de la temperatura normal de fundición para mejorar la fluidez), mantenimiento (que lo hace adecuado para aplicaciones de fundición por inyección en matriz), y duplexado (uso de dos hornos para, por ejemplo, fundir el metal en un y transferirlo al otro)

FIGURA N° 1

PARTES DEL HORNO DE INDUCCION

- A. Paneles : Están contruidos de acero resistente para proteger la bobina durante la operación de horneo.
- B. Casco de protección : Sirve como una barrera impenetrable entre el metal salpicado y la bobina.
- C. Tapas aisladas que minimizan la pérdida de calor.
- D. Anillo recolector de humo : Especialmente diseñado para eliminar humo nocivo y humo durante el ciclo de fundición.
- E. Espiras macizas: Optimizan el rendimiento en la fundición.
- F. Yugos magnéticos: Reducen el calor excesivo.
- G. Espacios entre las espiras : Optimizan eficiencia eléctrica y reducen humedad.
- H. Parte inferior abierta : Ayuda a reducir humedad y ventilar.
- I. Bobinas de enfriamiento : Amplían la vida del recubrimiento
- J. Formas refractarias.
- K. Detección de fugas con polo a tierra para mayor seguridad.
- L. Tubería adecuada para su aplicación.
- M. Aislamiento de alta temperatura. Barrera de aislamiento eléctrico y térmico.



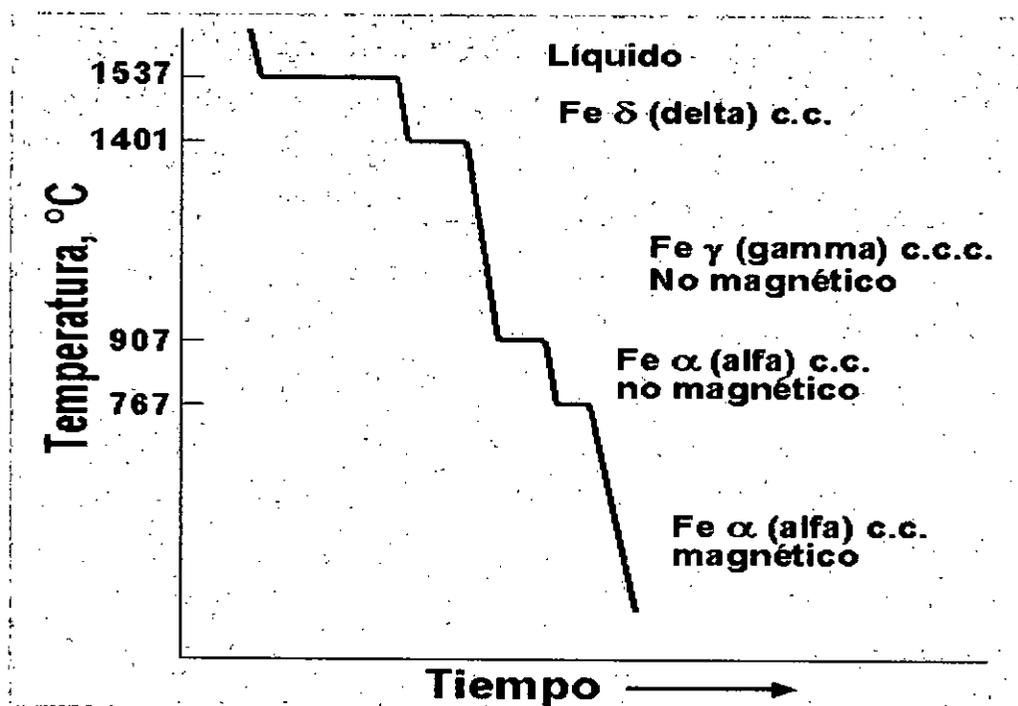
Fuente : www.metalactual.com Horno

El calentamiento por horno de inducción, en general pone en juego tres fenómenos físicos sucesivos pero prácticamente simultáneos:

- a) Transferencia de energía del cuerpo del inductor al cuerpo conductor en sus proximidades por electromagnetismo.

- a) Metales Puros.- Un metal puro se solidifica a una temperatura constante que constituye su punto de congelación o punto de fusión. Los puntos de fusión de los metales puros son bien conocidos. El proceso ocurre en un tiempo determinado, conocida como curva de enfriamiento.

FIGURA N° 2
CURVA DE ENFRIAMIENTO DEL Fe



Fuente : Fundición y Moldeo – Tomas De West – Editorial Barcelona

La solidificación real toma un tiempo llamado, tiempo local de solidificación, durante el cual el calor latente de fusión del metal escapa fuera del molde. El tiempo total de solidificación va desde el momento de vaciar el metal hasta su completa solidificación. Después que la fundición se ha solidificado completamente, el enfriamiento continúa a una velocidad indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

Debido a la acción refrigerante de la pared del molde, se forma una delgada película inicial de metal sólido en la pared inmediatamente después del vaciado. El espesor de esta película aumenta para formar una costra alrededor del metal fundido que va creciendo hacia el centro de la cavidad conforme progresa la solidificación. La velocidad del enfriamiento depende del calor que se transfiere en el molde y de las propiedades térmicas del metal.

- b) Aleaciones en general. Las aleaciones solidifican generalmente en un intervalo de temperaturas en lugar de una temperatura única. El rango exacto depende de la aleación y su composición particular.

Se puede explicar la solidificación de una aleación con referencia a la **Figura N° 1**, que muestra el diagrama de fase de una aleación en particular y a la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme desciende la temperatura, empieza la solidificación en la temperatura que indica la línea líquida y se completa cuando se alcanza la solidus.

El inicio de la solidificación es similar a la del metal puro. Se forma una delgada película en la pared del molde debido a un alto gradiente de temperatura en esta superficie. La solidificación continúa como para un metal puro, mediante la formación de dendritas alejadas de las paredes. Sin embargo, debido a la propagación de la temperatura entre líquidos y sólidos, el crecimiento de las dendritas es tal que se forma una zona avanzada donde el metal sólido y el líquido coexisten. La porción sólida está constituida por estructuras dendríticas que se han formado lo suficiente y han atrapado en la matriz pequeñas islas de líquido.

La región sólido – líquido tiene una consistencia suave que da lugar a su nombre de zona blanda. Dependiendo de las condiciones del enfriamiento, la zona blanda puede ser relativamente angosta o puede ocupar la mayor parte de la fundición. Los factores que promueven la última condición son una lenta transferencia de calor fuera del metal caliente y una amplia diferencia entre líquidos y sólidos. Las islas de líquido en la matriz de dendrita se solidifican gradualmente al bajar la temperatura de la fundición hasta la temperatura que corresponde a la composición de la aleación.

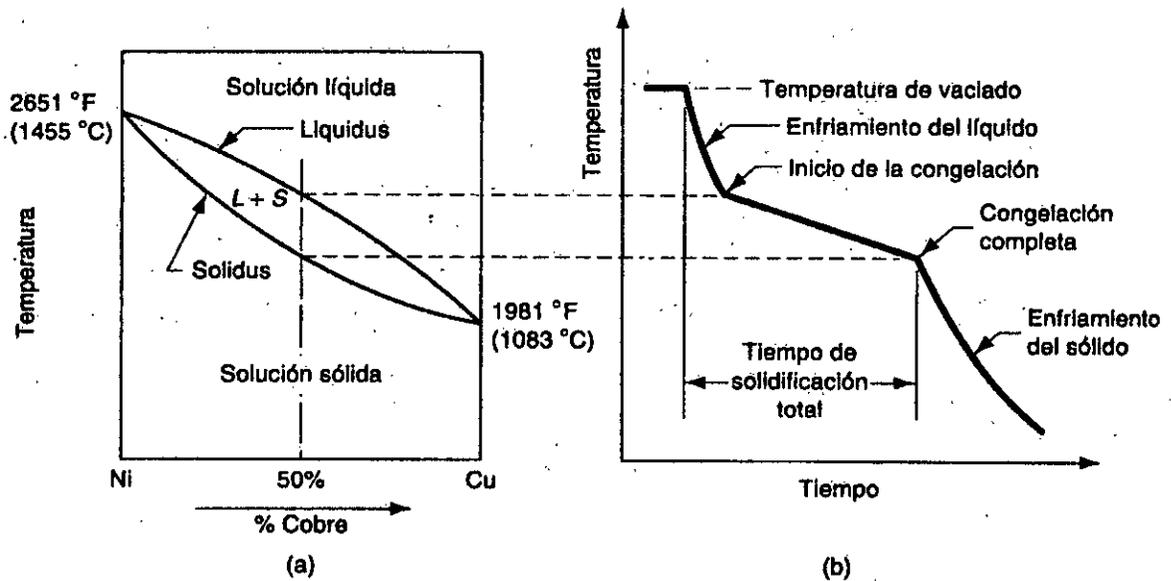
Otro factor que complica la solidificación de las aleaciones es la composición de las dendritas que al iniciar su formación son favorecidas por el metal que tiene el punto de fusión mayor. Al continuar la solidificación las dendritas crecen y se genera un desbalance entre la composición del metal solidificado y el metal fundido remanente.

Este desbalance de composición se manifiesta finalmente como segregación de elementos en las fundiciones terminadas.

La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica. A nivel microscópico, la composición química varía a través de cada grano individual. Esto se debe a que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción más alta de uno de los elementos de la aleación. La dendrita crece a expensas del líquido remanente que ha sido parcialmente agotado de este primer elemento. Finalmente, el último metal que solidifica en cada grano es el que quedó atrapado en las ramas de las dendritas, cuya composición es aún más desbalanceada. El resultado es una variación en composición química dentro de cada grano de la fundición.

FIGURA N° 3

DIAGRAMA DE LÍQUIDO – SÓLIDO (ENFRIAMIENTO)



Fuente : Fundición y Moldeo – Tomas De West – Editorial Barcelona

5.2.3.2 TIEMPO DE SOLIDIFICACION

Si la fundición es metal puro o aleación, de todos modos, su solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición expresada por una relación empírica conocida como regla de Chvorinov que lo establece.

$$TST = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (1)$$

Donde :

TST : Tiempo de solidificación total, min

- V** : Volumen de fundición, (m^3)
- A** : Área superficial de la fundición, (m^2)
- n** : Exponente que toma usualmente un valor de 2
- Cm** : Es la constante del molde

Dado que $n = 2$, las unidades de C_m son (min/m^2), su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, entre las cuales se incluyen el material del molde (calor específico y conductividad térmica), propiedades térmicas del metal de fundición (calor de fusión, calor específico y conductividad térmica), y la temperatura relativa de vaciado con respecto al punto de fusión del metal.

El valor de C_m para una operación dada se puede basar en datos experimentales de operaciones previas con el mismo material de molde, metal y temperatura de vaciado, incluso cuando la forma de la parte haya sido bastante diferente.

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja.

Este principio ayuda en el diseño de la mazarota del molde. Para cumplir su función de alimentar metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición. En otras palabras, la TST para la mazarota debe exceder la TST de la fundición principal. Como la condición

del molde para la mazarota y la fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales.

Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen a área más grande, podemos estar más o menos seguros de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción. Antes de considerar el diseño de la mazarota mediante la regla de Chvorinov tomemos en cuenta el tema de la contracción, razón por la cual se necesitan las mazarotas.

a) CONTRACCION.- La contracción ocurre en tres pasos :

- 1) Contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación
- 2) Contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación
- 3) Contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

b) SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL.- Para minimizar los efectos dañinos de la contracción es conveniente que las regiones de la fundición más distantes de la fuente de metal líquido se solidifiquen primero y que la solidificación progrese de estas regiones hacia la mazarota. En esta forma, el metal fundido continuará disponible en las mazarotas para prevenir los vacíos de contracción durante la solidificación. Se usa el término – solidificación direccional para describir este aspecto del proceso de solidificación y sus métodos de control La solidificación

direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov al diseño de la fundición, a su orientación dentro del molde y al diseño del sistema de mazarotas.

Por ejemplo, al localizar las secciones de la fundición con menores relaciones (V/A) lejos de las mazarotas la solidificación aparecerá primero en estas regiones y el suministro de metal líquido para el resto de la fundición permanecerá abierto hasta que solidifiquen las secciones más voluminosas.

Otra forma de fomentar la solidificación direccional es usar enfriadores sumideros de calor internos o externos que causan un enfriamiento rápido en ciertas regiones de la fundición, Los enfriadores internos son pequeñas partes de metal colocadas dentro de la cavidad antes del vaciado, cuyo objetivo es que el metal fundido solidifique primero alrededor de estas partes.

El refrigerante interno debe tener una composición química igual a la del metal que se vacía. Esto se logra fabricando el enfriador del mismo metal que la fundición.

- c) **DISEÑO DE LA MAZAROTA.**- Tal como se describió antes, una mazarota se usa en un molde de fundición para alimentar metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación. La mazarota debe permanecer líquido hasta después de que la fundición solidifique. Para satisfacer este requerimiento se puede calcular el tamaño de la mazarota usando la regla de Chvorinov.

5.2.4 TRATAMIENTO TERMICO

Se denomina tratamiento térmico a la modificación de la microestructura de una aleación metálica (y a través de ella de sus propiedades) como consecuencia de la realización de calentamientos y enfriamientos controlados.

En el caso de los aceros, se diferencian los tratamientos térmicos que no modifican la composición química del producto, que serán tratados en este capítulo, de aquellos otros que incorporan nuevos elementos químicos en el interior de las piezas tratadas y que se desarrollarán en el capítulo siguiente.

Cualquier tratamiento térmico consta al menos de tres etapas :

- a) **CALENTAMIENTO.**- Al calentar una pieza (redondo) de acero en el interior de un horno apropiado, el calor se transmite desde la atmósfera del horno hacia el interior de la pieza a través de la superficie de la misma, de manera que en un instante cualquiera se detectaría la existencia de un gradiente térmico a lo largo de su diámetro : las regiones superficiales estarán más calientes y las interiores más frías.

Estos gradientes se pueden mitigar si se utilizan velocidades de calentamiento muy lentas o bien cuando se tratan piezas muy pequeñas. Por otro lado, a consecuencia de la dilatación térmica diferencial introducida, aparecerán unas tensiones internas.

La magnitud de las dilataciones diferenciales (y en consecuencia de las tensiones internas) se incrementará si el acero en el curso de su calentamiento sufre cambios estructurales. En el supuesto de una austenización, la transformación de las estructuras ferrito – perlíticas en austenita tiene lugar con una disminución de volumen, dando lugar a una contracción de la región periférica cuando el núcleo de la pieza, más frío, se está expandiendo en virtud del calentamiento, y más adelante, cuando se alcanza una temperatura para la que tiene lugar la transformación austenítica del núcleo, éste se contrae cuando la periferia de la pieza se sigue calentando y, en consecuencia, se está expandiendo.

En el caso de los aceros de uso más general, con el fin de reducir las tensiones internas durante la fase de calentamiento, se recomienda que la duración del calentamiento de un redondo desde temperatura ambiente hasta la temperatura de austenización (expresada en horas) sea igual al diámetro del redondo en pulgadas dividido por dos. Si expresamos el diámetro en mm., las horas de duración del calentamiento saldrían de dividir el diámetro del redondo por 50

Si además la pieza a tratar tiene una superficie brillante en vez de rugosa, la transmisión de calor hacia el interior de la misma se realiza en forma lenta y en este caso habría que duplicar o triplicar la duración del calentamiento. Habría que aumentar también la duración del calentamiento cuando se quisiera tratar un acero muy aleado cuya conductividad térmica puede ser mucho menor que la de un acero al carbono.

- b) **MANTENIMIENTO A TEMPERATURA CONSTANTE.** - El tiempo de permanencia a alta temperatura debe ser el suficiente no solo para conseguir igualar la temperatura en toda la pieza sino también para lograr la máxima uniformidad estructural posible.

En el caso de los aceros de uso más general se recomienda mantener la temperatura (en el caso de la austenización) una hora por cada pulgada de diámetro de la pieza a tratar (aproximadamente una hora por cada 25 mm), siempre que ésta se haya calentado al ritmo indicado en el sub apartado anterior.

También es importante destacar que la temperatura de permanencia durante la austenización de los aceros será función del tipo de acero a tratar. Los aceros hipoeutectoides se llevan hasta una temperatura superior a A_3 ($A_3 + 40^\circ\text{C}$ por ejemplo) para lograr una austenización completa, mientras que, por el contrario, los aceros hipereutectoides, con el fin de evitar los riesgos de quemado (inicio de fusión, véase el diagrama hierro – carbono), se austenizan de manera incompleta, calentándolos hasta una temperatura inferior a A_{cm} ($A_i + 40^\circ\text{C}$, por ejemplo)

- c) **ENFRIAMIENTO.** - La etapa de enfriamiento es perjudicial cuando la diferencia los tratamientos térmicos más habituales, debe ser la estrictamente necesaria para conseguir las microestructuras finales objetivo de cada tratamiento. También suele ser en esta etapa cuando se generan las tensiones residuales más importantes, especialmente en el caso del tratamiento de temple, que se ha descrito en el capítulo 4.

También en esta etapa el riesgo de generar altas tensiones residuales disminuye cuanto más pequeña es la pieza a tratar, porque el gradiente térmico que existirá a lo largo de su diámetro es menor.

5.2.5 TRATAMIENTOS TÉRMICOS FUNDAMENTALES

Los tratamientos térmicos principales son el temple, revenido, normalizado, recocido y, los distintos tratamientos isotérmicos y termomecánicos.

5.2.6 METALOGRAFÍA

La metalografía es la ciencia que estudia las características micro estructurales o constitutivas de un metal o aleación, relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico, para ello es necesario obtener muestras que sean representativas y que no presenten alteraciones debidas a la extracción y/o preparación metalográfica.

Los pasos a seguir para una preparación metalográfica son los siguientes :

- a) **CORTE METALOGRÁFICO.**- Cortar la muestra con una sierra metalográfica, es un equipo capaz de cortar con un disco especial de corte por abrasión, mientras suministra un gran caudal de refrigerante, evitando así el sobrecalentamiento de

la muestra. De este modo, no se alteran las condiciones micro estructurales de la misma.

- b) INCLUIDO METALOGRAFICO.-** La muestra cortada se incluye en resina para su mejor tratamiento posterior y almacenado. La inclusión se puede realizar mediante resina en frío: normalmente dos componentes, resina en polvo y un catalizador en líquido, o bien en caliente : mediante una incluidora, que, mediante una resistencia interior calienta la resina (monocomponente) hasta que se deshace. La misma máquina tiene la capacidad de enfriar la muestra, por lo que es un proceso recomendado en caso de requerimientos de muchas muestras al cabo del día.
- c) PULIDO METALOGRAFICO.-** La etapa del pulimento es ejecutada en general con paños macizos colocados sobre platos giratorios circulares, sobre los cuales son depositadas pequeñas cantidades de abrasivos, en general diamante industrial en polvo fino o bien en suspensión, con granulometrías como por ejemplo de 10, 6, 3, 1, y 0,25 micras

El pulido se realiza sujetando la muestra a tratar con la mano o bien mediante un cabezal automático para pulir varias muestras a la vez. Este ejerce una presión pre-configurada hacia el disco o paño de desbaste o pulido durante un tiempo concreto. Estos parámetros deben ser configurados según tipo de material (dureza, estado del pulido, etc.) Opcionalmente existen sistemas con dosificador automático de suspensión diamantada.

5.2.7 ATAQUE QUÍMICO

Existe una variedad de ataques químicos, para diferentes tipos de metales y situaciones. En general, el ataque es hecho por inmersión o fregado con algodón embebido en el líquido escogido por la región a ser observada, durante algunos segundos hasta que la estructura o defecto sea revelada. Uno de los más usados es el nital, (ácido nítrico – 5% y alcohol – 95%), para la gran mayoría de los metales ferrosos. Una guía de los ataques químicos utilizados para revelar las fases y microconstituyentes de metales y aleaciones se pueden ver en la norma ASTM E407 – 07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

5.2.8 MICROSCOPIO

Utilización de lupas estereoscópicas (que favorecen la profundidad de foco y permiten por tanto, visión tridimensional del área observada) con aumentos que pueden variar de 5x a 64x (mm)

El principal instrumento para la realización de un examen metalográfico lo constituye el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50x y 2 000x (mm)

El microscopio metalográfico, debido a la opacidad de los metales y aleaciones, opera con la luz reflejada por el metal. Por lo que para poder observar la muestra es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie.

Existe una norma internacional ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens que trata sobre las correctas técnicas de preparación de muestras metalográficas.

VI OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ACERO AL CARBONO

6.1 CALCULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para calcular el sistema de alimentación se utilizó una muestra de una pieza o modelo de madera Ver Figura N° 4

FIGURA N° 4
MUESTRA O MODELO DE MADERA



Fuente : Empresa Fayconapi

6.1.1 CALCULO DEL PEZO DE LA MUESTRA

a) Se pesa la pieza de madera en una balanza electrónica.

$$W = 290 \text{ Kg}$$

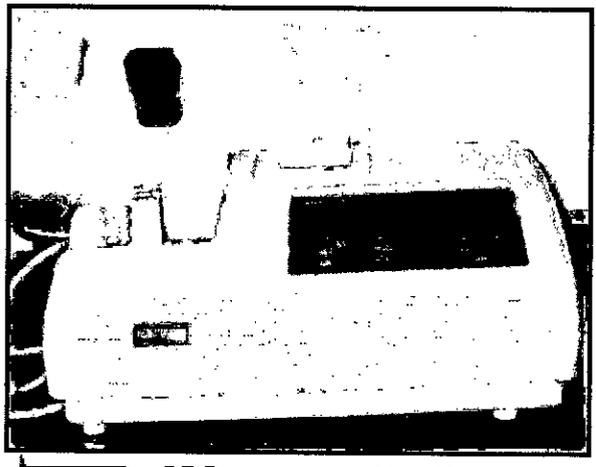
6.1.2 CALCULO DEL PESO DEL ALIMENTADOR

Se realizó de la siguiente manera :

Walimentador : $W*\%C*3$
Walimentador : $290*2,5*3$
Walimentador : 21,75

FIGURA N° 5

BALANZA ELECTRONICA – TORREY LPCR20



Fuente : Empresa Fayconapi

6.1.3 CALCULO DEL DIAMETRO DEL ALIMENTADOR

- a) Una vez que tenemos el peso del alimentador con la siguiente Tabla N° 1 calculamos el diámetro del alimentador.

TABLA N° 1

Manguito	Peso (Kg)	Neck (cm)
50 UL	0,93	3,00
60 UL	1,60	3,60
70 UL	2,70	5,40
80 UL	3,25	5,92
90 UL	5,40	6,66
100 UL	8,05	7,40
110 UL	11,00	8,14
120 UL	13,00	8,88
130 UL	15,40	9,62
140 UL	20,50	10,36
150 UL	26,00	11,10
160 UL	31,00	11,84
170 UL	38,75	12,58
180 UL	42,70	13,32
190 UL	48,10	14,06
200 UL	53,00	14,80
210 UL	70,30	15,54
220 UL	81,90	16,28
230 UL	92,00	17,02

UL = Diámetro del alimentador

NECK = Distancia del alimentador a la pieza.

Fuente : Elaboración propia

- b) Como el peso es del alimentador es 21,75 Kg, el diámetro del alimentador será de 150UL (mm)

6.1.4 CALCULO DEL LA DISTANCIA DE ALIMENTACIÓN

Se calcula utilizando la siguiente fórmula :

$$\sqrt{\frac{e}{(10*2,45)}} * 12 * 2,45 + Neck \quad (2)$$

Donde :

e : Espesor de la pieza

D : 55,95 cm

6.1.5 CALCULO DEL ALIMENTADORES POR PIEZA

Para el cálculo de numero de alimentadores dividiremos la longitud mayor de la pieza a alimentar entre distancia de alimentación

Nº de alimentadores : 106 cm / 55,95 cm

Nº de alimentadores : 1,89 = 2 (aprox.)

6.2 CALCULO DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL ACERO CARBONO

6.2.1 MOLDEADO Y COLADA

- a) **Moldeado.**- Los lingotes se forman por moldeado o molde vertiendo el metal líquido en unos moldes hechos de metal o de arena, según los casos. Tanto el metal como la arena tienen la ventaja de su porosidad el cual permite la salida de los gases. Moldear es producir un cuerpo rígido a partir de material sin forma. A los métodos de moldeo de materiales metálicos corresponden, entre otros, el moldeo y la pulvimetalurgia.

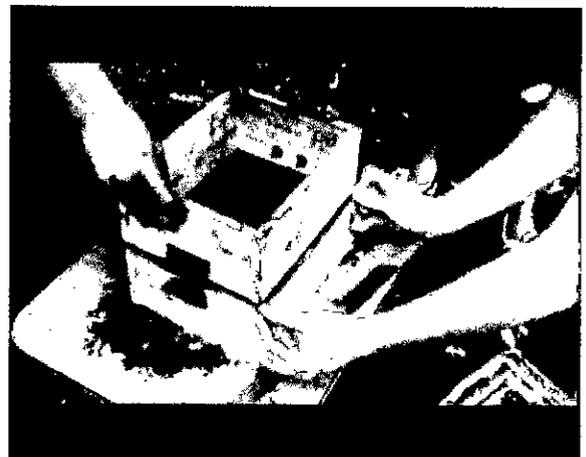
FIGURA N° 6

MODELERIA



FIGURA N° 7

MOLDE



Fuente : Empresa Fayconapi

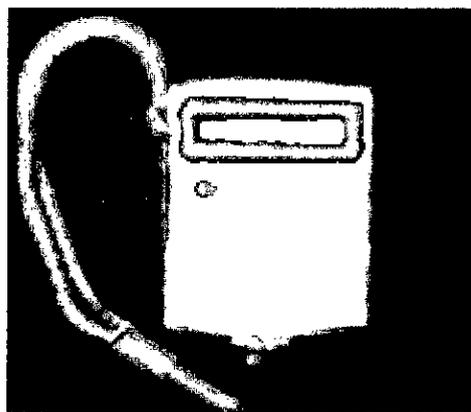
- b) **Colada.**- La colada o vaciado es el proceso que da forma a un objeto al hacer entrar material líquido en un agujero o cavidad que se llama molde y se deja

solidificar el líquido. Cuando el material se solidifica en la cavidad retiene la forma deseada. Después, se retira el molde y queda el objeto sólido conformado.

Para este proceso utilizaremos un horno de 600 Kg, donde vamos a agregar chatarra de hierro, silicio, carbón y manganeso a una temperatura promedio de 1500°C

FIGURA N° 8

DURÓMETRO ZION NTD



Fuente : Empresa Fayconapi

6.2.2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

TABLA N° 2

BALANCE DE HORNO

	%	%C	%Si	%Mn	%Cr	%C	%Si	%Mn	%Cr
Chatarra I	83,33	0,15	0,15	0,45	0	0,124995	0,124995	0,374985	0
Chatarra II	16,67	0,36	0,27	1,3	0,4	0,060012	0,045009	0,21671	0,06668
Retorno	0,00	0,2	0,5	0,55	0,2	0	0	0	0
Grafito	0,05	98	–	–	–	0,044993	–	–	–
Fe – Si	0,57	–	75	–	–	–	0,429996	–	–
Fe – Mn	0,28	–	–	75	–	–	–	0,208305	–
Fe – Cr	0,18	–	–	–	75	–	–	–	0,13332

Fuente : Elaboración propia

Del horno de inducción se toma cinco muestras para llevarlas al laboratorio, donde analizaremos la composición química hasta llegar a una óptima composición del acero carbono, si es necesario se tendrá que añadir más chatarra o elemento químico.

6.3 TÉCNICA ANALÍTICA EMPLEADA

Determinación de la composición química (C, Si, Mn, Cr) en un espectrofotómetro.

FIGURA N° 9

HORNO DE INDUCCION

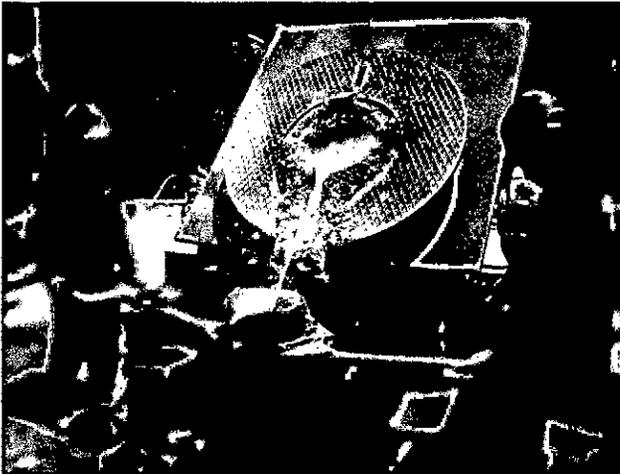


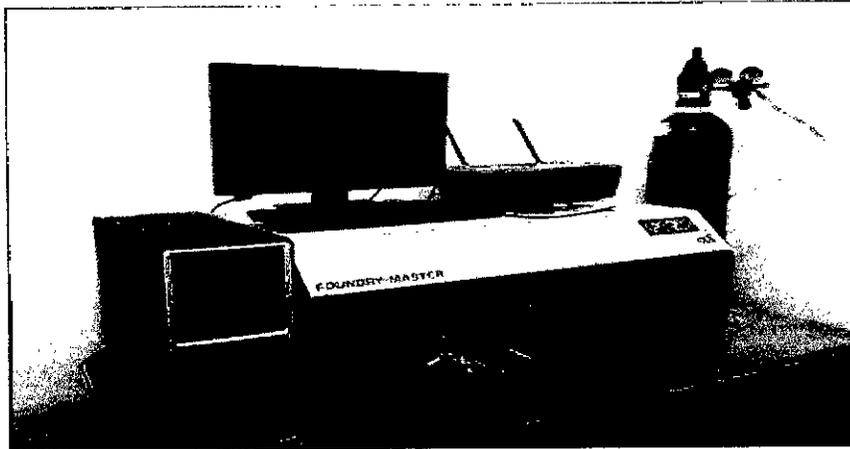
FIGURA N° 10

VACIADO DEL METAL



Fuente : Empresa Fayconapi

FIGURA N° 11
ESPECTOFOTÓMETRO DE CHISPA



Fuente : Empresa Fayconapi

El espectrofotómetro de chispa garantiza muchos años de estabilidad instrumental, confiabilidad y precisión en cualquier laboratorio metalúrgico o control de producción en fundiciones.

Características :

Para cumplir con las demandas más exigentes, el sistema conceptual engloba los siguientes factores críticos para garantizar el éxito :

- a) Velocidad y precisión, incluso en ultratrazas**
- b) Capacidad para identificar y contar inclusiones y calcular los índices de limpieza de aceros**
- c) Estabilidad y confiabilidad sin parangón**
- d) El más amplio rango de metales posibles de analizar**
- e) Calibración de fábrica de primera clase**

- f) Facilidad de operación con software de altas prestaciones
- g) Sistemas opcionales automáticos de manipulación de muestras
- h) Modularidad para obtener actualizaciones cuando se requiere

6.3.1 CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se realizó el siguiente procedimiento :

- a) Colocar una muestra en el espectrofotómetro bien limpio y esmerilado.
- b) Calibrar el nivel de argón.
- c) Utilizar el software para hallar el porcentaje de composición.
- d) Repetir el mismo procedimiento hasta obtener la composición deseada

6.4 CALCULO DE LA CURVA DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Los tratamientos térmicos, en general, son operaciones de calentamiento y enfriamiento de los metales o aleaciones, a temperaturas y velocidades variables, mediante los cuales se trata de conseguir cambios en la estructura cristalina, cambio de fases, bien en su número o proporción, o distribución, permaneciendo su naturaleza, es decir, su composición química inalterable. A continuación se describen, como vamos a aplicar estos tratamientos sobre un acero, que es un material "tratable por excelencia", Los tratamientos térmicos fundamentales como son el recocido, temple y revenido, adquieren al ser aplicados a los aceros, una gran variedad de matices lo que permite obtener el máximo rendimiento en función de su aplicación al

acero y así podemos obtener un acero con gran temple y resistencia al desgaste y vida de trabajo.

Se procede de la siguiente manera :

- a) Una vez que tenemos la pieza acabada se procede a introducirlo a horno de tratamiento térmico.
- b) Para este tratamiento térmico de Normalizado lo llevaremos poco a poco hasta llegar a una temperatura deseada y obtener la dureza.
 - 1) Se calentó la pieza hasta 630°C a una velocidad de 11°C/min
 - 2) Luego de 10 minutos en 630°C se calentó hasta 800°C a razón de 4°C/min
 - 3) Luego de 10 minutos en 800°C se calentó hasta 830°C
 - 4) Se mantuvo a 830°C durante 42 minutos y finalmente se procedió a enfriar dentro del horno.
- c) Una vez que retira la pieza del horno se procede a medir la dureza con el durómetro.

FIGURA N° 12

TRATAMIENTO TERMICO



Fuente : Empresa Fayconapi

TABLA N° 3

MÉTODOS ANALÍTICOS Y EQUIPOS UTILIZADOS

PARÁMETROS	MÉTODOS ANALÍTICOS	EQUIPOS
Dureza	Durómetro	Durómetro
Temperatura	Calentamiento	Horno de Tratamiento Térmico
Fusión		Horno de Inducción
Metales (C, Si, Mn, Cr)	Medida directa por absorción atómica.	Espectrofotómetro de Metales

Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 4

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA ARENA SILICE

CARACTERÍSTICAS	VALOR RECOMENDADO
Composición	98% Arena silice
Punto de Fusión	1 760° C
SiO ₂	98%
Contenido SiO ₂ – Cuarzo	99%
Granulometría	En polvo
Tamaño	1/16 a 2 mm
Color	Blanco – Gris
Peso Libra/Pie ³	30 – 50
pH solución saturada	12,4
Impurezas	No objetable

Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 5

ESTÁNDARES – ACERO 1020

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)
C	0,18 – 0,23
Si	0,3 – 0,6
Cr	0,4 – Max
Mn	0,5 – 0,7

Fuente : Empresa Fayconapi

TABLA N° 6

ACERO 1045

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)
C	0,43 – 0,50
Si	0,3 – 0,6
Cr	0,4 – Max
Mn	0,5 – 0,7

Fuente : Empresa Fayconapi

TABLA N° 7

ACERO 1060

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)
C	0,55 – 0,65
Si	0,3 – 0,6
Cr	0,4 – Max
Mn	0,5 – 0,7

Fuente : Elaboración propia. (Empresa Fayconapi)

VII APORTES REALIZADOS EN LA EMPRESA

El aporte realizado en la empresa FAYCONAPI :

- a) La verificación del proceso de La fundición del acero desde el ingreso de la materia prima (insumos, chatarra), así como los resultados en el laboratorio.
- b) El control de producción, elaboración mensual de reportes de producto, elaboración de ratios, flujogramas, optimización de proceso, reducción de mermas.
- c) El balance de carga en el horno de inducción, para reducir pérdidas y obtener un óptimo balance de elementos químicos con lo cual se obtuvo productos de buena calidad.

TABLA N° 8
COMPOSICIÓN QUÍMICA

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%P	%S	%Al
0,6	0,6	0,6	0,3	0,08	0,05	0,05	0,04
0,9	Max.	1	0,6	0,15	Max.	Max.	0,08

	%	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo
Chatarra	100	0,13	0,15	0,45	0	0	0,13	0,15	0,45	0	0
Retorno	0	0,86	0,6	0,8	0,5	0	0	0	0	0	0
Grafito	0,96	75	-	-	-	-	0,72	-	-	-	-
Fe - Si	0,60	-	75	-	-	-	-	0,46	-	-	-
Fe - Mn	0,47	-	-	75	-	-	-	-	0,35	-	-
Fe - Mo	0,13	-	-	-	-	75	-	-	-	-	0,1
Fe - Cr	0,67	-	-	-	75	-	-	-	-	0,5	-
		0,85	0,6	0,8	0,5	0,1					

Pesos para agregar al horno – Base (Kg) : 600

	Peso Kg
Chatarra	600
Retorno	0
Grafito	5,78
Fe – Si	3,6
Fe – Mn	2,80
Fe – Mo	0,80
Fe – Cr	4,00

Fuente : Elaboración propia (Fayconapi)

VIII EVALUACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 COMPOSICION QUÍMICA DE LA MUESTRA

8.1.1 BALANCE DE CARGA N° 1

TABLA N° 9
BALANCE DE HORNO

	%	%C	%Si	%Mn	%Cr	%C	%Si	%Mn	%Cr
Chatarra I	83,33	0,15	0,15	0,45	0	0,124995	0,124995	0,374985	0
Chatarra II	16,67	0,36	0,27	1,3	0,4	0,060012	0,045009	0,21671	0,06668
Retorno	0,00	0,2	0,5	0,55	0,2	0	0	0	0
Grafito	0,05	98	–	–	–	0,044993	–	–	–
Fe – Si	0,57	–	75	–	–	–	0,429996	–	–
Fe – Mn	0,28	–	–	75	–	–	–	0,208305	–
Fe – Cr	0,18	–	–	–	75	–	–	–	0,13332

Fuente : Empresa Fayconapi

Pesos agregar al horno : Base 600 Kg

TABLA N° 10
BALANCE DE CARGA FINAL

	Peso Kg
Chatarra I	500
Chatarra II	100
Retorno	0
Grafito	0,28
Fe – Si	3,44
Fe – Mn	1,67
Fe – Cr	1,07

Fuente : Empresa Fayconapi

8.1.2 BALANCE DE CARGA N° 2

TABLA N° 11

BALANCE DE HORNO

	%	%C	%Si	%Mn	%Cr	%C	%Si	%Mn	%Cr
Chatarra	100	0,13	0,15	0,45	0	0,13	0,15	0,45	0
Retorno	0	0,45	0,6	0,6	0,2	0	0	0	0
Grafito	0,35	98	-	-	-	0,34	-	-	-
Fe - Si	0,40	-	75	-	-	-	0,3	-	-
Fe - Mn	0,20	-	-	75	-	-	-	0,15	-
Fe - Cr	0,27	-	-	-	75	-	-	-	0,2

Fuente : Empresa Fayconapi

Pesos agregar al horno : Base 600 Kg

TABLA N° 12

BALANCE DE CARGA FINAL

	Peso Kg
Chatarra	600
Retorno	0
Grafito	2,08
Fe - Si	2,4
Fe - Mn	1,20
Fe - Cr	1,60

Fuente : Empresa Fayconapi

8.1.3 BALANCE DE CARGA N° 3

TABLA N° 13

BALANCE DE HORNO

	%	%C	%Si	%Mn	%Cr	%C	%Si	%Mn	%Cr
Chatarra plancha	200	0,13	0,15	0,45	0	0,26	0,3	0,9	0
Chatarra II	33,00	0,36	0,27	1,3	0,4	0,1188	0,0891	0,429	0,132
Retorno	6,60	0,63	0,6	0,55	0,2	0,04158	0,0396	0,0363	0,0132
Grafito	0,34	98	-	-	-	0,32842	-	-	-
Fe - Si	0,35	-	75	-	-	-	0,2604	-	-
Fe - Mn	- 0,52	-	-	75	-	-	-	- 0,3863	-
Fe - Cr	0,25	-	-	-	75	-	-	-	0,1868

Fuente : Empresa Fayconapi

Pesos agregar al horno : Base 600 Kg

TABLA N° 14

BALANCE DE CARGA FINAL

	Peso Kg
Chatarra	600
Retorno	0
Grafito	2,57
Fe - Si	2,80
Fe - Mn	2,40
Fe - Cr	1,60

Fuente : Empresa Fayconapi

8.2 TRATAMIENTO TERMICO – NORMALIZADO

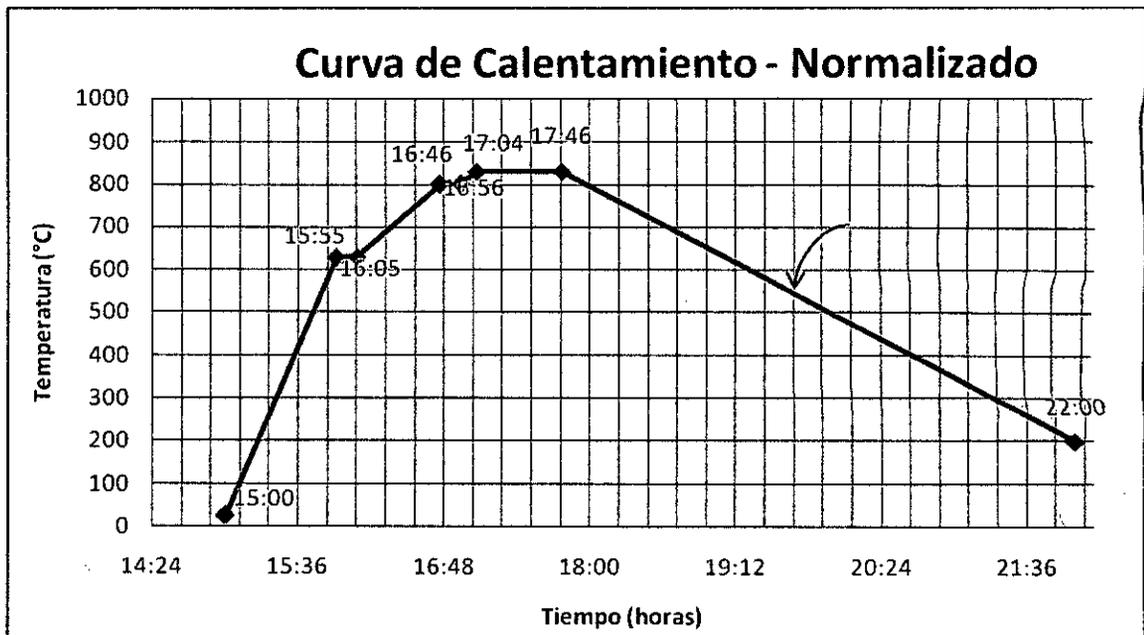
8.2.1 TIEMPO vs TEMPERATURA N° 1

TABLA N° 15

Tiempo (h)	T (°C)
15:00	25
15:55	630
16:05	630
16:46	800
16:56	800
17:04	830
17:46	830
22:00	200

Fuente : Empresa Fayconapi

GRÁFICO N° 1



Fuente : Empresa Fayconapi

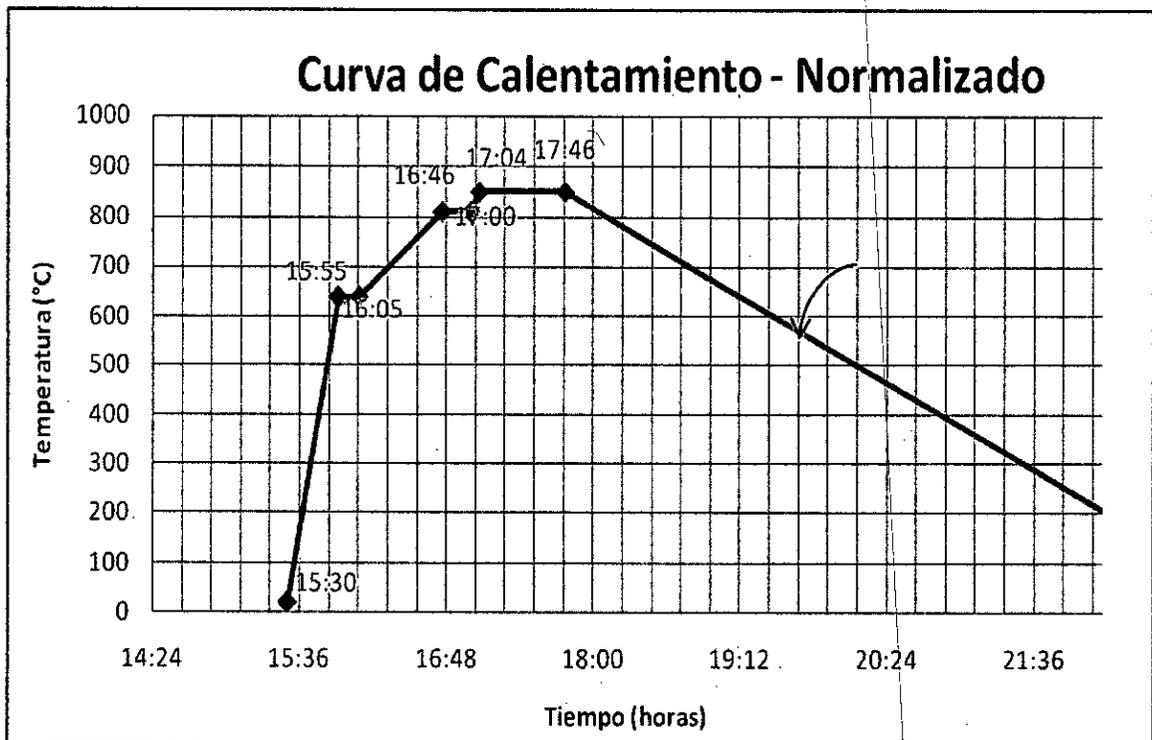
8.2.2 TIEMPO vs TEMPERATURA N° 2

TABLA N° 16

Tiempo (h)	T (°C)
15:30	20
15:55	640
16:05	640
16:46	810
17:00	810
17:04	850
17:46	850
22:20	180

Fuente : Empresa Fayconapi

GRÁFICO N° 2



Fuente : Empresa Fayconapi

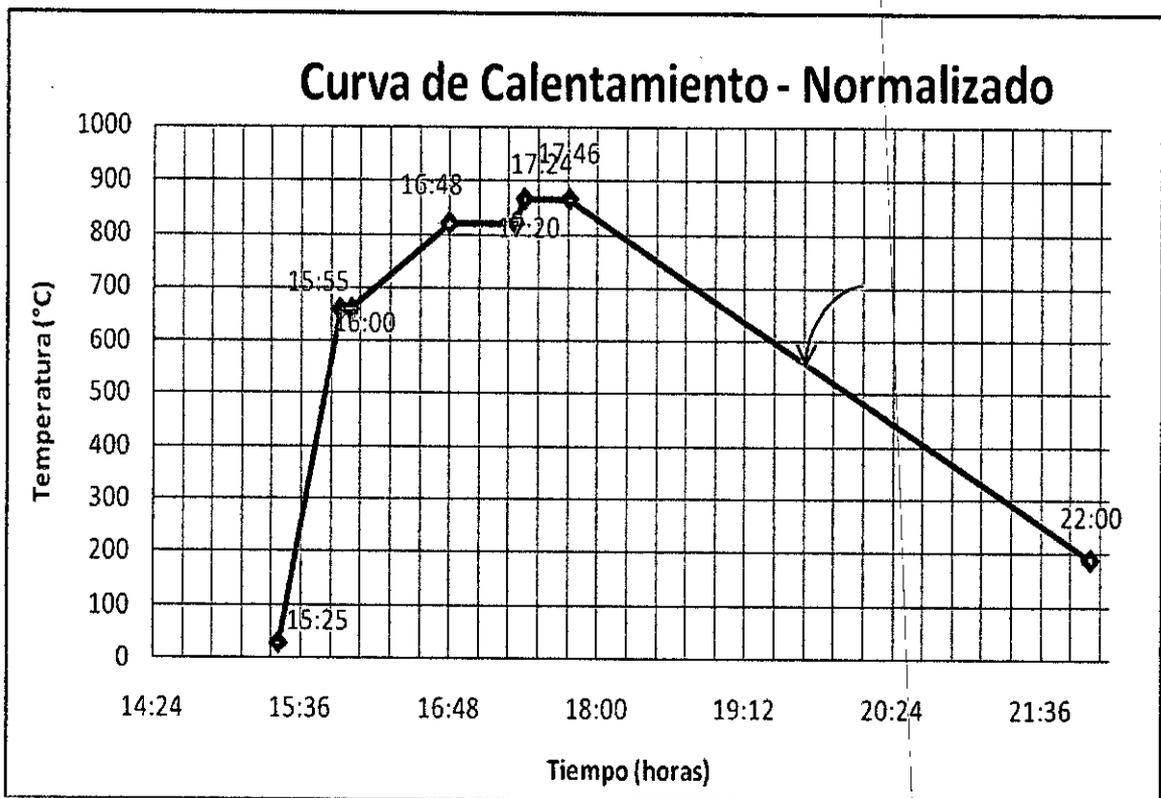
8.2.3 TIEMPO vs TEMPERATURA N° 3

TABLA N° 17

Tiempo (h)	T (°C)
15:25	30
15:55	660
16:00	660
16:48	820
17:20	820
17:24	865
17:46	865
22:00	190

Fuente : Empresa Fayconapi

GRÁFICO N° 3



Fuente : Empresa Fayconapi

8.3 EVALUACIÓN DEL COSTO DEL PROCESO

8.3.1 COSTO DE PRODUCCIÓN

Costos de producción por pieza

Costo de la caja de moldeo

Mano de obra S/. 25,00

Arena S/. 30,00

Madera S/. 25,00

SUBTOTAL S/. 80,00

Costo del modelo

Mano de obra S/. 25,00

Madera S/. 30,00

SUBTOTAL S/. 75,00

Costo del Horno para derretir la materia prima del horno se necesitan aproximadamente 20 minutos a 1 500°C con el cual el costo para empresa de KW/h es de S/. 271,98; para derretir la pieza se necesitan 1,33 horas y considerando el consumo del horno (horno de resistencia eléctrica) el costo aproximado son de S/. 416,12

SUBTOTAL S/. 416,12

8.3.2 COSTO DE MATERIA PRIMA

Costo de materia prima teniendo en cuenta que la sección de bebedero fue retirada posteriormente no se toma como materia prima debido a que esta sección puede volver a reutilizar, la masa de total de la pieza fue de 290,5 Kg, teniendo en cuenta que el costo por kilogramo es S/. 12,55/kilogramos, con esto podemos hallar el costo de la pieza.

Costos por maquinado tiempo de maquinado 1 hora Costos por hora de maquinado \$ 80 000 (incluye operario, consumo energético, herramienta de corte, fluido de corte)

TABLA N° 18
COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

	SOLES
Costo total de la pieza	3 645,78
Costo materia prima	1 053,00
Costo maquinado	80,00
Costo horno	416,12
Costo de caja de moldeo	80,00
Costo modelo	75,00
TOTAL	1 704,12

Fuente : Elaboración propia. (Empresa Fayconapi)

Como resultado final se obtiene un acero con alta calidad en los rangos establecidos nacional e internacional del acero, para esto se debe seguir todos los pasos importantes, desde el pesado del molde hasta el proceso final donde se obtuvo un acero de alto carbono de buena calidad a un buen precio.

IX CONCLUSIONES

- 1) Para obtener un buen sistema de alimentación es necesario tener en cuenta varios factores importantes como el tipo de molde, la arena sílice y el diseño de alimentación del molde.**
- 2) El porcentaje de composición del C = 0,15%, Si = 0,15% y Mn = 0,45%, son los más adecuados para el acero 1020**
- 3) La curva de tratamiento térmico de normalizado es el más adecuado para aumentar la resistencia y dureza del acero 1020, 1045, 1060**
- 4) El costo de producción total es menor que el costo total de la pieza, por lo tanto es viable el proceso de fundición.**

X RECOMENDACIONES

- 1) Emplear nuevos procesos y técnicas para optimizar la producción y calidad.**
- 2) Para obtener una buena calidad se debe tener en cuenta estos parámetros :
Llenado incompleto, junta fría, metal granoso, cavidad por contracción y micro porosidad.**
- 3) Las empresas que se dedican a las labores de beneficio de minerales deben tratar o recircular sus efluentes para no contaminar el medio ambiente.**

XI BIBLIOGRAFÍA

- 1) Schey, J. "Procesos de Manufactura"
(3th ed.) México : Mc Graw – Hill/ Interamericana Editores, S.A de C.V. (2002)
- 2) Neely "Materiales y Procesos de Manufactura"
México : Editorial Limusa, S.A. de C.V. (1992)
- 3) Anstead, Ostwald y Begeman "Procesos de Manufactura"
México : Editorial Continental, S.A. de C.V. (1999)
- 4) Heinrich, G. "Moldeo y Conformación"
España : Editorial Reverté, S.A. (1979)
- 5) De Garmo, Black y Kohser "Materiales y Procesos de Fabricación"
Vol 2 (2th ed.) España: Editorial Reverté, S.A. (1994)
- 6) Kalpakjian, Serope y Schmid "Manufactura, Ingeniería y Tecnología"
(4th ed.) México : Pearson Educación de México, S.A. de C.V. (2002)
- 7) Appold, Feiler, Reinhard "Tecnología de los Metales"
y Schmidt
España : Editorial Reverté, S.A. (1985)
- 8) Ribas, C. "Diseño Concurrente"
España : Ediciones UPC. (2002)
- 9) Rodríguez, Castro y del Real "Procesos Industriales para Materiales Metálicos"
(2th ed.) España : Editorial Visión Net
- 10) <http://es.wikipedia.org/wiki/Fundici%C3%B3n>

ANEXOS

- ANEXO N° 1** FASES Y ESTRUCTURAS
- ANEXO N° 2** TRANSFORMACIONES EN EL DIAGRAMA HIERRO -
CARBONO
- ANEXO N° 3** EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS
TRANSFORMACIONES FERRITO PERLÍTICAS
- ANEXO N° 4** SOLIDIFICACION Y PROCESO DE FUNDICION
- ANEXO N° 5** PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA LA MUESTRA

ANEXO N° 1

FASES Y ESTRUCTURAS

Los aceros y las fundiciones de hierro constituyen con gran diferencia el grupo de materiales metálicos industrialmente más utilizado, porque se pueden fabricar en grandes cantidades y con costes relativamente bajos. Además, sus propiedades en general y las mecánicas en particular abarcan un intervalo muy amplio, que van desde productos con resistencias moderadas (200 – 300 MPa) y ductilidades altas hasta aquellos otros caracterizados por una de las resistencias mecánicas mayores en la gama de las aleaciones metálicas (2.000 MPa)

Los aceros y las fundiciones de hierro son materiales basados en las aleaciones de hierro y carbono, a las que también se adicionan otros elementos de aleación, con el propósito, muchas veces, de endurecerlos, porque el metal hierro policristalino con una muy alta pureza (60 ppm de impurezas) es un material muy blando : su límite elástico ronda los 150 MPa

CONSTITUYENTES ALOTRÓPICOS

Al enfriar una muestra de hierro puro desde el estado líquido experimenta una serie de transformaciones que se manifiestan nítidamente con técnicas térmicas y dilatométricas (desprendimientos de calor y variaciones dimensionales respectivamente)

Al calentar la misma muestra se inducen idénticas transformaciones en sentido inverso, aunque ahora las mismas tienen lugar a unas temperaturas ligeramente superiores (histéresis térmica), que a su vez son función de las velocidades de calentamiento y enfriamiento utilizadas. Al enfriar una muestra de hierro puro desde el estado líquido, su solidificación tiene lugar a 1538°C y la estructura cristalina que se forma es cúbica centrada en el cuerpo (BCC, $a = 2,93\text{Å}$) es el hierro.

El hierro es estable hasta que se alcanza la temperatura de 1394°C , temperatura a la que se transforma en hierro γ , de estructura cúbica centrada en las caras (FCC, $a = 3,65\text{Å}$). Finalmente a los 912°C , el hierro γ se transforma en hierro α , de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC, $a = 2,9\text{Å}$), al continuar el enfriamiento hasta temperatura ambiente, la única transformación perceptible es que el hierro se vuelve magnético por debajo de 770°C (temperatura de Curie)

La Figura N° 1 muestra los citados cambios alotrópicos en un registro del volumen atómico del hierro en función de la temperatura. Debe destacarse que todas estas transformaciones aparecen acompañadas de cambios volumétricos; por ejemplo, la transformación en el enfriamiento del hierro γ en hierro α produce un aumento de volumen, que da lugar a la aparición de tensiones internas :

Celda de hierro γ : 4 átomos de hierro, $V = (3,65)^3$

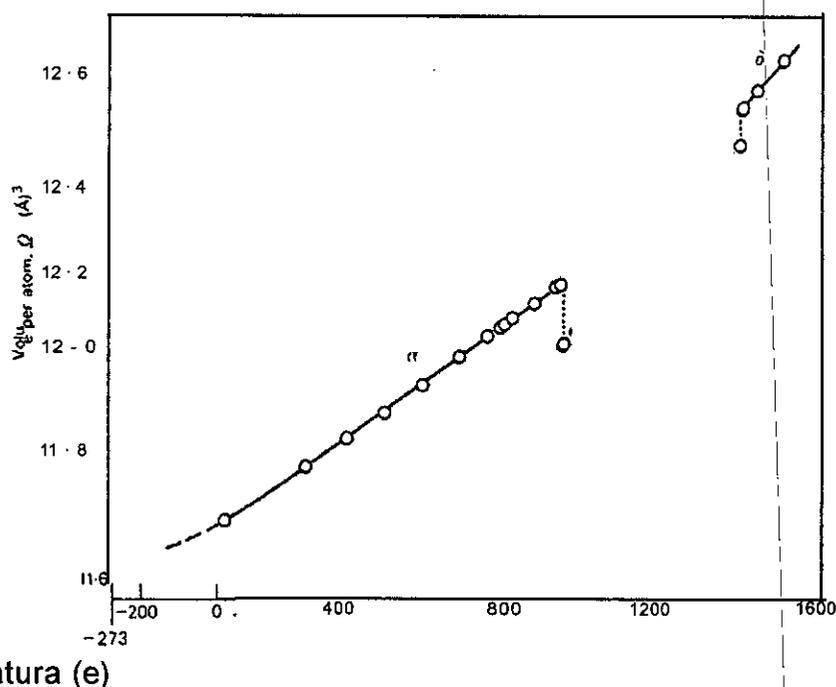
Celda de hierro α : 2 átomos de hierro, $V = (2,9)^3$

$$\Delta V/V = 2 (2,9)^3 - (3,65)^3 / (3,65)^3 = +0,3\%$$

El parámetro de la red del hierro a temperatura ambiente es 2,86 Å

GRÁFICO Nº 4

VOLUMEN ATOMICO VS TEMPERATURA



Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

El conocimiento preciso de las celdas unidad del hierro α y del hierro γ es importante de cara a justificar la solubilidad de los elementos intersticiales, principalmente carbono y nitrógeno, en ambas fases, su difusividad y también en la capacidad de deformación plástica de ambas estructuras.

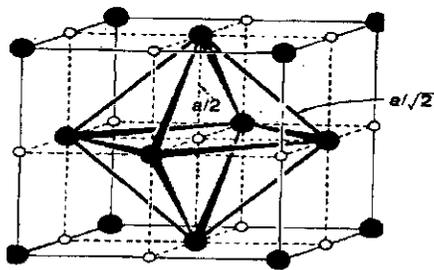
El **Gráfico Nº 4** muestra la disposición atómica de los átomos de hierro en las dos fases alotrópicas. Debe notarse que la estructura FCC es más compacta que la BCC, por otro lado, los intersticios mayores de la estructura BCC son los que ocupan las posiciones tetraédricas y los segundos más grandes son los que ocupan las posiciones octaédricas (octaedro achatado verticalmente), que

ocupan los centros de las caras y los centros de las aristas del cubo, y se debe remarcar que la estructura del hierro γ (FCC), si bien es más compacta, presenta intersticios mayores que la del hierro α (BCC)

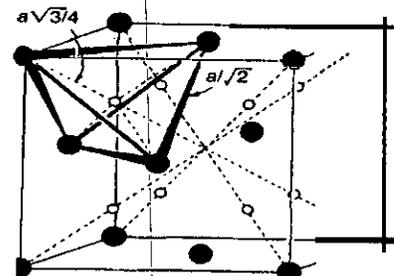
Los intersticios mayores en el hierro γ ocupan posiciones octaédricas, existiendo también intersticios tetraédricos más pequeños. La **Tabla N° 16** da cuenta del tamaño de las mayores esferas que se ajustarían al tamaño de los intersticios de las estructuras FCC y BCC.

FIGURA N° 13

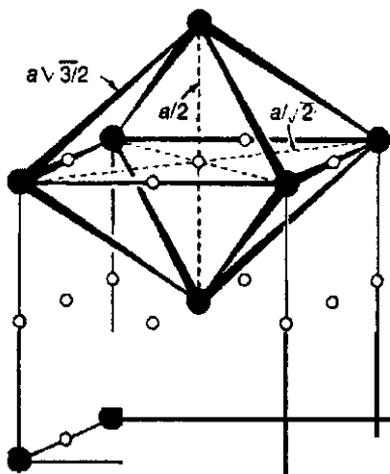
ESTRUCTURAS CRISTALINAS



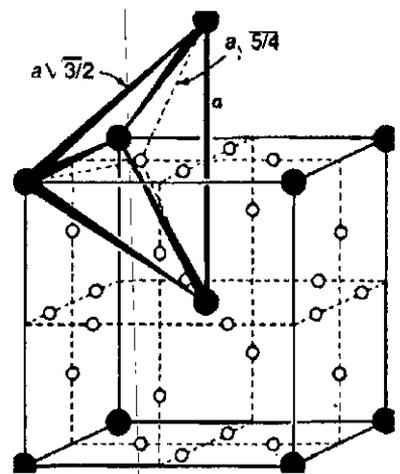
a) Metal atoms o Octahedra interstílicos



b) Metal atoms o Octahedra interstílicos



c) Metal atoms o Octahedra interslices



d) Metal atoms o Octahedra interslices

Fuente : F.J. Belzunce – Universidad de Oviedo

TABLA N° 19

TAMAÑO DE LAS ESFERAS

Estructura	Hueco	Radio	Radio en el hierro Å
BCC	tetraédrico	0,29 r	
BCC	octaédrico	0,15 r	
FCC	tetrédico	0,23 r	
FCC	octaédrico	0,41 r	

Fuente : F.J. Belzunce – Universidad de Oviedo

En las aleaciones del hierro con otros elementos distinguiremos entre los elementos intersticiales y los sustitucionales. Carbono y nitrógeno constituyen los denominados elementos intersticiales (también lo son el boro, oxígeno y el hidrógeno) porque son átomos lo suficientemente pequeños en relación al átomo de hierro como para introducirse en su estructuras ocupando sus huecos internos.

Por el contrario, los demás elementos, también presentes normalmente en los aceros como el manganeso, silicio, cromo, etc., tienen tamaños atómicos mucho

mayor y forman con el hierro soluciones sólidas de sustitución. De cualquier manera, la **Tabla N° 17** refleja que incluso los elementos más pequeños ocupan un volumen mayor que los propios intersticios, de modo que cuando se incorporan a la red del hierro generan una distorsión en la misma.

De este modo, la solubilidad del carbono y nitrógeno en el hierro y es mayor que en el hierro α , al ser mayores sus intersticios, tal y como se refleja en la **Tabla N° 18**, se puede apreciar que ambas solubilidades son extremadamente bajas a temperatura ambiente, siendo muy inferiores al contenido de estos elementos en los aceros industriales, por lo que a temperatura ambiente se encontrarán en formas precipitadas, carburos y nitruros, respectivamente.

TABLA N° 20
RADIOS ATÓMICOS

Elemento	Radio atómico (Á)
Hierro α	1,26
B	0,94
C	0,77
N	0,72
O	0,6
H	0,46

Fuente : F.J. Belzunce – Universidad de Oviedo

Otra diferencia importante a tener en cuenta entre las diferentes estructuras del hierro es su difusividad. La difusión de cualquier elemento es mucho más rápida en el hierro (estructura más abierta) que en el hierro α (estructura más compacta); también la difusividad es siempre mucho más rápida en el caso de

los movimientos de los átomos intersticiales que en el de los átomos sustitucionales, como se aprecia en la Tabla N° 22

CONSTITUYENTES SIMPLES DE LOS ACEROS

Los aceros son aleaciones hierro – carbono. El carbono es un elemento intersticial, que se inserta en los huecos de las diferentes estructuras del hierro.

TABLA N° 21
SOLUBILIDAD DE N – C EN Fe

	Temperatura (°C)	Solubilidad (% peso)
C en hierro y	1150	2,1
C en hierro y	727	0,77
C en hierro a	723	0,02
C en hierro a	20	< 0,00005
N en hierro y	650	2,8
N en hierro y	590	2,35
N en hierro a	590	0,1
N en hierro a	20	< 0,0001

Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

TABLA N° 22

DIFUSIVIDAD

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \text{ CM}^2 \text{ s}$$

Solvente	Soluto	Energía de activ. Q (kJ/mol)	Do (cm ² /s)
Hierro y	Fe	269	0,18
	C	135	0,15
	Cr	405	1,8 10 ⁴
	Ni	280	0,77
	P	293	28,3
	S	202	1,35
Hierro a	Fe	240	0,5
	C	80	6,2 10 ⁻³
	N	76	3 10 ⁻³
	Cr	343	3 1 ⁴
	Ni	258	9,7
	P	230	2,9

Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

La solución sólida de inserción del carbono en el hierro y se denomina austenita. El carbono se coloca siempre en los intersticios octaédricos de esta estructura. La austenita debido a su estructura FCC es una fase blanda, tenaz y amagnética. Sus propiedades mecánicas dependen del contenido de carbono, pero podríamos dar como valores medios representativos una dureza de 300 HB, una carga de rotura de 900 á 1 100 MPa y alargamientos comprendidos entre 30% y 60%

Por otro lado, la solución sólida de inserción del carbono en el hierro a se denomina ferrita. En este caso los átomos de carbono no ocupan los huecos tetrédricos, más grandes, sino los octaédricos, al estar éstos últimos más favorablemente situados para relajar las tensiones inducidas.

Los huecos octédricos en el hierro α son asimétricos, por lo que la inserción en ellos de un átomo de carbono desplaza solamente dos de los seis átomos que lo rodean, lo que desde el punto de vista energético es más favorable. La ferrita, al igual que el hierro α , es magnética por debajo de 770°C . Se trata del constituyente más blando de los aceros, debido en este caso a su bajo contenido en carbono. Tiene una dureza de 90 HB, una resistencia mecánica de 300 MPa y un alargamiento del 400/0.

Existe un tercer constituyente de gran importancia en los aceros. Se trata del carburo de hierro o cementita, de fórmula Fe_3C , esta es la fase que se forma cuando el contenido de carbono de la aleación excede el límite de solubilidad de la ferrita o de la austenita.

La cementita es un compuesto intermetálico que, a diferencia de la ferrita y la austenita, responde a una composición química fija: contiene siempre un 6,67% en peso de carbono. La cementita tiene una estructura cristalina ortorrómbica con los siguientes parámetros de red: $a = 4,52\text{Å}$, $b = 5,09\text{Å}$ y $c = 6,74\text{Å}$. Su celda unidad es compleja y contiene 12 átomos de hierro y 4 átomos de carbono. La cementita es ferromagnética por debajo de 210°C . Se trata igualmente de un compuesto muy duro, el más duro de los aceros (68 HRC) y frágil, cuya densidad vale $7,694\text{ g/cm}^3$.

La cementita es termodinámicamente inestable y por encima de 450°C puede descomponerse en sus componentes individuales, hierro y carbono.

(grafito); sin embargo, el tiempo requerido para que esta descomposición tenga lugar es tan grande que en la práctica, en los aceros binarios Fe-C, nunca ocurre.

ANEXO Nº 2

TRANSFORMACIONES EN EL DIAGRAMA HIERRO – CARBONO

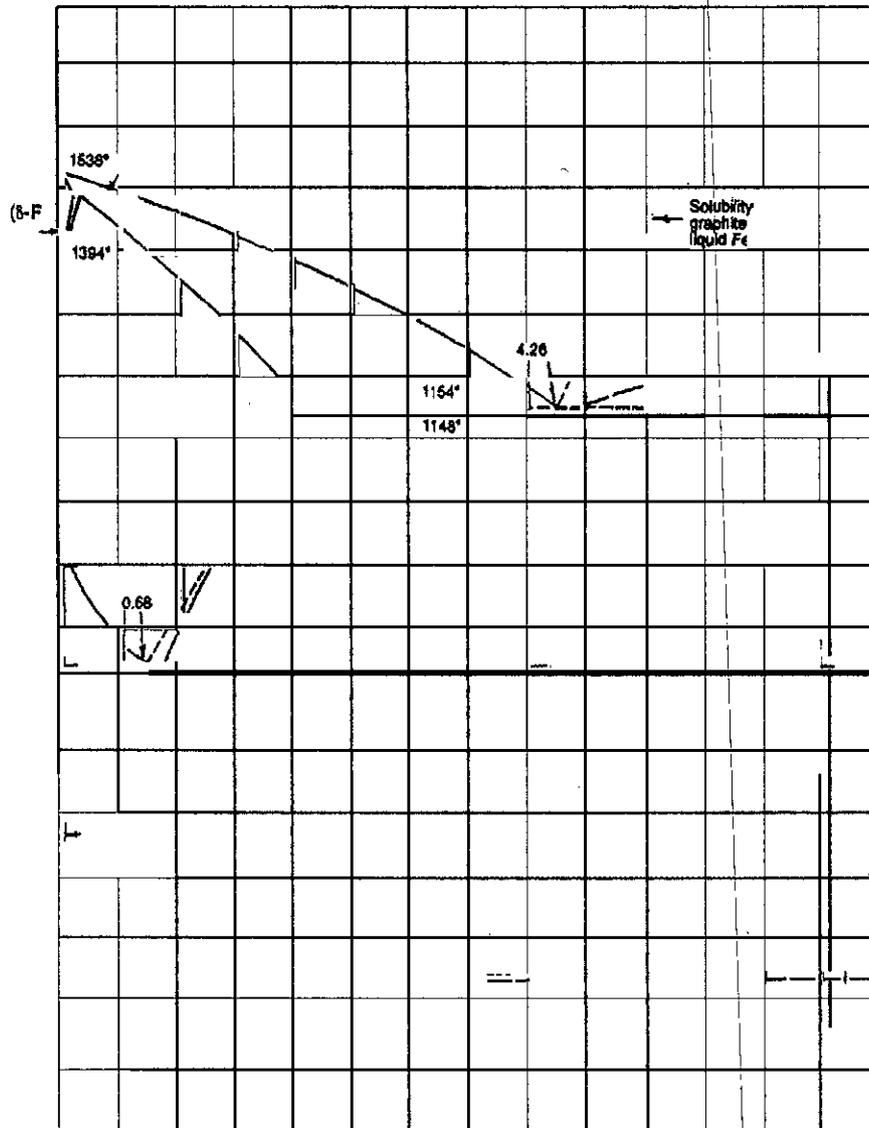
DIAGRAMA HIERRO – CARBONO

Para el estudio de las estructuras de los aceros industriales se necesita, en primer lugar, conocer y manejar con soltura el diagrama hierro – carbono, que se muestra en el **Gráfico Nº 6** se representa en realidad dos diagramas, el metaestable hierro-carbono y el diagrama estable hierro – grafito, porque como se ha indicado en el capítulo anterior, la cementita no es una fase estable, aunque dada la lentitud de su transformación, el diagrama metaestable es el que tiene un mayor interés práctico para el estudio de los aceros. El diagrama estable hierro – grafito solo tiene interés en el estudio de las fundiciones al silicio.

Tomando como base el diagrama metaestable hierro – carbono, se denominan aceros a las aleaciones binarias con contenidos en carbono menor que 2,11%, mientras que las fundiciones de hierro tienen contenidos en carbono superiores al 2,11% (hasta aproximadamente un 5%) Este diagrama muestra con claridad el comportamiento fuertemente gammágeno del carbono : la adición de carbono al hierro y aumenta el dominio térmico de estabilidad de la austenita; así por ejemplo, la temperatura de transformación del hierro γ en hierro δ aumenta hasta 1495° para un contenido en carbono del 0,17% (punto peritéctico del diagrama), mientras que la de la transformación de la austenita en ferrita disminuye hasta 727°C para la aleación con 0,77% de carbono.

GRÁFICO N° 5

DIAGRAMA METAESTABLE DE Fe-C



Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

El diagrama metaestable hierro – carbono muestra tres puntos invariantes característicos :

Punto peritéctico (1 495°C) : Fase líquida (0,53% C) + Fe → δ (0,09% C) Fe y (0,17% C)

Punto eutéctico (1148°C) : Fase líquida (4,3%C) → Austenita (2,11%C) + Fe₃C (6,67%C)

Punto eutectoide (727°C) : Austenita (0,77%C) → Ferrita (0,02%C) + Fe₃C (6,67%C)

Las líneas que delimitan las diferentes regiones del diagrama hierro – carbono identifican las situaciones en las que tienen lugar cambios estructurales: Las temperaturas de transformación se denominan temperaturas críticas, existiendo así tres temperaturas de especial interés : A₁, A₃ y A_{cm}

Las temperaturas A₁ y A₃ son las que respectivamente representan el inicio y el final de la transformación de la austenita desde el dominio donde están presentes las fases ferrita y cementita, mientras que se llama temperatura A_{cm} a aquella que separa el dominio de estabilidad de la austenita de la zona bifásica austenita + cementita. Por lo que estas transformaciones no ocurren exactamente a la misma temperatura al calentar y al enfriar, se denotan a veces como A_r o A_c para describir la transformación en el enfriamiento o en el calentamiento respectivamente (A_{r1}, A_{c1}, por ejemplo)

DESCOMPOSICIÓN DE LA AUSTENITA EN UN ENFRIAMIENTO LENTO

La austenita con un 0,77% de carbono se transforma a los 727°C en el constituyente eutectoide, ferrita más cementita, que se denomina perlita. La perlita de los aceros tiene la morfología típica de los constituyentes eutectoides, es decir, se trata de una disposición fina de láminas adyacentes de las dos fases.

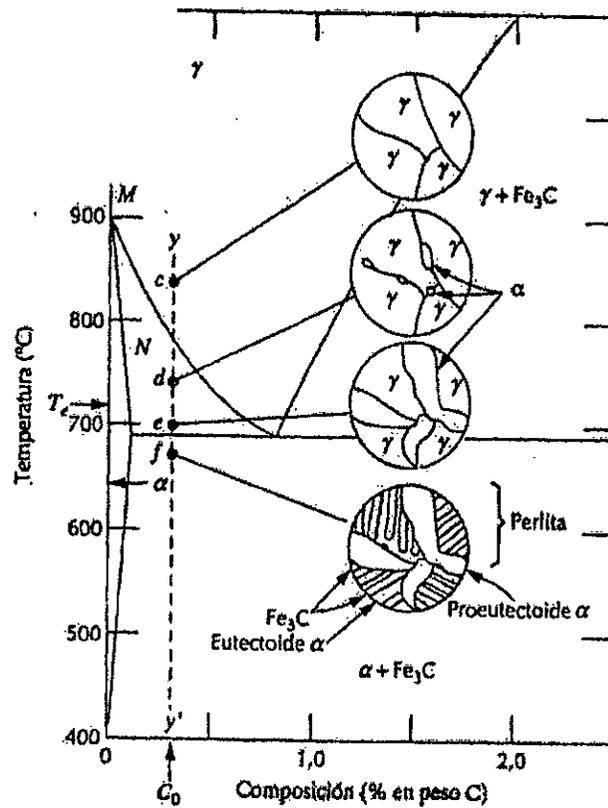
La transformación se inicia con la formación de un primer germen de cementita en la junta entre dos granos de austenita. La formación del germen de cementita implica la difusión del carbono desde zonas adyacentes, quedando éstas empobrecidas en carbono, siendo por lo tanto susceptibles de transformarse en ferrita, al hallarse a una temperatura inferior a la correspondiente a la de su cambio alotrópico. La microestructura a temperatura ambiente del acero de 0,77% de carbono será totalmente perlítica.

Tomando como referencia el hierro puro, debe tenerse en cuenta que en virtud del carácter gammágeno del carbono, el inicio de la transformación de la austenita en ferrita (A_{r_3}) ocurre a una temperatura tanto más baja cuanto mayor es el contenido de carbono de la austenita. Los aceros con un contenido en carbono menor del 0,77% se denominan hipoeutectoides y en su enfriamiento desde la región austenítica comienzan a transformarse por transformación alotrópica en ferrita primaria o proeutectoide y finalmente, cuando se alcanzan los 727°C , la austenita aún no transformada origina perlita.

La Figura N° 14 da cuenta como tiene lugar esta transformación y refleja como la ferrita proeutectoide se origina normalmente en las juntas de grano de la austenita (zonas de mayor energía), luego forma el constituyente matriz del acero.

FIGURA Nº 14

TRANSFORMACIÓN DE FERRITA



Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

Conocidas la carga de rotura de la ferrita (300 MPa) y de la perlita (800 MPa), la regla de las mezclas permite calcular aproximadamente la carga de rotura de cualquier acero hipoeutectoide :

$$R = (\% \text{ ferrita}) 300 + (\% \text{ perlita}) 800 = 300 + 650 (\% \text{ C})$$

Los aceros con un contenido en carbono mayor que el 0,77% se denominan hipereutectoides. En estos supuestos, la transformación de la

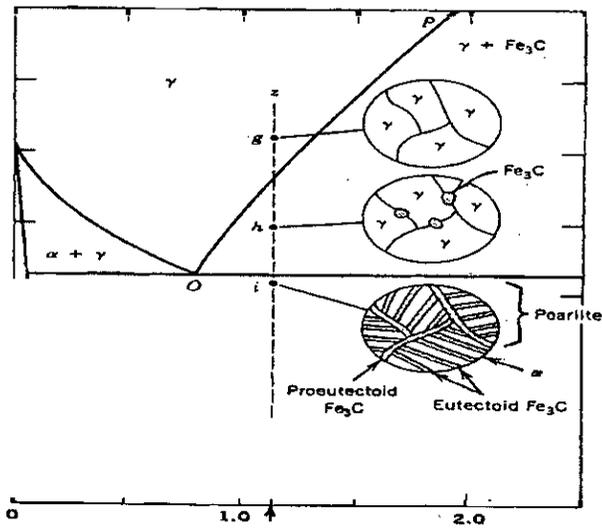
austenita en el enfriamiento comienza cuando se alcanza la temperatura para la que la austenita queda saturada en carbono.

Esta precipitación también empieza en las juntas de grano de la austenita, pero ahora el constituyente primario formado es la cementita (cementita proeutectoide), formándose finalmente perlita al alcanzarse la temperatura eutectoide (**Figura N° 15**) La cementita es ahora el constituyente matriz de estos aceros, se trata de unos productos muy frágiles.

Finalmente, la austenita de los aceros con un contenido en carbono muy bajo (0,02%) se transforma por enfriamiento totalmente en ferrita antes de alcanzar la temperatura eutectoide. Estos aceros no tienen perlita. Sin embargo, al continuar enfriando estos productos hasta temperatura ambiente, la ferrita termina saturándose en carbono, que precipita finalmente en forma de cementita en puntos triples o en juntas de grano : es la denominada cementita terciaria (**Gráfico N° 6**)

FIGURA Nº 15

CEMENTITA

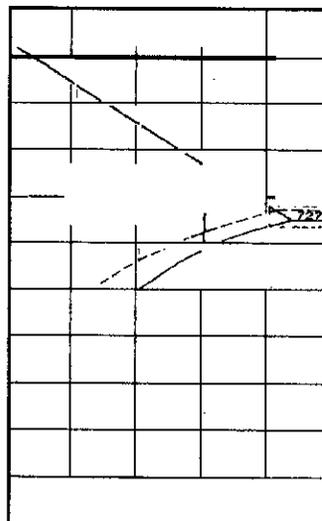


Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

Composición WT% C

GRÁFICO Nº 6

CEMENTITA TERCEARIA



Fe 0.005 0.010 0.015 0.020 0.025
Weight Percentage Carbon

Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

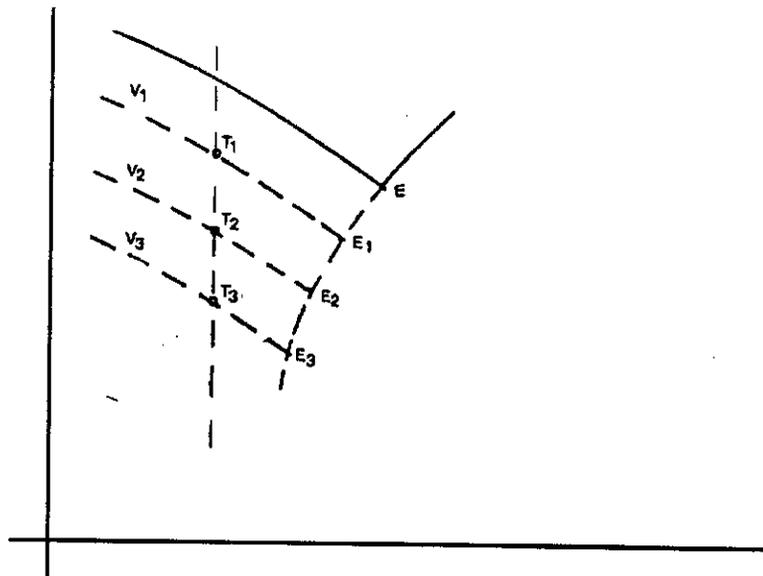
ANEXO N° 3

EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS TRANSFORMACIONES FERRITO PERLÍTICAS

Tomando como referencia un acero hipoeutectoide, el efecto de aumentar la velocidad de enfriamiento, desde el dominio austenítico, se traduce en una disminución de la temperatura A_{r3} (histéresis térmica asociada a los procesos de nucleación y crecimiento)

La región de estabilidad de la austenita del diagrama hierro – carbono se modifica entonces al variar la velocidad de enfriamiento tal y como se pone de manifiesto en el **Gráfico N° 7** ($V_3 > V_2 > V_1$)

GRÁFICO N° 7
DIAGRAMA HIERRO-CARBONO



Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

Se supone que la línea que marca la máxima solubilidad de carbono en la austenita mantiene su tendencia al descender la temperatura por debajo de la eutectoide, de tal modo que el punto eutectoide E se desplaza hacia contenidos inferiores de carbono (El' E₂, E₃)

La misma figura pone entonces de manifiesto que al aumentar la velocidad de enfriamiento, aumenta también la proporción de perlita del acero, aunque el contenido en carbono de este constituyente será menor que el que aparecería en un enfriamiento infinitamente lento. Por otro lado, como la transformación ocurre a temperaturas tanto más bajas cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento, el tamaño de grano de la ferrita y la separación interlaminar de la perlita disminuirán y, en consecuencia, aumentarán tanto la dureza como la resistencia mecánica del acero.

Resulta entonces que en un enfriamiento continuo desde la región austenítica a una determinada velocidad, se requiere un cierto subenfriamiento para que la transformación se inicie (tanto más grande cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento) Los tratamientos térmicos comerciales de los aceros suelen consistir en enfriamientos continuos (no isotermos), por lo que sería más apropiado conocer la cinética de la transformación de la austenita en enfriamientos continuos : son las denominadas curvas CCT, que expresan el inicio y final de las transformaciones en enfriamientos realizados a diferentes velocidades de enfriamiento.

Los **Gráficos N° 6 y N° 7** muestran respectivamente los diagramas CCT de un acero eutectoide y de otro hipoeutectoide. Estas figuras muestran las curvas de enfriamiento que se han utilizado para obtener los diagramas, así como la dureza final obtenida en cada caso. Nótese el aumento de temperatura que a veces se registra sobre la propia curva de enfriamiento como consecuencia del desprendimiento de calor asociado a la transformación.

EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LOS ACEROS

Los aceros al carbono son aleaciones binarias hierro – carbono que presentan unas excelentes propiedades mecánicas y bajo coste; sin embargo es posible mejorar estas propiedades y especialmente adaptar estos productos a trabajos en condiciones más severas (p.e., ambientes corrosivos, altas temperaturas) mediante el uso de elementos de aleación. El coste de los aceros de media y alta aleación también será mayor.

DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Podemos dividir los elementos de aleación de los aceros en varias categorías atendiendo a las fases en las que aparecen:

- a) Elementos que aparecen disueltos en la ferrita
- b) Elementos que aparecen disueltos y también forman carburos estables
- c) Elementos que aparecen formando carburos
- d) Elementos que aparecen en forma de inclusiones no metálicas

e) Elementos presentes en estado libre

Dentro de la primera categoría se sitúan elementos tales como el níquel, cobre, fósforo, silicio, aluminio y cobalto, que normalmente aparecen disueltos en la ferrita (formando soluciones sólidas de sustitución), porque su solubilidad en la cementita o su tendencia a formar carburos es muy baja.

Recuérdese que solamente los elementos con radio atómico más pequeño, como el carbono y el nitrógeno, forman soluciones sólidas de inserción. El efecto principal que origina la entrada en solución sólida de otros elementos en la ferrita es la distorsión de su red cristalina (diferente tamaño atómico), que a su vez produce el endurecimiento de la ferrita. El endurecimiento es notablemente mayor en las soluciones sólidas de inserción que en las de sustitución. Este carácter endurecedor, de mayor a menor, resulta ser: C, N, P, Sn, Si, Cu, Mn, Mo. El níquel, cromo y aluminio apenas afectan a la dureza de la ferrita.

Muchos de los elementos de aleación empleados en la fabricación de aceros corresponden a la segunda categoría, siendo entonces formadores de carburos (generalmente más estables que la cementita), aunque si están presentes en bajas concentraciones, entran en solución tanto en la cementita como en la ferrita. Ejemplos típicos son el manganeso, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, wolframio, etc.

El manganeso no forma carburos sino que suele aparecer disuelto en la cementita. Un mismo elemento químico puede formar varios carburos distintos en

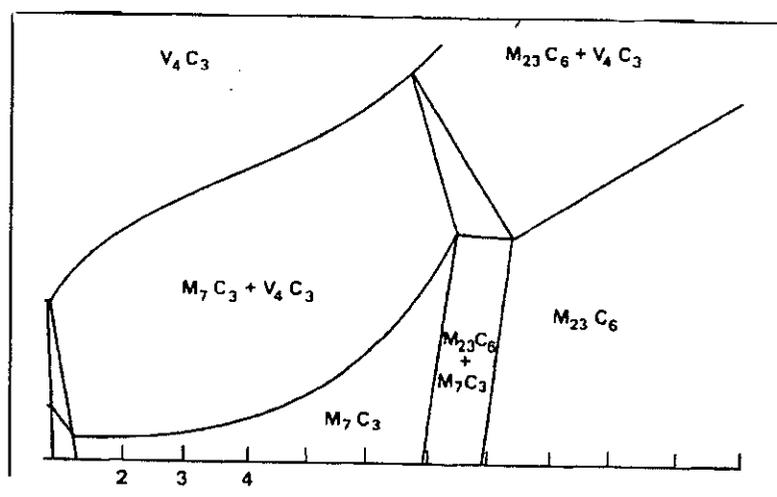
función de las proporciones relativas de carbono y del citado elemento presentes en el acero. El **Gráfico N° 17** presenta el diagrama de equilibrio de un acero con 0,2% de carbono y diferentes proporciones de cromo y vanadio a 700°C.

Nótese que en este supuesto carburos del tipo de la cementita (M_3C) solo son estables cuando el contenido de cromo es menor del 1,2%, y el de vanadio inferior al 0,6%

Cuando cualquiera de estos elementos formadores de carburos está presente en mayor proporción de la necesaria para formar carburos, que a su vez viene determinada por el contenido en carbono del acero, el resto aparece disuelto en la red de ferrita. Por otro lado, los elementos no carburígenos (silicio, fósforo, aluminio, níquel y cobre, en orden decreciente) tienen carácter grafitizante, es decir dificultan la formación de cementita y en su lugar promueven la aparición del carbono en su forma más estable, es decir, grafito.

GRÁFICO N° 8

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO ACERO-CARBONO



Fuente : F.J.BELZUNCE – Universidad de Oviedo

Solamente hay unos pocos elementos que entran casi exclusivamente en combinación con los carburos. El más importante es el nitrógeno, que forma carbonitruros con elementos como el titanio, niobio, vanadio.

Hay ciertos elementos como el silicio, manganeso, aluminio, calcio, magnesio que, estando presentes en cantidades muy pequeñas, forman inclusiones no metálicas, del tipo de los óxidos y sulfuros. Son elementos residuales que quedan formando estas fases tras los correspondientes tratamientos de desoxidación y desulfuración utilizados en el curso de la elaboración de los aceros.

De cualquier manera, la proporción de estas fases es siempre muy pequeña, porque son función del contenido final de oxígeno y de azufre del acero. Desde este punto de vista el manganeso tiene un efecto beneficioso ya que en virtud de su mayor afinidad por el azufre impide la formación de FeS (se forma en su lugar MnS) La fase FeS forma con el hierro un constituyente eutéctico de bajo punto de fusión que dificultaría mucho la laminación en caliente y la forja de los aceros.

Por último, elementos tales como el plomo aparecen en estado libre formando parte de los aceros, es decir sin combinar ni solubilizar.

MODIFICACIÓN DEL DIAGRAMA HIERRO – CARBONO

A este respecto, los elementos de aleación se dividen en dos grandes grupos :

- a) Elementos gammágenos que expanden la región de estabilidad de la austenita
- b) Elementos alfégenos, cuyo efecto es el contrario, es decir, contraen la región y en consecuencia, incrementan la zona de estabilidad de la ferrita.

Si en un acero introducimos elementos como el níquel, manganeso y cobalto en grandes cantidades se podría llegar a hacer desaparecer por completo el hierro y obtener así una estructura de hierro estable a temperatura ambiente. En otras ocasiones (carbono y nitrógeno son los elementos más representativos), los elementos gammágenos expanden la región de estabilidad del hierro y, pero su efecto tiene un límite marcado por la formación de otros compuestos (carburos y nitruros) Cobre y zinc tienen efectos similares a estos últimos.

Por el contrario, muchos elementos de aleación tienen el efecto contrario, es decir restringen la región de estabilidad del hierro y, de tal manera que a partir de un determinado contenido del elemento, los campos de estabilidad de las estructuras BCC del hierro (hierro δ y hierro α) se unen. Dentro de esta categoría citaremos a elementos como el silicio, aluminio, berilio y fósforo, junto con los elementos fuertemente formadores de carburos : titanio, vanadio,

molibdeno y cromo. Finalmente, en un último caso, elementos como el boro, tántalo, niobio y zirconio producen la contracción del bucle de hierro y, pero ahora éste termina formando determinados compuestos.

EFFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LA CINÉTICA DE TRANSFORMACIÓN AUSTENITA

En virtud de la diferente tendencia que tienen los elementos de aleación para asociarse con la ferrita o de formar carburos, es lógico esperar que su presencia influya sobre la cinética de la transformación de la austenita por debajo de la temperatura crítica A_1' , prácticamente todos los elementos de aleación, a excepción del cobalto, retrasan la cinética de la transformación de la austenita. La explicación de este hecho reside por un lado en que la presencia de elementos de aleación en la austenita disminuye la difusividad del carbono en esta fase, y por otro, la transformación de la austenita implica igualmente un cierto reparto de los elementos de aleación entre la austenita, ferrita y carburos, que a su vez implica la difusión (mucho más lenta que la del carbono) de los propios elementos de aleación.

ANEXO N° 4

SOLIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

Después de vaciar el metal fundido en el molde, éste se enfría y solidifica. En esta sección examinaremos los mecanismos físicos de solidificación que ocurren durante la fundición. Los aspectos asociados con la solidificación incluyen el tiempo de enfriamiento del metal, la contracción, la solidificación direccional y el diseño de las mazarotas.

SOLIDIFICACIÓN DE LOS METALES

La solidificación involucra el regreso del metal fundido al estado sólido. El proceso de solidificación difiere, dependiendo de si el metal es un elemento puro o una aleación.

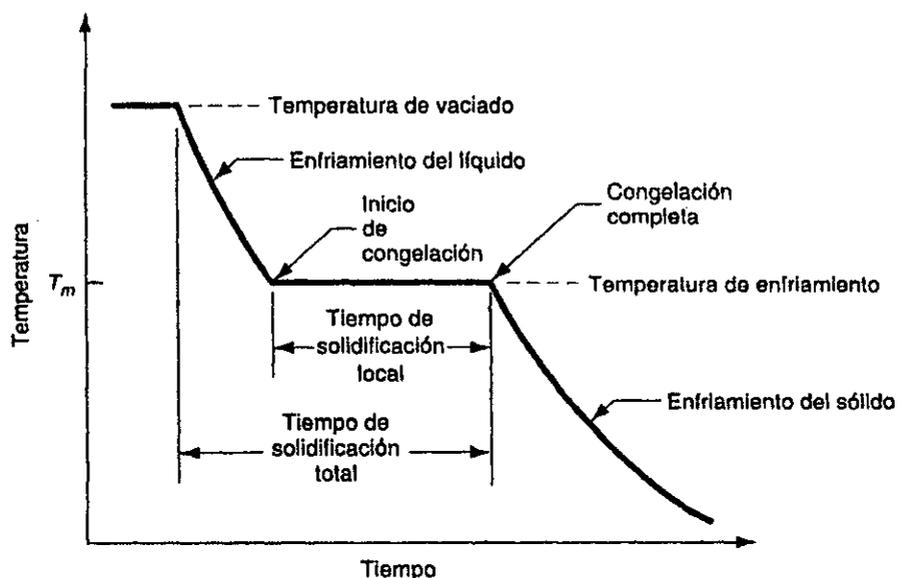
a) **Metales puros.**- Un metal puro solidifica a una temperatura constante que constituye su punto de congelación o punto de fusión. Los puntos de fusión de los metales puros son bien conocidos. El proceso ocurre en un tiempo determinado como se muestra en la **Figura N° 16**, conocida como curva de enfriamiento. La solidificación real toma un tiempo llamado, tiempo local de solidificación, durante el cual el calor latente de fusión del metal escapa fuera del molde. El tiempo total de solidificación va desde el momento de vaciar el metal hasta su completa solidificación.

Después que la fundición se ha solidificado completamente, el enfriamiento continúa a una velocidad indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

Debido a la acción refrigerante de la pared del molde, se forma una delgada película inicial de metal sólido en la pared inmediatamente después del vaciado. El espesor de esta película aumenta para formar una costra alrededor del metal fundido que va creciendo hacia el centro de la cavidad conforme progresa la solidificación. La velocidad del enfriamiento depende del calor que se transfiere en el molde y de las propiedades térmicas del metal.

FIGURA N° 16

CURVA DE ENFRIAMIENTO PARA UN METAL PURO DURANTE LA FUNDICIÓN



Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

Es interesante examinar la formación del grano metálico y su crecimiento durante este proceso de solidificación. El metal que forma la película inicial se ha

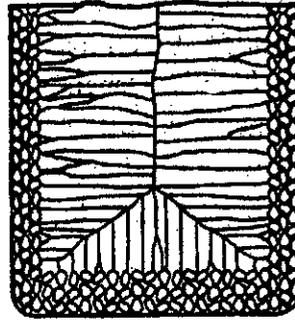
enfriado rápidamente por la extracción de calor a través de la pared del molde. Esta acción de enfriamiento causa que los granos de la película sean finos, equiaxiales y orientados aleatoriamente.

Al continuar el enfriamiento se forman más granos y el crecimiento ocurre en direcciones alejadas de la transferencia de calor. Como el calor se transfiere a través de la costra y la pared del molde, los granos crecen hacia adentro como agujas o espinas de metal sólido. Al agrandarse estas espinas se forman ramas laterales que siguen creciendo y forman ramas adicionales en ángulos rectos con las primeras.

Este tipo de crecimiento llamado crecimiento dendrítico del grano ocurre no solamente en la solidificación de los metales puros, sino también en la de las aleaciones. Estas estructuras tipo árbol se llevan a cabo en forma gradual durante el enfriamiento, al depositarse continuamente metal adicional en las dendritas hasta completar la solidificación. Los granos resultantes de este crecimiento dendrítico adoptan una orientación preferente y tienden a ser burdos y alinearse en forma de granos columnares hacia el centro de la fundición. La estructura granulada resultante se ilustra en la **Figura N° 17**

FIGURA N° 17

ESTRUCTURA GRANULADA

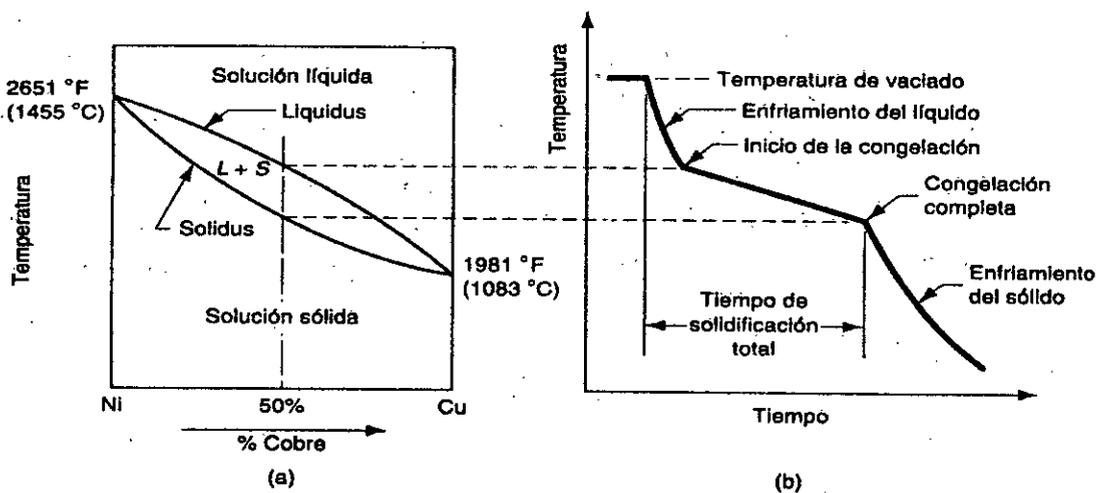


Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

En la Figura 19 se muestra la estructura cristalina característica del un metal puro, mostrando los granos, pequeños orientados aleatoriamente cerca de las paredes del molde, y los granos columnares grandes orientados hacia el centro de la fundición

FIGURA N° 18

DIAGRAMA DE FASE



Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

En la **Figura N° 18 (a)** diagrama de fase para un sistema, de aleación cobre – níquel y (b) curva de enfriamiento asociada para una composición Ni – Cu 50% – 50% durante la fundición.

- b) Aleaciones en general.**- Las aleaciones solidifican generalmente en un intervalo de temperaturas en lugar de una temperatura única. El rango exacto depende de la aleación y su composición particular. Se puede explicar la solidificación de una aleación con referencia a la **Figura N° 18**, que muestra el diagrama de fase de una aleación en particular y a la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme descende la temperatura, empieza la solidificación en la temperatura que indica la línea liquidus y se completa cuando se alcanza la solidus.

El inicio de la solidificación es similar a la del metal puro. Se forma una delgada película en la pared del molde debido a un alto gradiente de temperatura en esta superficie. La solidificación continúa como para un metal puro, mediante la formación de dendritas alejadas de las paredes. Sin embargo, debido a la propagación de la temperatura entre liquidus y solidus, el crecimiento de las dendritas es tal que se forma una zona avanzada donde el metal sólido y el líquido coexisten.

La porción sólida está constituida por estructuras dendríticas que se han formado lo suficiente y han atrapado en la matriz pequeñas islas de líquido. La región sólido-líquido tiene una consistencia suave que da lugar a su nombre de zona blanda. Dependiendo de las condiciones del enfriamiento, la zona blanda

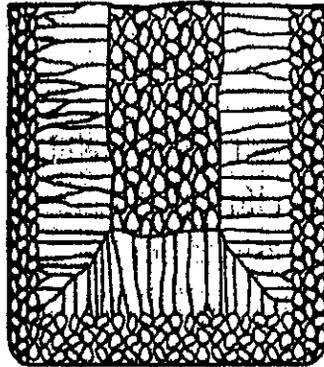
puede ser relativamente angosta o puede ocupar la mayor parte de la fundición. Los factores que promueven la última condición son una lenta transferencia de calor fuera del metal caliente y una amplia diferencia entre liquidus y solidus. Las islas de líquido en la matriz de dendrita se solidifican gradualmente al bajar la temperatura de la fundición hasta la temperatura solidus que corresponde a la composición de la aleación.

Otro factor que complica la solidificación de las aleaciones es la composición de las dendritas que al iniciar su formación son favorecidas por el metal que tiene el punto de fusión mayor. Al continuar la solidificación las dendritas crecen y se genera un desbalance entre la composición del metal solidificado y el metal fundido remanente. Este desbalance de composición se manifiesta finalmente como segregación de elementos en las fundiciones terminadas.

La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica. A nivel microscópico, la composición química varía a través de cada grano individual. Esto se debe a que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción más alta de uno de los elementos de la aleación. La dendrita crece a expensas del líquido remanente que ha sido parcialmente agotado de este primer elemento. Finalmente, el último metal que solidifica en cada grano es el que quedó atrapado en las ramas de las dendritas, cuya composición es aún más desbalanceada. El resultado es una variación en composición química dentro de cada grano de la fundición.

FIGURA N° 19

ESTRUCTURA CRISTALINA



Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

En la **Figura N° 19** se muestra la estructura cristalina característica de fundición para una aleación, mostrando la segregación de los componentes en el centro de la fundición.

A nivel macroscópico, la composición química varía a través de la fundición. Como las regiones de la fundición que se solidifica primero (generalmente cerca de las paredes del molde) son más ricas en un componente que en otro, la composición de la aleación fundida remanente queda modificada cuando ocurre la solidificación en el interior. Se genera entonces, una segregación general a través de la sección transversal de la fundición, llamada algunas veces segregación de lingote como se muestra en la **Figura N° 19**

- c) **Aleaciones eutécticas.**- Las aleaciones eutécticas constituyen una excepción del proceso general de solidificación de las aleaciones. Una aleación eutéctica tiene una composición particular en la cual las temperaturas solidus y liquidus son iguales. En consecuencia, la solidificación ocurre a una temperatura constante, y

no en un rango de temperaturas como se describió para un metal puro, el hierro fundido (4,3% C) son ejemplos de aleaciones eutécticas que se usan en fundición.

TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

Si la fundición es metal puro o aleación, de todos modos, su solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición expresada por una relación empírica conocida como regla de Chvorinov que establece

Donde :

- TST** : Tiempo de solidificación total, min;
- V** : Volumen de fundición, (m^3)
- A** : Área superficial de la fundición, (m^2)
- n** : Exponente que toma usualmente un valor de 2
- C_m** : Es la constante del molde

Por lo que $n = 2$, las unidades de C son (min/m^2), su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, entre las cuales se incluyen el material del molde (calor específico y conductividad térmica), propiedades térmicas del metal de fundición (calor de fusión, calor específico y conductividad térmica), y la temperatura relativa de vaciado con respecto al punto de fusión del metal.

El valor de C_m para una operación dada se puede basar en datos experimentales de operaciones previas con el mismo material de molde, metal y temperatura de vaciado, incluso cuando la forma de la parte haya sido bastante diferente.

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja. Este principio ayuda en el diseño de la mazarota del molde. Para cumplir su función de alimentar metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición.

En otras palabras, la TST para la mazarota debe exceder la TST de la fundición principal. Como la condición del molde para la mazarota y la fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales. Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen a área más grande, podemos estar más o menos seguros de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción. Antes de considerar el diseño de la mazarota mediante la regla de Chvorinov tomemos en cuenta el tema de la contracción, razón por la cual se necesitan las mazarotas.

CONTRACCIÓN

Nuestro análisis de la solidificación ha omitido el impacto de la contracción que ocurre durante el enfriamiento y la solidificación. La contracción ocurre en tres pasos:

- a) Contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación
- b) Contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación
- c) Contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Los tres pasos pueden explicarse con referencia a una fundición cilíndrica hipotética hecha en un molde abierto

El metal fundido inmediatamente después de vaciado se muestra en la parte (0) de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura de solidificación, causa que la altura del líquido se reduzca desde el nivel inicial.

La cantidad de esta concentración líquida es generalmente alrededor del 0,5%
La contracción de solidificación que se observa en la parte (2) tiene dos efectos :

- a) La contracción causa una reducción posterior en la altura de la fundición
- b) La cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se restringe.

Ésta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la fundición. Esta cavidad de encogimiento es llamada por los fundidores *rechupe*. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría. Esta contracción se determina por el coeficiente de expansión térmica del metal sólido, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

En la **Figura N° 19** se muestra la contracción de una fundición cilíndrica durante la solidificación y enfriamiento:

- (0) Niveles iniciales del metal fundido inmediatamente después del vaciado
- (1) Reducción del nivel causada por la contracción del líquido durante el enfriamiento
- (2) Reducción de la altura y formación de la bolsa de contracción causada por la contracción por solidificación
- (3) Reducción posterior de la altura y diámetro debida a la contracción térmica durante el enfriado del metal sólido. Las reducciones están exageradas para mayor claridad.

En la **Tabla N° 20** se presenta algunos valores típicos de la contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debidos a la contracción por solidificación y a la contracción sólida paso (2) y (3). La contracción por solidificación ocurre casi en todos los metales porque la fase sólida tiene una mayor densidad que la fase líquida.

La transformación de fase que acompaña la solidificación causa una reducción en el volumen por unidad de peso del metal. La excepción en la **Tabla N° 20** es el hierro fundido con un contenido alto de carbono, cuya solidificación se complica por un período de grafitación durante las etapas finales de enfriamiento, que provoca una expansión tendiente a contrarrestar el crecimiento volumétrico asociado con el cambio de fase.

Los modelistas toman en cuenta la contracción por solidificación para sobredimensionar las cavidades de los moldes. La cantidad que hay que aumentar a las dimensiones del molde con respecto al tamaño de la pieza final se llama tolerancia de contracción del modelo. Aunque la contracción es volumétrica, las dimensiones de la fundición se expresan linealmente. Para hacer los modelos y los moldes más grandes que la pieza, se usan reglas especiales de contracción que consideran una ligera elongación en proporción adecuada. Estas reglas varían en elongación desde menos de 3 mm a 16 mm por cada 300 mm de longitud con respecto a una regla normal, dependiendo del metal a fundir.

TABLA N° 23

CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA PARA DIFERENTES METALES DE FUNDICIÓN DEBIDO A LA CONTRACCIÓN POR SOLIDIFICACIÓN Y CONTRACCIÓN DEL SÓLIDO

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación %	Contracción térmica del sólido %
Aluminio	7,0	5,6
Aleación de aluminio (típica)	7,0	5,0
Fundición de hierro gris	1,8	3,0
Fundición de hierro gris al alto carbono	0	3,0
Fundición de acero al bajo carbono. Cobre	3,0	7,2
Bronce (CuSn)	4,5	7,5
	5,5	6,0

Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL

Para minimizar los efectos dañinos de la contracción es conveniente que las regiones de la fundición más distantes de la fuente de metal líquido se solidifiquen primero y que la solidificación progrese de estas regiones hacia la mazarota. En esta forma, el metal fundido continuará disponible en las mazarotas para prevenir los vacíos de contracción durante la solidificación. Se usa el término – solidificación direccional para describir este aspecto del proceso de solidificación y sus métodos de control.

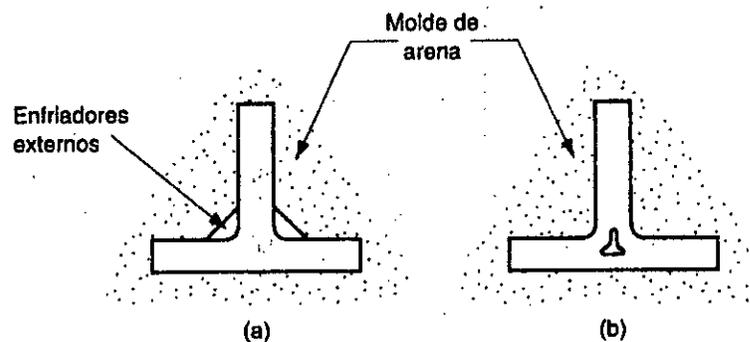
La solidificación direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov al diseño de la fundición, a su orientación dentro del molde y al diseño del sistema de mazarotas. Por ejemplo, al localizar las secciones de la fundición con menores relaciones V/A lejos de las mazarotas la solidificación aparecerá primero en estas

regiones y el suministro de metal líquido para el resto de la fundición permanecerá abierto hasta que solidifiquen las secciones más voluminosas.

Otra forma de fomentar la solidificación direccional es usar enfriadores sumideros de calor internos o externos que causan un, enfriamiento rápido en ciertas regiones de la fundición, Los enfriadores internos son pequeñas partes de metal colocadas dentro de la cavidad antes del vaciado, cuyo objetivo es que el metal fundido solidifique primero alrededor de estas partes. El refrigerante interno debe tener una composición química igual a la del metal que se vacía. Esto se logra fabricando el enfriador del mismo metal que la fundición.

FIGURA N° 20

ENFRIADORES



Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

En la **Figura N° 20 (a)** Enfriadores externos para alentar la solidificación rápida del metal fundido en una zona delgada de la fundición y en la **Figura N° 20 (b)** resultado probable si no se usan los enfriadores.

Los enfriadores externos son insertos metálicos en las paredes de la cavidad del molde que remueven el calor del metal fundido más rápidamente que la arena

circundante, a fin de promover solidificación. Se usan a menudo en secciones de la fundición que son difíciles de alimentar con metal líquido, el cual encuentra así un enfriamiento rápido que lo hace solidificar en estas secciones mientras la conexión con el metal líquido está todavía abierta. En la **Figura N° 20** se ilustra una posible aplicación de refrigerantes externos y el resultado probable si no se usaran.

DISEÑO DE LA MAZAROTA

Tal como se describió antes, una mazarota (**Ver Figura 2.1 (b)**) se usa en un molde de fundición para alimentar metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación. La mazarota debe permanecer líquido hasta después de que la fundición solidifique. Para satisfacer este requerimiento se puede calcular el tamaño de la mazarota usando la regla de Chvorinov. El siguiente ejemplo ilustra los cálculos.

EJEMPLO : DISEÑO DE LA MAZAROTA USANDO LA REGLA DE CHVORINOV

Debe diseñarse una mazarota cilíndrica para un molde de fundición en arena. La fundición es una placa rectangular de acero con dimensiones 0,0762 m x 0,127 x 0,0254 m. En observaciones previas se ha indicado que el tiempo de solidificación total (TST) para esta fundición = 1,6 min. La mazarota cilíndrica tendrá una relación de diámetro a altura de 1,0; determine la dimensión que la mazarota de manera que TST = 2, minutos.

Solución : Se determina primero la relación V/A para la placa, su volumen :

$$V = 0,0762 \times 0,127 \times 0,0254 = 0,0002458 \text{ m}^3$$

y la superficie del área :

$$A = 2 (0,0762 \times 0,127 + 0,0762 \times 0,0254 + 0,127 \times 0,0254) = 0,032258 \text{ m}^2$$

Porque :

TST = 1,6 min podemos determinar la constante del molde C_m mediante la ecuación (2.7) usando un valor de $n = 2$ en la ecuación.

$$C_m = \frac{TST}{\left(\frac{V}{A}\right)^2} = \frac{1,6}{\left(\frac{0,0002458}{0,03226}\right)^2} = 27560,36 \text{ min} \left[m^2\right] \quad (3)$$

Después debemos diseñar la mazarota de manera que su tiempo de solidificación total sea de 2,0 min, usando el mismo valor de la constante del molde porque igual que la fundición como la mazarota está en el mismo molde. El volumen de la mazarota esta dado por

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad (4)$$

y el área de la superficie está dada por :

$$A = \pi Dh + \frac{2\pi D^2}{4} \quad (5)$$

Como estamos usando una relación $\frac{D}{h} = 1,0$, entonces $D = h$, al sustituir D por

h en las fórmulas del volumen y el área tenemos :

$$V = \frac{\pi D^3}{4} \quad (6)$$

y

$$A = \pi D^2 + \frac{2 \pi D^2}{4} = 1,5 \pi D^2 \quad (7)$$

Entonces la relación $\frac{V}{A} = \frac{D}{6}$, usando esta relación en la ecuación de

Chvorinov tenemos :

$$TST = 2,0 = 27560,361 \frac{D}{6} 1^2 = 4593,4 D^2 \quad (8)$$

$$D^2 = \frac{2,0}{4593,4} = 4,35 \times 10^{-4} [m^2] \quad (9)$$

$$D = 2,09 \times 10^{-2} [m]$$

Como $h = D$, también $h = 2,09 \times 10^{-2} [m]$

La mazarota representa el metal de desperdicio que se separa del proceso y se refunde para hacer fundiciones subsecuentes. Es deseable que este volumen de

metal en la mazarota sea el mínimo. Como la forma geométrica de la mazarota se selecciona normalmente para maximizar $\frac{V}{A}$, esto tiende a reducir el volumen de la mazarota lo más posible. Nótese que el volumen de la mazarota en nuestro ejemplo es :

$$V = \frac{(2,09 \times 10^{-2})^3}{4} = 7,14 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (10)$$

solamente 55% del volumen de la placa (fundición), incluso cuando el tiempo de solidificación total es más grande por un 25%

La mazarota se puede diseñar en diferentes formas. El diseño mostrado en la **Figura N° 21** es una mazarota lateral. Está anexada a un lado de la fundición por medio de un pequeño canal. Una mazarota superior se conecta en la parte superior de la superficie de la fundición como en la **Figura N° 21**

Las mazarotas pueden ser abiertas o sumergidas. Una mazarota abierta está expuesta al exterior en la superficie superior de la tapa, pero tiene la desventaja de permitir que escape más calor, promoviendo una solidificación más rápida. Una mazarota sumergida está completamente encerrada dentro del molde como en la **Figura N° 21**

PROCESOS DE FUNDICIÓN DE METALES

Los procesos de fundición del metal se dividen en dos categorías de acuerdo al tipo de moldes :

- a) Moldes desechables**
- b) Moldes permanentes.**

En las operaciones de fundición con molde desechable, éste se destruye para remover la parte fundida, como se requiere un nuevo molde por cada nueva fundición, las velocidades de producción son limitadas, porque se requiere más tiempo para hacer el molde que para la fundición en sí; sin embargo, para ciertas partes se pueden producir moldes y fundiciones a velocidades de 400 partes por hora o mayores. En los procesos de moldeo permanente, el molde se fabrica con metal (u otro material durable) que permite usarlos en repetidas operaciones de fundición. En consecuencia, estos procesos tienen una ventaja natural para mayores velocidades de producción.

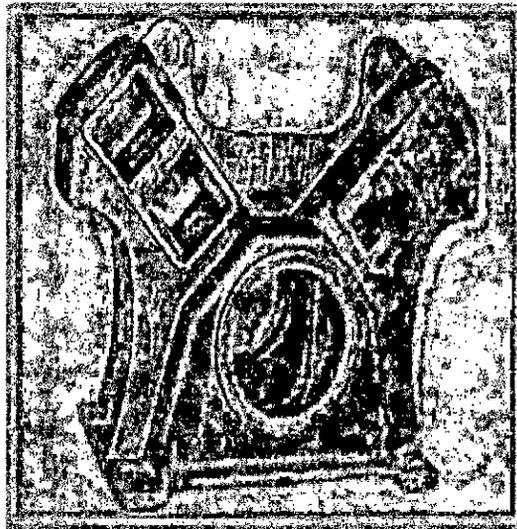
FUNDICIÓN EN ARENA

La fundición en arena es el proceso más utilizado, la producción por medio de este método representa la mayor parte del tonelaje total de fundición. Casi todas las aleaciones pueden fundirse en arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas temperaturas de fusión, como son el acero, el

níquel y el titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o muy grandes y en cantidades de producción que van de una pieza a millones de éstas.

FIGURA N° 21

PIEZA FUNDIDA (COMPRESOR)



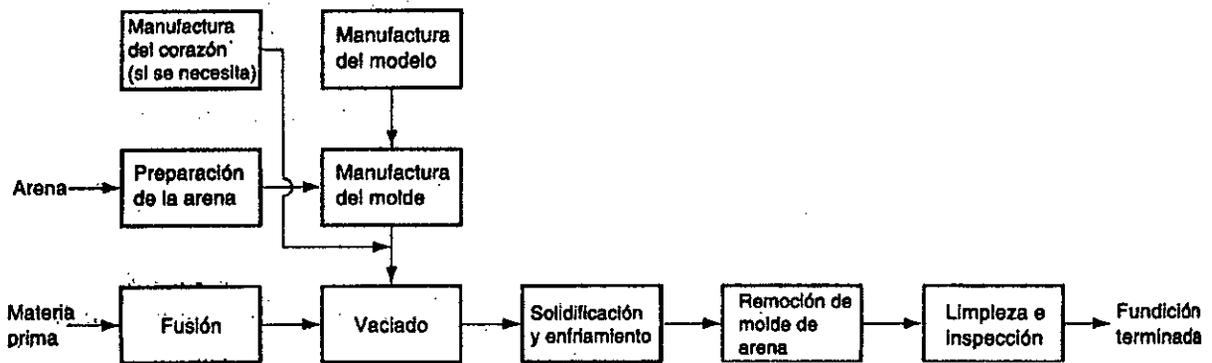
Fuente : Cortesía de Elkhart Foundry, Paragon Inc. Elkhart Indiana

En la **Figura N° 21** se muestra la fundición en arena para el cuerpo de un compresor con un peso de 680 Kg

La fundición en arena consiste en vaciar el metal fundido a un molde de arena, dejarlo solidificar y romper después el molde para remover la fundición. Posteriormente la fundición pasa por un proceso de limpieza e inspección, pero en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

En esta breve descripción se puede observar que la fundición en arena no solamente incluye operaciones de fundición, sino también la fabricación de modelos y manufactura de moldes. La secuencia se muestra en el **Diagrama N° 2**

DIAGRAMA N° 2 PROCESO DE FUNDICION



Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

En el **Diagrama N° 2** se muestran los pasos en la secuencia de producción de la fundición en arena. Los pasos incluyen no solamente las operaciones de fundición si no también la manufactura del modelo y del molde.

MODELOS Y CORAZONES

La fundición en arena requiere un patrón o modelo al tamaño de la parte, ligeramente agrandado, tomando en consideración la contracción y las tolerancias para el maquinado de la pieza final. Los materiales que se usan para hacer estos modelos incluyen la madera, los plásticos y los metales. La madera es un material común para modelos, por la facilidad de trabajarla y darle forma.

Sus desventajas son la tendencia a la torsión y al desgaste por la abrasión de la arena que se compacta a su alrededor, lo cual limita el número de veces que puede usarse. Los modelos de metal son más costosos pero duran más. Los plásticos representan un término medio entre la madera y los metales. La selección del material apropiado para patrones o modelos depende en gran parte de la cantidad total de piezas a producir.

Hay varios tipos de modelos, como se ilustra en la **Figura 2.11**. El más simple esta hecho de una pieza, llamado modelo sólido, que tiene la misma forma de la fundición y los ajustes en tamaño por contracción y maquinado. Su manufactura es fácil, pero la complicación surge cuando se utiliza para hacer el molde de arena. Determinar la localización del plano de separación entre las dos mitades del molde e incorporar el sistema de vaciado y el vertedero de colada para un modelo sólido, puede ser un problema que se dejará al juicio y habilidad del operario del taller de fundición. Por tanto, los modelos sólidos se usan solamente en producciones de muy baja cantidad.

Los modelos divididos constan de dos piezas que separan la pieza a lo largo de un plano, éste coincide con el plano de separación del molde. Los modelos divididos son apropiados para partes de forma compleja y cantidades moderadas de producción. El plano de separación del molde queda predeterminado por las dos mitades del molde, más que por el juicio del operador.

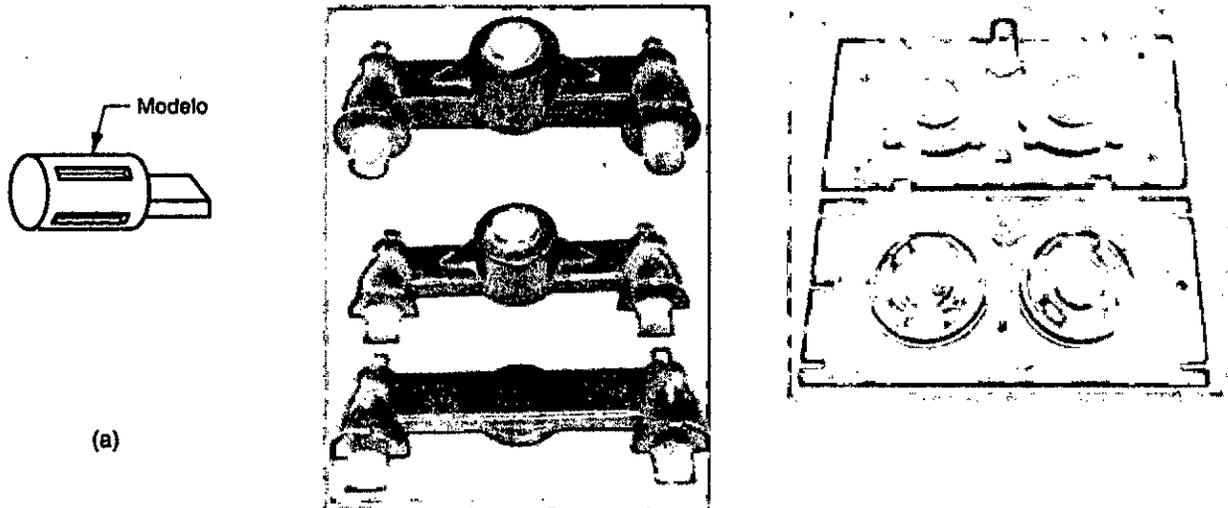
Para altos volúmenes de producción se emplean los modelos con placa de acoplamiento o los modelos de doble placa (superior e inferior) En un modelo con

placa de acoplamiento, las dos piezas del modelo dividido se adhieren a los lados opuestos de una placa de madera o metal. Los agujeros de la placa permiten una alineación precisa entre la parte superior y el fondo (cope y drag) del molde. Los modelos con doble placa de acoplamiento son similares a los patrones con una placa, excepto que las mitades del patrón dividido se pegan a placas separadas, de manera que las secciones de la parte superior e inferior del molde se puedan fabricar independientemente, en lugar de usar la misma herramienta para ambas.

En la **Figura N° 22** se muestran los tipos de patrones utilizados en la fundición en arena : a) modelo sólido, b) modelo dividido, c) modelo con placa de acoplamiento.

Los patrones definen la forma externa de la fundición. Si posee superficies internas, se necesita un corazón para definir las. Un corazón es un modelo de tamaño natural de las superficies interiores de la parte. El corazón se inserta en la cavidad del molde antes del vaciado, para que al fluir el metal fundido, solidifique entre la cavidad del molde y el corazón, formando así las superficies externas e internas de la fundición. El corazón se hace generalmente de arena compactada.

FIGURA N° 22
MOLDES DE ARENA



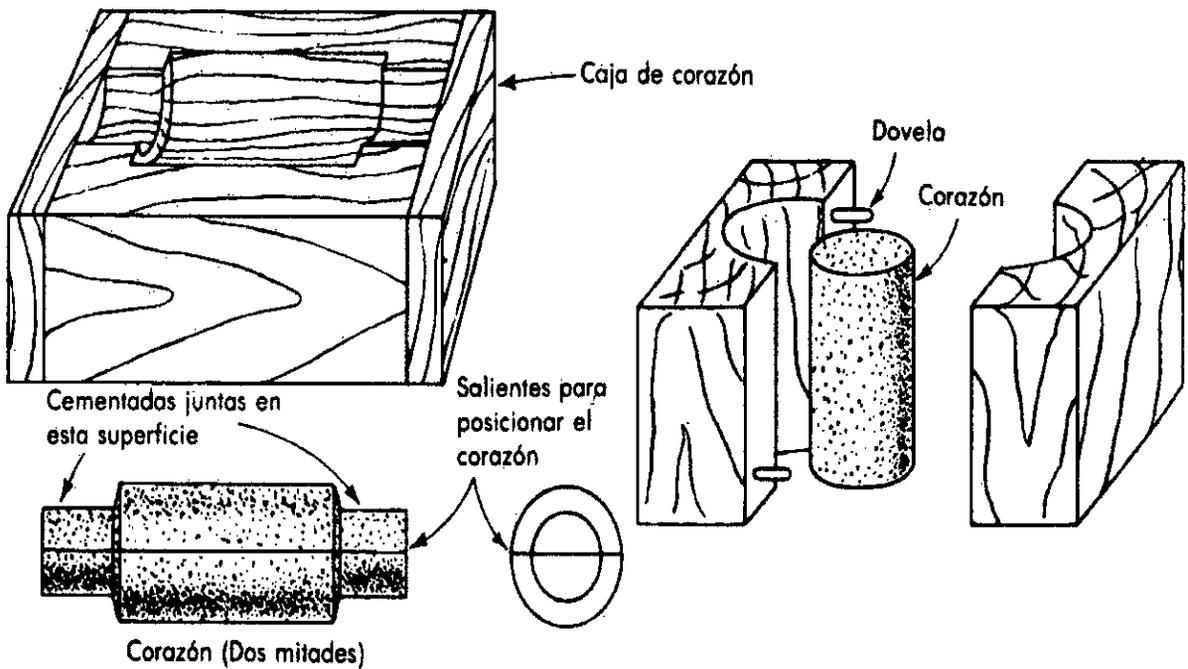
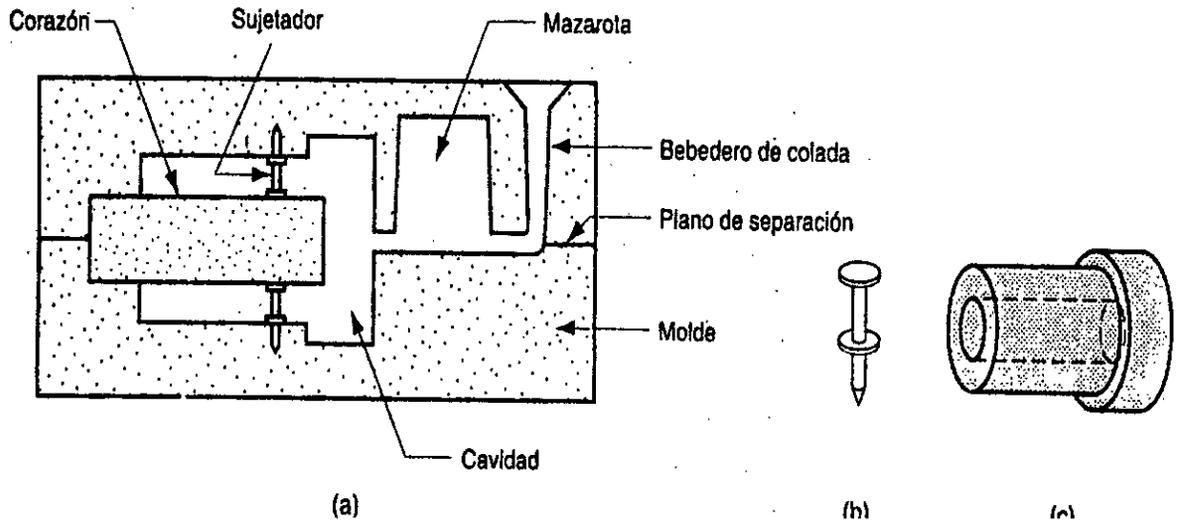
Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

El tamaño real del corazón debe incluir las tolerancias para contracción y maquinado lo mismo que el patrón. El corazón, dependiendo de la forma, puede o no requerir soportes que lo mantengan en posición en la cavidad del molde durante el vaciado. Estos soportes, llamados sujetadores, se hacen de un metal cuya temperatura de fusión sea mayor que la de la pieza a fundir. Por ejemplo, para fundiciones de hierro colado se usan sujetadores de acero. Los sujetadores quedan atrapados en la fundición durante el vaciado y la solidificación. En la **Figura 2.12** se muestra un posible arreglo del corazón usando sujetadores. La porción de los sujetadores que sobresalen de la fundición se recortan después.

En la **Figura N° 23 (a)** se muestra el corazón mantenido en su lugar dentro de la cavidad del molde por los sujetadores **Figura N° 23 (b)** Diseño posible del sujetador

Figura N° 23 (c) Fundición con cavidad interna Figura N° 23 (d) manufactura del corazón.

FIGURA N° 23
SUJETADORES EN MOLDEO



Fuente : Kalpakjian, Serope y Schmid (Manufactura, Ingeniería y Tecnología)

MOLDES Y FABRICACIÓN DE MOLDES

El molde es una cavidad que tiene la forma geométrica de la pieza que se va fundir. La arena de fundición es sílice (SiO_2) o sílice mezclada con otros minerales. Esta arena debe tener buenas propiedades refractarias, expresadas como la capacidad de resistir altas temperaturas sin fundirse o degradarse. Otras características importantes son : el tamaño del grano, la distribución de tamaños del grano en la mezcla y la forma de los granos.

Los granos pequeños proporcionan mejor acabado superficial en la fundición, pero los granos grandes son más permeables, para que los gases escapen durante el vaciado. Los moldes hechos de granos irregulares tienden a ser más fuertes que los moldes de granos redondos debido al entrelazado de los granos, pero esto tiende a restringir la permeabilidad.

En la fabricación del molde, los granos de arena se aglutinan por medio de una mezcla de agua y arcilla. La proporción típica (en volumen) es 90% de arena, 3% de agua y 7% de arcilla. Se pueden usar otros agentes aglutinantes en lugar de la arcilla, como resinas orgánicas (por ejemplo resinas fenólicas) y aglutinantes inorgánicos (por ejemplo, silicato y fosfato de sodio) Algunas veces se añaden a la mezcla de arena y aglutinante ciertos aditivos para mejorar las propiedades del molde como la resistencia y permeabilidad.

En el método tradicional para formar la cavidad del molde se compacta la arena alrededor del modelo en la parte superior e inferior de un recipiente llamado

caja de moldeo. El proceso de empaque se realiza por varios métodos. El más simple es el apisonado a mano realizado manualmente por un operario. Además, se han desarrollado varias máquinas para mecanizar el procedimiento de empacado, las cuales operan por medio de los siguientes mecanismos :

- a) Compactación de la arena alrededor del patrón o modelo mediante presión neumática
- b) Acción de sacudimiento, dejando caer repetidamente la arena contenida en la caja junto al modelo, a fin de compactarla en su lugar
- c) Lanzamiento, haciendo que los granos de arena se impacten contra el patrón a alta velocidad.

Una alternativa a las cajas tradicionales para moldes de arena es el moldeo sin caja, que consiste en el uso de una caja maestra en un sistema mecanizado de producción de moldes. Cada molde de arena se produce usando la misma caja maestra. Se estima que la producción por este método automatizado puede ascender hasta seiscientos moldes por hora.

Se usan varios indicadores para determinar la calidad de la arena para el molde:

- a) Resistencia, capacidad del molde para mantener su forma y soportar la erosión causada por el flujo del metal líquido, depende del tamaño del grano, las cualidades adhesivas del aglutinante y otros factores

- b) Permeabilidad, capacidad del molde para permitir que el aire caliente y los gases de fundición pasen a través de los poros de la arena

- c) Estabilidad térmica, capacidad de la arena en la superficie de la cavidad del molde para resistir el agrietamiento y encorvamiento en contacto con el metal fundido

- d) Retractibilidad, capacidad del molde para dejar que la fundición se contraiga sin agrietarse; también se refiere a la capacidad de remover la arena de la fundición durante su limpieza

- e) Reutilización, ¿puede reciclarse la arena del molde roto para hacer otros moldes?. Estas medidas son algunas veces incompatibles, por ejemplo, un molde con una gran resistencia tiene menos capacidad de contracción.

Los moldes de arena se clasifican frecuentemente como arena verde, arena seca o de capa seca.

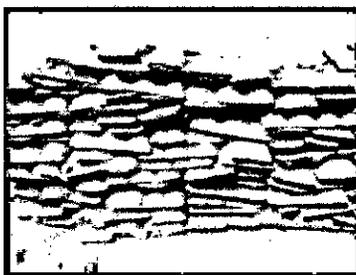
Los moldes de arena verde se hacen de una mezcla de arena, arcilla y agua, el término "verde" se refiere al hecho de que el molde contiene humedad al momento del vaciado. Los moldes de arena verde tienen suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena retractsibilidad, permeabilidad y reutilización, también son los menos costosos. Por consiguiente, son los más ampliamente usados, aunque también tienen sus desventajas. La humedad en la arena puede

causar defectos en algunas fundiciones, dependiendo del metal y de la forma geométrica de la pieza.

Un molde de arena seca se fabrica con aglomerantes orgánicos en lugar de arcilla. El molde se cuece en una estufa grande a temperaturas que fluctúan entre 204°C y 316°C. El cocido en estufa refuerza el molde y endurece la superficie de la cavidad. El molde de arena seca proporciona un mejor control dimensional en la fundición que los moldes de arena verde. Sin embargo, el molde de arena seca.

A continuación se muestra una serie de fotografías que describen el proceso de fundición en molde de arena. Se fabrica una amplia variedad de tipos de vaciado. Abajo se muestra una fábrica que produce vaciados en molde de arena maquinados hechos de hierro dúctil.

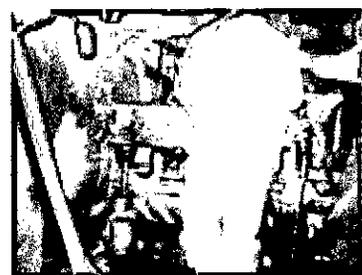
FIGURA N° 24



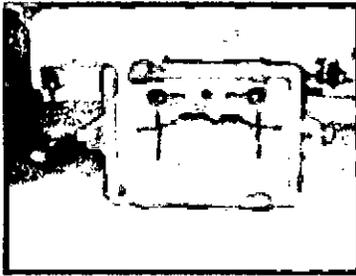
Lingotes de hierro dúctil



Llenando un molde de arena



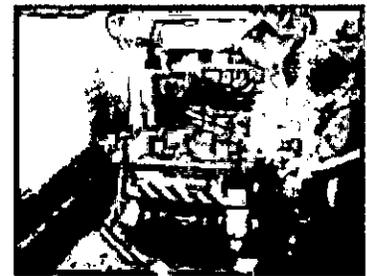
Cerniendo y comprimiendo arena



Medio molde de arena



Corazón de arena en medio molde



Medio molde con corazón en su lugar

Fuente : Empresa Fundición Vargas SAC – Lima

FIGURA N° 25



Ensamblando las mitades del molde



Vaciando acero fundido



Vaciando laminar



Seis moldes a la vez



Laboratorio con reactivos



Fuente : Empresa Fundición Vargas SAC – Lima

ANEXO N° 5

PRACTICA ESTANDAR PARA LA PREPARACION DE MUESTRAS METALOGRAFICAS

El objetivo principal de los exámenes metalográficos es revelar los componentes y estructura de los metales y sus aleaciones por medio de un microscopio electrónico de exploración óptica o luz. En casos especiales, el objetivo del examen puede requerir el desarrollo de menos detalle que en otros casos, pero, en casi todas las condiciones, la selección y preparación de la muestra adecuada es de gran importancia. Debido a la diversidad en el equipamiento y la gran variedad de problemas encontrados, el siguiente texto presenta para la orientación de la metallographer sólo aquellas prácticas que la experiencia ha mostrado en general son satisfactorios; que no puede y no describir las variaciones en la técnica necesaria para resolver los problemas individuales de preparación de muestras.

Nota N° 1 : Para una descripción más detallada de las diversas técnicas metalográficas, consulte Samuels, LE, metalográfico Pulido por métodos mecánicos, Sociedad Norteamericana de Metales (ASM) Metales Park, OH, 3ª Ed, 1982;. Petzow, G., metalográfico Aguafuerte, ASM, 1978; y Vandervoort, G., Metalografía: Principios y Práctica, McGraw Hill, Nueva York, 2ª Ed., 1999

Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

Documentos de referencia (compra por separado) Los documentos que se enumeran a continuación se hace referencia dentro de la norma tema, pero no se proporcionan como parte de la norma.

Normas ASTM

A90/A90M Método de prueba para Peso [Masa] de Recubrimiento en Hierro y artículos de acero con zinc o aleación de zinc – Revestimientos

E 7 Terminología Relativa a Metalografía

E 45 Métodos de ensayo para determinar el contenido Inclusión de Acero

E 768 Guía para la Elaboración y Evaluación de muestras para la Evaluación de Inclusión automática de acero

E 1077 Métodos de prueba para estimar la profundidad de descarbonación de muestras de acero

E 1122 Prácticas para obtención de JK clasificaciones de inclusión Uso del análisis automático de imagen

E 1245 Práctica para determinar la inclusión o la Segunda Fase contenido Constituyente de Metales por el análisis automático de imagen

E 1268 Prácticas para evaluar el grado de bandas o Orientación de microestructuras

E 1558 Guía de pulido electrolítico de especímenes metalográficos

E 1920 Guía para la Preparación metalográfica de rociado térmico Revestimientos

Keywords

Electron Microscopes – Metallography – Scanning Electron Microscopes – Specimen Preparation – X – Ray Diffraction Technique

Código ICS

Código Número ICS 77.040.99 (Otros métodos de metales de prueba)

Código UNSPSC

Código UNSPSC 41111720 (microscopios electrónicos de barrido)