



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis del proceso de fabricación de
anillos sin costura de hierro gris obtenidos
por el proceso de centrifugación horizontal**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

García Hernández Guillermo Daniel

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Alberto González Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos, gracias por su paciencia y esfuerzo durante este tiempo que tomé realizar el trabajo escrito. Por sus comentarios y aclaraciones oportunas cuando en todos los temas que le preguntaba,

A todos mis familiares que estuvieron presente durante todo este trayecto. Mis tías, abuelas, primas y hermana, cuyos apoyos son inigualables. También a mi abuelo y tío que son un gran ejemplo para salir adelante, por su cariño y cuidado, muchas gracias.

En memoria a mi padre, Guillermo, mi abuelo Abel y mi madrina Ester. Su ausencia se hace presente, pero aún les agradezco el cariño y cuidados que en vida me dieron, este trabajo es una pequeña dedicatoria por todo eso.

Pero en especial, este trabajo se lo dedico a mi mamá, Maribelle. Sin ella, todo este esfuerzo realizado sería en vano, ya que ella me dio las fuerzas necesarias para salir adelante y estuvo conmigo durante toda mi carrera universitaria, apoyándome en todo lo que necesitaba y cuidándome cuando era necesario. Tengo muchas cosas que agradecerle, pero lo más importante, es por su amor incondicional durante todos estos años. Muchas gracias por todo mama, espero que sigas conmigo mucho más tiempo del que me merezco.

García Hernández Guillermo Daniel

Índice

1. Introducción	6
1.1 Objetivos	7
1.2 Antecedentes. Materiales metálicos	7
1.2.1 Aleaciones ferrosas	7
1.2.2 Acero y Hierro	8
1.3 Fundiciones	8
1.3.1 Fundición blanca	9
1.3.2 Fundición gris	9
1.3.3 Fundición maleable	10
1.3.4 Fundición nodular	10
1.4 Tipos de molde	11
1.4.1 Moldes desechables	11
1.4.2 Moldes permanentes	12
1.5 Sistema de colada	13
1.5.1 Diseño de una colada general	15
2. Métodos de fundición	18
2.1 Fundición centrífuga	18
2.1.1 Clasificación de la fundición centrífuga	19
2.1.2 Fundición centrífuga horizontal	21
2.1.3 Colada de la fundición centrífuga horizontal	22
2.1.4 Parametrización de la fundición centrífuga horizontal	23
2.1.5 Tubos sin costura	24
2.1.5.1 Características	26
2.2 Fundición de arena	27
2.2.1 Colada y solidificación de la fundición de arena	27
2.2.2 Parámetros de la fundición de arena	29
2.3 Fabricación de los anillos por fundición	30
3. Equipos y metodología para la caracterización de los anillos	32
3.1 Microscopio electrónico de barrido (MEB)	32
3.2 Difracción de rayos X	33

3.3 Ensayos de dureza	35
3.3.1 Ensayo Rockwell	35
3.3.1.1 Designación de la dureza	37
3.3.2 Ensayo Brinell	38
3.3.2.1 Procedimiento	38
3.3.3 Ensayo Vickers	41
3.4 Balance de carga en una fundición	45
3.4.1 Balance del metal	46
3.4.2 Método de solución de ecuaciones lineales para la fabricación de un hierro colado en un horno de arco eléctrico con revestimiento básico	48
3.4.3 Fórmulas	48
3.4.4 Composición química de la fundición nodular	54
4. Desarrollo experimental	55
4.1 Caracterización metalográfica de las muestras	56
4.2 Metodología para la preparación de las muestras	57
4.2.1 Determinación de las muestras	57
4.2.2 Corte	60
4.2.3 Montaje de la probeta	63
4.2.4 Lijado / Desbaste	66
4.2.5 Pulido	68
4.2.6 Ataque	69
4.2.7 Observación microestructural	70
4.2.8 Microscopio electrónico de barrido	70
5. Análisis de resultados	72
5.1 Metalografía	72
5.2 Rayos X	75
5.3 Balance de Carga	77
5.3.1 Composición química propuesta	78
5.3.2 Resultados del balance	79
5.3.3 Análisis del balance de carga	88
5.4 Ensayo Rockwell	89

5.5 Ensayo Brinell.....	94
5.6 Ensayo Vickers	99
6. Conclusiones	104
7. Referencias.....	106
8. Bibliografía.....	108

1. Introducción

El proceso de fabricación de tubos de acero ha cambiado desde el siglo XIX, la única técnica que se utilizaba para su obtención era mediante el laminado. Esto implicaba procesos de planchado forja o soldadura, donde el acero laminado se unía en secciones transversales circulares hasta obtener la costura, que es el doblez requerido para obtener la forma tubular. Sin embargo, otra forma de manufacturar dichos tubos fue con el proceso de fundición, ya que se utiliza un molde con las características deseadas para su fabricación. Existen tubos sin esta costura que son más gruesos y tienen una excelente utilidad en la industria de la construcción, aeroespacial, automotriz y naval, en este caso, los tubos sin costura permiten la formación de anillos de fundición a través de un corte en el material, importantes para la compresión en las cámaras de combustión, el paso del aceite y la expansión de los gases.

En este trabajo de investigación se caracterizarán anillos obtenidos por el proceso de fundición centrífuga de manera mecánica y metalográfica, esto con el fin de obtener los parámetros del equipo utilizado en la colada por centrifugación horizontal. A su vez los anillos obtenidos por este proceso serán comparados con aquellos fabricados por moldeo de arena, esto con el fin de obtener sus respectivos ensayos de dureza, análisis microestructural usando el microscopio electrónico de barrido y difracción de rayos X en probetas caracterizadas.

Se obtendrá la composición química de la fundición nodular, para de esta manera realizar el balance de carga requerido en la fabricación de los anillos para motores, así como desarrollar la metodología de cálculo adecuada para obtener la mayor eficiencia y el menor desperdicio posible de la materia prima, Además, se proponen la cantidad de materia prima, ferroaleaciones y retornos son utilizados para este balance. Los ensayos propuestos en este trabajo de investigación permiten establecer las características de los anillos evaluados para verificar si estos cumplen con los estándares establecidos, considerando su calidad, precio, tiempo de fabricación y eficiencia en los motores para autos.

1.1 Objetivos

Objetivo general

Analizar el proceso de fabricación de anillos sin costura de hierro gris y hierro nodular obtenidos por el proceso de fundición por molde de arena y por fundición centrífuga.

Objetivos particulares

- Determinar las propiedades mecánicas, así como la composición química de anillos de fundición fabricados mediante el proceso fundición centrífuga horizontal y por fundición en molde de arena.
- Realizar al análisis microestructural de las aleaciones obtenidas por fundición estudiadas en este trabajo de investigación.
- Realizar el balance de carga requerido para obtener la composición química de los anillos por fundición nodular.

1.2 Antecedentes. Materiales metálicos

Algunas de las principales características de los metales son su brillo superficial con propiedades elevadas de conductividad eléctrica y térmica, así como la deformación plástica cuando son sometidos a un esfuerzo. En estado puro su principal desventaja es la baja resistencia mecánica y la dureza, por lo que en la mayoría de las aplicaciones industriales se les encuentra con otros metales o no metales formando aleaciones ferrosas, no ferrosas o ligeras.

1.2.1 Aleaciones ferrosas

Los materiales industrialmente más importantes debido a su abundancia en la corteza terrestre, lo relativamente económicos que resultan sus procesos de obtención y fabricación de estas, así como la versatilidad de sus propiedades físicas y mecánicas son las aleaciones ferrosas. En la práctica se dividen en dos categorías, las cuales dependen de la cantidad de carbono presente en la composición de la aleación, las cuales pueden ser tanto aceros como fundiciones utilizadas en el trabajo.

1.2.2 Acero y Hierro

La principal diferencia de composición entre el acero y el hierro es la concentración de carbono presente en la aleación. Las fundiciones contienen típicamente más del 2.0% de carbono en peso, mientras que los niveles del acero se reducen entre 0.008% y 2.0%. El hierro fundido tiene un punto de fusión relativamente bajo (1250°C), mientras que el acero se funde a una temperatura más alta que el hierro fundido (entre 1400 y 1500 °C)¹.

Por lo tanto, el hierro tiende más a la fundición que a la forja. Además, este material no puede ser soldado de manera fiable debido a su contenido de carbono, lo que provoca una soldadura frágil. Como tal, en una tubería no se proporcionan la resistencia ni la conectividad requerida por aplicaciones de alta presión y temperatura. En tales casos, el acero es la opción apropiada.

Por otra parte, el acero puede fundirse o forjarse en cualquier forma deseada. También puede soldarse y generalmente son más resistentes que el hierro fundido, siendo una opción conveniente para el uso de alta presión y temperatura. La aleación de acero más común es el acero al carbono, sin embargo, dependiendo de la finalidad prevista del producto final, el material puede estar compuesto de aleaciones de grado superior tales como acero inoxidable o acero al molibdeno.

Para poder crear un producto que equilibre adecuadamente el costo frente a la calidad, es importante considerar todas las características requeridas del producto a utilizar, como el tamaño, la complejidad de la forma, la cantidad que se producirá por lote y la cantidad de procesos de mecanizado necesarios después de la configuración inicial. En última instancia, la decisión final de forjar o moldear debe hacerse seleccionando el método que ofrece el equilibrio óptimo de estos factores.

1.3 Fundiciones

La fundición es un proceso en el que metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste², obteniendo tanto lingotes como fundición de forma. Los lingotes se obtienen con la industria primaria del

metal, incluyendo el rolado y forjado, mientras que la fundición de forma produce piezas más complejas que se asemejan en gran medida a la pieza final que se busca obtener.

El tipo de fundición dependerá del tipo de proceso que se necesite para la elaboración de cada uno de los elementos metálicos que se empleen en ese momento. Todas las fundiciones cuentan con equipos especiales que soportan la temperatura necesaria y un sistema de ventilación, además de que:

- Se caracterizan por que se pueden vaciar del horno de cubilote para obtener piezas de diferente tamaño y complejidad, pero no pueden ser sometidas a deformación plástica. No son dúctiles, ni maleables y tienen poca soldabilidad, pero sí son maquinables, relativamente duras y resistentes a la corrosión y al desgaste.
- Como se explicó anteriormente, las fundiciones son aleaciones de hierro carbono del 2 al 5%, además de contar con cantidades de silicio del 2 al 4%, del manganeso hasta 1%, bajo contenido de azufre y fósforo, siendo estos los valores aproximados para una fundición.

Para poder comprender los usos y el alcance de la fundición, se detallarán los tipos de fundición más utilizados en la industria.

1.3.1 Fundición blanca

Este tipo de fundición se forma al enfriar rápidamente la fundición de hierro desde el estado líquido, siguiendo el diagrama hierro-cementita metaestable ($Fe - Fe_3C$); durante el enfriamiento, la austenita solidifica a partir de la aleación fundida en forma de dendritas. A los 1130°C el líquido alcanza la composición eutéctica (4.3% C) y se solidifica como un eutéctico de austenita y cementita llamado ledeburita. Se utilizan en la fabricación de partes de maquinaria agrícola, industrial y de transporte. Cuando el desgaste proviene de materiales en fragmentos (graneles), es más económico utilizar fundiciones blancas no aleadas o débilmente aleadas (en estado de moldeo o en condición de temple).

1.3.2 Fundición gris

La mayor parte del contenido de carbono en el hierro gris se da en forma de escamas o láminas de grafito, las cuales dan al hierro su color y sus propiedades deseables. Es fácil

de maquinar, tiene alta capacidad de templado y buena fluidez para el colado, pero es quebradizo y de baja resistencia a la tracción, con un porcentaje de C entre 2.5% y 4%. Se utiliza en aplicaciones como bases o pedestales para máquinas, herramientas, bastidores para maquinaria pesada, y bloques de cilindros para motores de vehículos, discos de frenos, herramientas agrícolas, entre otras.

1.3.3 Fundición maleable

El hierro maleable son tipos especiales de hierro producidos por el tratamiento térmico de la fundición blanca. Estas fundiciones se someten a rígidos controles de temperatura, ya tiene como finalidad promover la descomposición de la cementita en ferrita y grafito, dando por resultado una microestructura en la cual la mayoría del carbono está en forma de racimos o rosetas. Debido a su estructura la fundición maleable es dura, quebradiza y muy difícil de maquinar.

Se utilizan en la fabricación de pequeños accesorios para tuberías, componentes eléctricos y herramientas para la construcción, principalmente en piezas delgadas y en piezas que serán galvanizadas.

1.3.4 Fundición nodular

Se caracteriza porque en ella el grafito aparece en forma de esferas o nódulos minúsculos, de esta manera la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar. Esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene directamente en bruto de colada sin necesidad de tratamiento térmico posterior.

Las fundiciones nodulares perlíticas presentan mayor resistencia, pero menor ductilidad y maquinabilidad que las fundiciones nodulares ferríticas. Poco a poco sustituyen a los elementos de máquinas producidos por fundición gris, actualmente es el procedimiento más común y utilizado en la industria en el que se usan moldes de arena verde sin cajas metálicas y el moldeo se lleva a cabo a alta presión

1.4 Tipos de molde

Antes de realizar el proceso de fundición, se requiere conocer las características del molde que vamos a utilizar. Un molde es aquella pieza que contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida³. El tamaño y formas de la cavidad deben de sobredimensionarse para permitir la contracción del material y obtener así una buena solidificación y enfriamiento, además se debe considerar el material de construcción del molde y la fundición que se vaya a realizar, ya que de aquí se parte para conocer su clasificación. En general, se puede clasificar los procesos de fundición de acuerdo con el tipo de molde que se utiliza, siendo estos moldes desechables y moldes permanentes.

1.4.1 Moldes desechables

Son aquellos moldes donde, una vez que se solidifica el metal fundido, se deben destruir para retirar la pieza solidificada. Los más utilizados son aquellos formados por arena, su construcción consiste en copiar un modelo empleando arenas o tierras de moldeo, las cuales contienen material arcilloso dándole a estas propiedades de plasticidad, elasticidad y maleabilidad para poder obtener así la forma de este a través de la compactación de dicho material. El molde es extraído para que en este se vierta el metal fundido, obteniendo así las piezas requeridas. Se utiliza este procedimiento cuando:

- Se busca obtener piezas que no requieren una buena calidad superficial.
- Se requiere de una buena alternativa económica.
- Se trabaja con altas temperaturas y una gran variedad de metales.

Este procedimiento se ilustra en la Figura. [1.1]

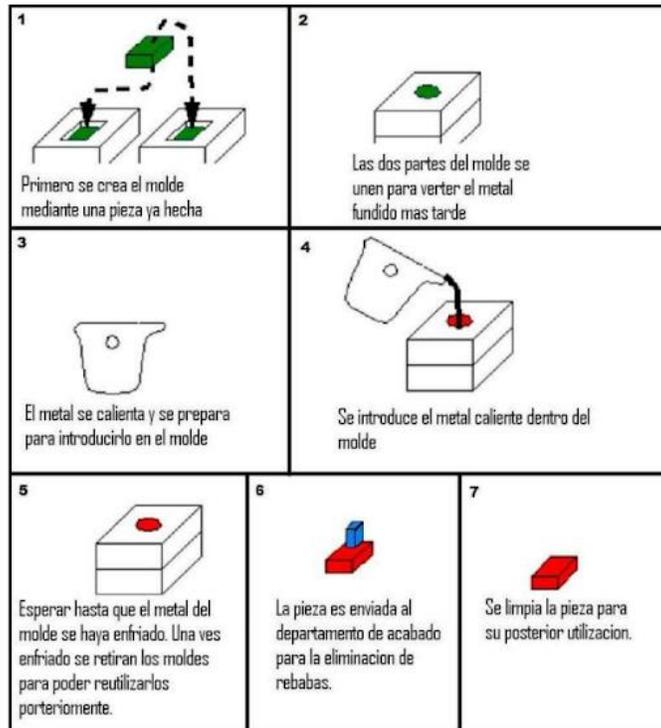


Figura [1.1] Procedimiento para colada utilizando un molde de arena.

Además del molde de arena, algunos moldes de carácter desechable son:

- Molde de cáscara
- Molde de yeso
- Molde de cerámica
- De modelo consumible o evaporable
- Molde a la cera perdida
- Revestimiento de cáscara cerámica

1.4.2 Moldes permanentes

Los moldes permanentes se utilizan una y otra vez para producir muchas piezas fundidas. Está hecho de metal (o de un material refractario cerámico, lo que es menos común) que soporte las temperaturas elevadas de la operación de fundido. En la fundición con este tipo de molde el proceso se divide en dos o más secciones que se abren para permitir el retiro de la pieza terminada.

Se tiene las siguientes |:

- Los metales que usualmente se funden en moldes permanentes son el estaño, plomo, zinc, aluminio, cobre y para aleaciones ferrosas se usan moldes refractarios.
- Durante el proceso, las caras interiores de los moldes se recubren con lubricantes o materiales refractarios con el fin de controlar la temperatura de la superficie del molde y facilitar el retiro de la pieza.
- Se obtiene un buen acabado superficial, así como el control dimensional estrecho y la obtención de propiedades mecánicas óptimas debido a que el enfriamiento rápido produce una estructura de grano fino.
- No se pueden realizar formas complejas como las que se pueden realizar con molde desechable debido a la necesidad de abrir el molde.
- El costo inicial del molde se justifica en series de grandes producciones con el menor costo por pieza.

Entre las principales fundiciones que utilizan este tipo de molde destacan:

- Fundición por gravedad
- Fundición hueca
- Fundición de vacío
- Fundición a presión
- Fundición a cámara fría / caliente
- Fundición por inyección
- Fundición centrífuga

1.5 Sistema de colada

El colado o vaciado es el proceso que da forma a un objeto al hacer entrar material líquido dentro de un molde y dejar que este solidifique. Cuando el metal solidifica en la cavidad este retiene la forma, posteriormente, se retira el molde y queda el objeto sólido conformado.

Los sistemas de colada son dispositivos necesarios para conducir el metal líquido a la cavidad del molde, sus principales componentes se observan en la Figura. [1.2] y Figura. [1.3], donde se destaca:

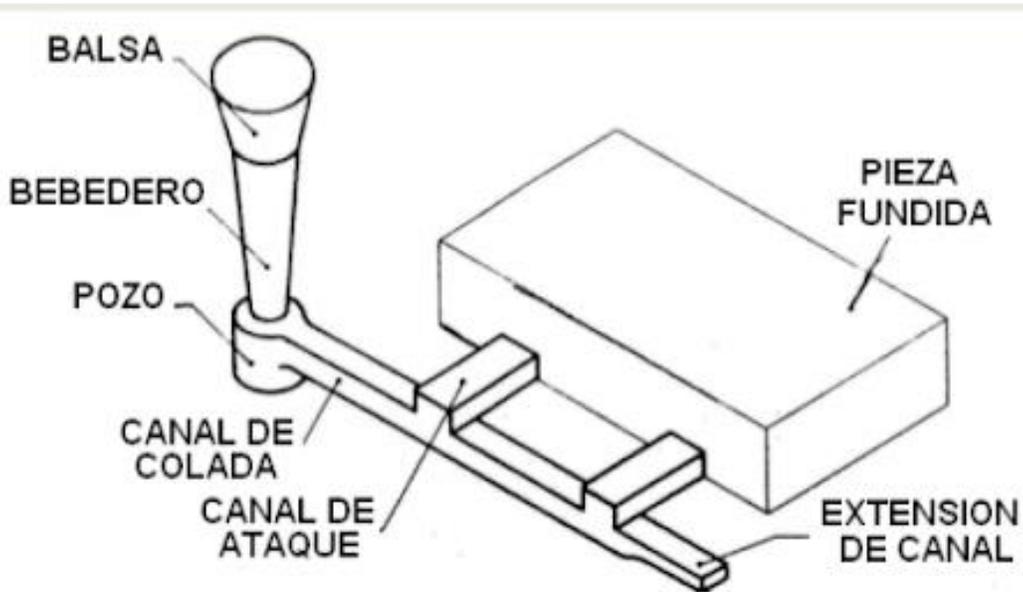


Figura [1.2] Esquema básico de un sistema de colada.

- *Colado o bebedero:* Es el conductor vertical a través del cual el metal entra en el canal de colada.
- *Pozo de colado:* Es la sección usualmente que se encuentra redondeada al final del bebedero, se utiliza para ayudar a controlar el flujo de metal que entra en el canal.
- *Canal:* Es la sección comúnmente horizontal a través de la cual el metal fluye, en el se distribuyen las entradas a la cavidad del molde.
- *Portadas o entradas:* Son canales secundarios, los cuales son variables en número de acuerdo con el diseño de la pieza que a través de las cuales el metal deja el canal para penetrar en la cavidad del molde.
- *Cavidad de colado:* Es la sección colocada en la parte superior del bebedero, su finalidad es darle facilidad al operador para mantener el metal dentro del molde y permitir el flujo continuo. Así mismo minimiza o evita la turbulencia del metal líquido y promueve la entrada al bebedero solo de metal limpio para ello usualmente emplean filtros.

- *Filtros:* Son pequeños dispositivos empleados en la cavidad de la colada en coacciones en el pozo, esto permite separar la escoria del metal y permitir un flujo laminar de metal limpio.

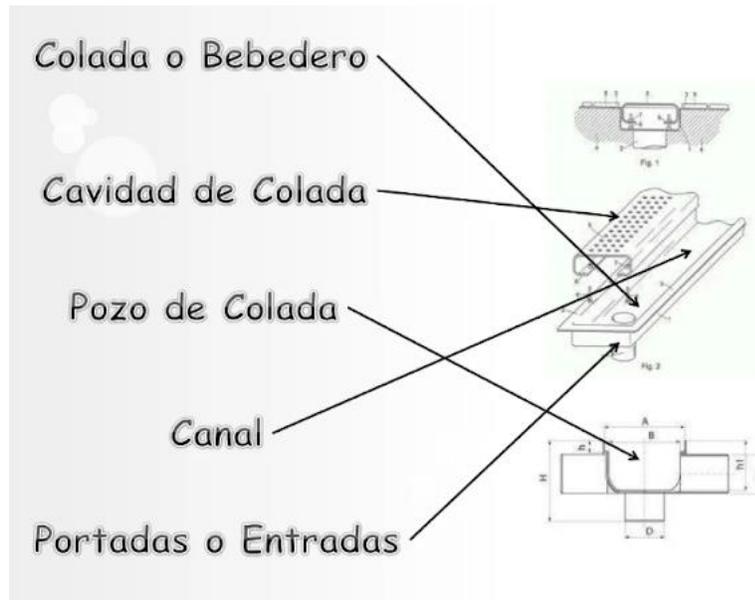


Figura. [1.3] Caracterización de un sistema de colada.

1.5.1 Diseño de una colada general

Después del calentamiento, y una vez alcanzada la temperatura adecuada (mínima a la que se puede producir una pieza sana), el material está listo para verterse en el molde, lo cual se refiere como vaciado. Dentro de los parámetros a considerar, la velocidad del 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 (se favorece la erosión de la arena del molde, así como que el metal atrape gases y escoria). Esto se puede expresar en a partir de la Ec. [1.1]:

$$v = \sqrt{2gH} \quad [1.1]$$

donde.

- v velocidad del metal líquido [m/s]
- g es la aceleración de la gravedad [m/s^2]
- H altura del bebedero (promedio en función de las condiciones de alimentación [m])

Esto, a su vez, tiene relación con la duración de una colada promedio. Considerando la masa total a depositar al interior de la cavidad, se puede calcular un tiempo de duración de la colada. La ecuación anterior es válida para piezas con una masa hasta de 450[Kg] (y paredes de 2.5 a 15 [mm]), por lo que se puede conocer el tiempo mediante la Ec. [1.2]:

$$t = s\sqrt{M} \quad [1.2]$$

donde.

- t duración de la colada [s]
- s coeficiente que considera el espesor de las paredes de la pieza
- M masa de la pieza y mazarota [kg]

Los principales valores del factor s se muestran en la Tabla [1.1]:

Tabla 1.1. Principales valores del factor s para la pared de la pieza

Espesor de las paredes de la pieza [mm]	s
2.5 - 3.5	1.68
3.5 - 8	1.85
8 - 15	2.2

Fuente: Ortíz, A (2013)

Para piezas medianas y grandes con una masa hasta de 1000 [Kg] y para fundiciones donde el material es acero (debido a la alta viscosidad que presenta este) se utiliza la Ec. [1.3].

$$t = s^3\sqrt{\delta M} \quad [1.3]$$

donde.

- δ es el espesor de la pieza [mm]

Los principales valores de este espesor se muestran en la Tabla [1.2]:

Tabla 1.2. Valores de espesor para la pieza

δ [mm]	s

Hasta 10	1
20	1.35
40	1.5
80 y mayores	1.7

Fuente: Ortíz, A (2013)

2. Métodos de fundición

2.1 Fundición centrífuga

Se define como el proceso de hacer girar el molde mientras se solidifica el metal, aprovechando la fuerza centrífuga para acomodar el metal en este. La mayoría de las piezas que se producen son cilíndricas aun cuando se pueden producir de muchos tipos. Mediante la centrifugación, la porosidad interna del material disminuye drásticamente, tanto en tamaño de poro como en las cantidades formadas.

Gracias a esto, se obtienen piezas con mayor detalle en la superficie, teniendo una mayor efectividad en piezas simétricas, aunque se pueden producir otros tipos de piezas fundidas.

Las aleaciones obtenidas presentan las siguientes ventajas:

- Son homogéneas
- Libres de sopladuras e inclusiones
- Cuentan con altas propiedades mecánicas

Además, las piezas producidas son:

- Fáciles de mecanizar
- Exentas de distorsiones
- Presentan resistencias a la corrosión y el desgaste

Como muestra de estas propiedades, se puede realizar una comparación metalográfica de este método con una pieza obtenida mediante molde de arena, como se ilustra en la Figura [2.1].

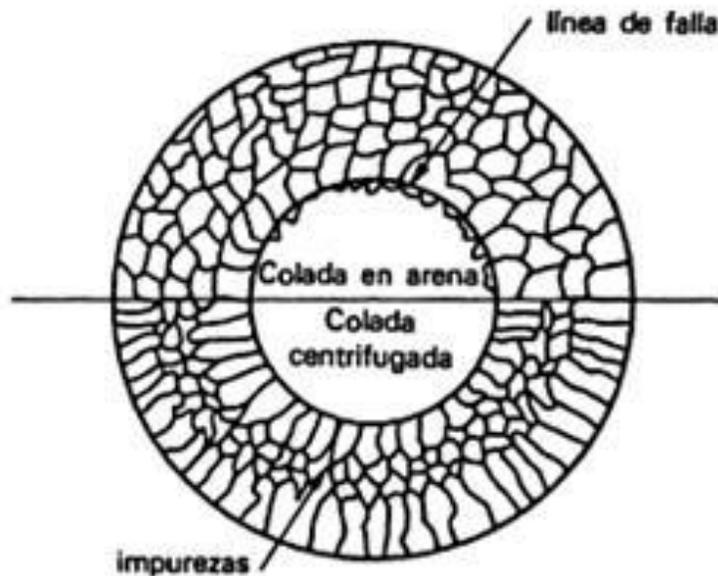


Figura [2.1] Comparación metalográfica de un proceso de fundición con arena y fundición centrífuga.

2.1.1 Clasificación de la fundición centrífuga

Existen dos maneras de clasificar el proceso de fundición centrífuga⁵: por el eje de rotación y por el tipo de aplicación.

Por el eje de rotación se puede dividir en:

- **Fundición centrífuga horizontal:** en este proceso el material fundido gira alrededor de un eje horizontal establecido por la máquina. Mediante este procedimiento que logra obtener los anillos de acero. Generalmente se utilizan para la fabricación de tuberías, tubos, casquillos, camisas de cilindros (revestimientos) y piezas fundidas cilíndricas o tubulares de forma simple.
- **Fundición centrífuga vertical:** para este proceso se vincula el efecto de la gravedad sobre el metal líquido, el cual ocasiona que la pared del fundido sea más gruesa en la base que en la parte superior de fundición, por lo tanto, gira alrededor de un eje vertical. El rango de aplicación para este tipo de fundición es considerablemente más amplio, ya que las piezas fundidas que no son cilíndricas, o incluso simétricas, se pueden hacer utilizando este eje.

4. Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.

5. Stefanescu, D. M. (1988). Metals Handbook, Volume 15 - Casting. ASM International.

La fundición centrífuga (tipo de aplicación) se puede clasificar de la siguiente manera:

- **Fundición centrífuga real:** mediante este proceso el metal líquido se vierte a un molde rotatorio para producir piezas tubulares. En algunas operaciones, la rotación del molde comienza después del vertido y no antes. La velocidad de rotación ocasiona que las fuerzas centrífugas hagan que el metal adopte la forma de la cavidad del molde. Así, la forma exterior del fundido puede ser redonda, octagonal, hexagonal, etcétera. Sin embargo, la forma interior del fundido es (en teoría) perfectamente circular, debido a las fuerzas con simetría radial que actúan.
- **Fundición semicentrífuga:** esta fundición emplea la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas en vez de piezas tubulares. La velocidad de rotación se establece de tal forma que se puede obtener el factor G que se localiza alrededor de los moldes, aunque esto considera el diseño de las mazarotas en el centro con el fin de suministrar el metal. La densidad del metal fundido es mayor en las secciones exteriores, por lo que se utiliza para piezas en las que el centro de la fundición deba ser maquinada.
- **Fundición centrifugada:** en este proceso el molde está diseñado con las cavidades de la pieza localizada hacia afuera del eje de rotación, de modo que el metal vertido en el molde se distribuye por medio de la fuerza centrífuga. El proceso se emplea para piezas pequeñas y no es un requerimiento la simetría radial de la pieza, como sí lo es para los otros dos métodos de fundición centrífuga⁴, como se puede observar en la Figura [2.2].

4. Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.

5. Stefanescu, D. M. (1988). Metals Handbook, Volume 15 - Casting. ASM International.

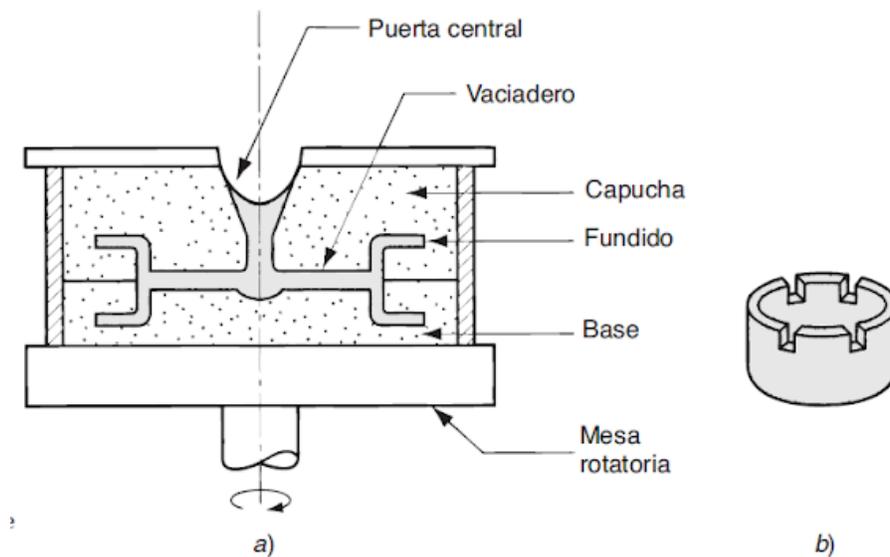


Figura [2.2] Proceso de la fundición centrífuga (a) y el producto obtenido (b). (Groover, 2007)

2.1.2 Fundición centrífuga horizontal

La obtención de los tubos sin costura se realizará utilizando este procedimiento, por lo que es necesario conocer el funcionamiento de esta máquina, así como los principales parámetros, que son:

- Velocidad de vaciado
- Temperatura de fundición
- Temperatura del molde
- Velocidad de rotación

Una máquina centrífuga horizontal debe ser capaz de realizar las siguientes operaciones precisas y con la repetibilidad adecuada⁵:

- El molde debe girar a una velocidad predeterminada.
- Debe haber un medio para verter el metal fundido en el molde giratorio.
- Una vez vertido el metal, se establece la velocidad de solidificación adecuada en el molde.
- Debe haber un medio para extraer la fundición solidificada del molde.

4. Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.

5. Stefanescu, D. M. (1988). Metals Handbook, Volume 15 - Casting. ASM International.

La Figura [2.3] muestra el diseño común de la máquina de centrifugado horizontal, los diseños varían de acuerdo con las necesidades requeridas, generalmente, ya existen diferentes sistemas de accionamiento, rodillos portantes, entre otros.

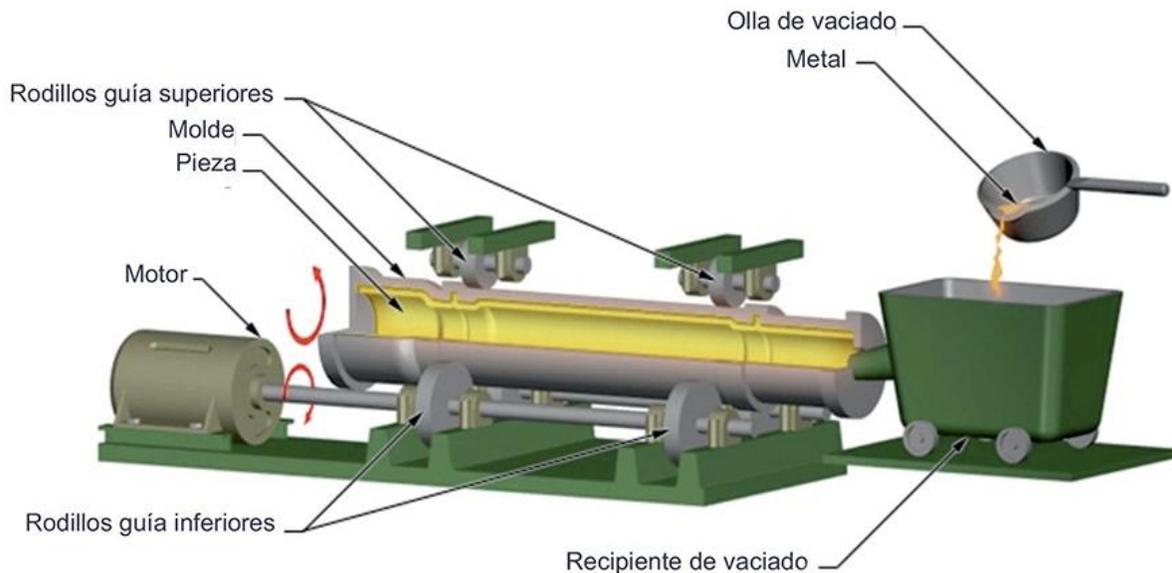


Figura [2.3] Esquema de un diseño común para una máquina de centrifugado horizontal. ⁶

2.1.3 Colada de la fundición centrífuga horizontal

Ya que se distribuye el metal líquido a lo largo del molde rotatorio, las fuerzas centrífugas toman la forma de la cavidad del molde⁶, en el caso de la fundición centrífuga horizontal y con apoyo de la Figura. [2.3], se puede utilizar la fuerza de rotación con ayuda de la Ec. [2.1]:

$$\frac{F}{W} = m \frac{v^2}{Rmg} \quad [2.1]$$

donde:

- F es la fuerza centrípeta [N]
- W es el peso de los componentes [N]
- m es la masa [kg]
- R es el radio interior del molde [m]
- v es la velocidad lineal [m/s^2]
- g es la aceleración de la gravedad [m/s^2]

6. Avalos, J. L. D., & Pérez, E.O. (2016). Diseño de un prototipo de colada centrífuga horizontal para producir tubos de aluminio. [Título Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio Institucional de la UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2016/mayo/0744511/Index.html>

Se utiliza el factor G para obtener la relación de la fuerza centrípeta al peso. Se cambia para obtener la velocidad angular ($v = \omega R$), obteniendo así la Ec. [2.2]:

$$GF = \frac{\omega^2 R^2}{Rg} = \frac{\omega^2 R}{g} \quad [2.2]$$

Considerando el motor eléctrico en el equipo, se puede cambiar la velocidad a revoluciones por minuto. Realizando la conversión se obtiene la Ec. [2.3]:

$$GF = \frac{R}{g} \left(\frac{\pi N}{30}\right)^2 \quad [2.3]$$

Finalmente, de la Ec. [2.3] se obtiene el número de revoluciones necesarias (N) para esta máquina con ayuda de la Ec. [2.4];

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g(GF)}{D}} \quad [2.4]$$

2.1.4 Parametrización de la fundición centrífuga horizontal

De acuerdo con otros trabajos de obtención y diseño de una máquina de colada por centrifugación horizontal⁷, se obtuvieron 4 parámetros fundamentales para el procedimiento de fundición centrífuga horizontal, siendo estos:

- **Velocidad de vertido:** este parámetro se obtiene al vestir el metal fundido dentro del molde por un extremo, generalmente, los promedios de vaciado cuando son muy lentos pueden resultar en la formación de poros por gases, cuando los promedios son altos tiende a formar la solidificación del material, provocando un agrietamiento longitudinal. Estas velocidades varían de acuerdo con el tamaño de la pieza de fundición y del metal colado⁷.
- **Temperatura del colado:** es la temperatura requerida para calentar y producir una fundición, se encuentra en función del metal o de la aleación que vaya a ser fundida, las dimensiones del molde y las propiedades físicas del material del molde. Para una primera aproximación se utiliza la Ec. [2.5] de manera empírica⁷:

$$L = 2.4\Delta T + 110 \quad [2.5]$$

7. Huilca, C. L. G., & Almeida, D. P. F. (2012). Obtención de tubos sin costura por el proceso de colado por centrifugado horizontal. [Título Profesional, Escuela Politécnica Nacional] Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5419>

donde:

- L es el largo del conducto del fluido [mm]
- ΔT es el grado de sobrecalentamiento [$^{\circ}\text{C}$]

Una alta temperatura de fundición requiere de altas velocidades de rotación para evitar deslizamiento del metal, bajas temperaturas de fundición pueden causar juntas frías y porosidades. La temperatura de colado también influye en la tasa de solidificación y por lo tanto afecta la cantidad de segregaciones formadas.

- **Temperatura del molde:** se toma como referencia la temperatura inicial del molde que puede variar dependiendo de la temperatura de fusión del metal colado, el espesor del molde y el espesor de la pared del tubo a ser fundido. La temperatura inicial del molde no afecta a la estructura de la fundición resultante tanto como los parámetros anteriores, pero es importante conocer esta referencia, ya que se vincula con la estructura final que toma la fundición dentro del molde⁸.
- **Velocidad de rotación:** esta gira a una fuerza centrífuga variable entre 75 a 120 veces la fuerza de gravedad⁸. El tener una velocidad de rotación muy baja puede ocasionar deslizamiento del material, y provocar un mal llenado del molde y a su vez una pobre superficie terminada; por el contrario, el tener altas velocidades de rotación, generará segregación del material en toda la superficie interior del molde. Además, altas revoluciones al inicio del proceso indica que se debe controlar la fundición, ya que se pueden originan altos esfuerzos capaces de causar rompimientos radiales o grietas circulares mientras que se genera segregación del material en toda la superficie interior del molde.

2.1.5 Tubos sin costura

Dentro de la fabricación de tubos, existe una división de estos que no contempla la soldadura en su proceso de fabricación. Los tubos sin costura son aquellos cuya fabricación parte de un lingote cilíndrico que se calienta en un horno para después

proceder a la extrusión de este, aunque no es la única forma de obtenerlos. Es el más utilizado a nivel industrial debido a que se pueden obtener tubos gruesos que soportan grandes presiones desde cualquier dirección, tienen una alta resistencia a la corrosión y presenta pocas impurezas. Presentan menos fallas que los tubos con costura y cuentan con una mayor eficiencia y firmeza

Existen 2 tipos:

- **Tubos sin costura estirados en frío (CDS):** aquellos que se pueden fabricar con acero al carbón 1018 y acero al carbón 1026. Se realiza un proceso de estirado en frío que aumenta las propiedades físicas del tubo, lo que reduce el tiempo de maquinación. Se caracterizan por:
 - Un mejor acabado superficial
 - Alta resistencia al peso
 - Altos límites elásticos
 - Gran precisión dimensional y uniformidad microestructural
 - Tolerancias ajustadas
 - Diámetro interior y exterior más uniforme

- **Tubos sin costura acabados en caliente (HFS):** aquellos fabricados usualmente con aceros al carbón 1026, estos se utilizan en la industria automotriz, construcción y en electrodomésticos. Se fabrican a partir de una barra caliente que gira a través de un tubo hueco. Se caracteriza por:
 - Buena relación calidad precio para grosores elevados de pared
 - Facilidad del maquinado por los tamaños
 - Disponibilidad de varias medidas
 - Se pueden realizar otras técnicas de procesamiento.

2.1.5.1 Características.

Para ambos tipos de tubos, las principales características que se deben cumplir para el uso de acero de acuerdo con la norma ASTM A106 son:

- **Composición química:** factor que afecta el rendimiento de los tubos, se pueden formular los parámetros del proceso de laminación y el tratamiento térmico, siendo los principales elementos:
 - Aleación: se agregan intencionalmente, su control depende del uso que se le va a dar.
 - Residuales: aportados por la propia fabricación del acero, se deben controlar durante el procedimiento.
 - Nocivos: deben tener un control estricto, algunos ejemplos son el As, Sn o Pb.

Para poder tener un control preciso en la composición y una alta pureza, se deben de reducir las inclusiones no metálicas del tubo.

- **Precisión dimensional y forma:** sus dimensiones geométricas incluyen el diámetro exterior, el grosor de la pared, la elipticidad, la longitud, curvatura, ángulos y todas las dimensiones de la sección transversal en los tubos.
- **Calidad de la superficie:** se deben de cumplir los requisitos de superficie lisa y limpia, además de evitar determinados defectos, que se pueden clasificar como:
 - Defectos peligrosos: grietas, pliegues internos y externos, aplastamiento, delaminación, abolladuras, entre otros.
 - Defectos generales: hoyos, líneas azules, rayones, magulladuras, marca de los rodillos, entre otros.
- **Propiedades físicas y químicas:** aquellas propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a determinadas temperaturas junto con la resistencia a la corrosión. Esto a su vez depende de la composición química y la estructura del acero, que nos da el rendimiento y su pureza, junto con los métodos de tratamiento térmico utilizado.

- **Rendimiento y organización metalográfica:** esto incluye, para nuestro caso de estudio, el estiramiento de anillos y el rendimiento de soldadura de tubos de acero. Para el caso de la organización metalográfica, esperamos observación los defectos de observación macroscópica y microscópicamente.

2.2 Fundición de arena

De la clasificación general, este tipo de fundición se considera desechable debido a su molde de arena. Este tipo de fundición es la más utilizada debido a la sencillez de su procedimiento. Se utiliza arena verde, la cual es una mezcla de arena de sílice y bentonita con un alto índice de refractariedad que le permite soportar las altas temperaturas del trabajo en el vaciado de la colada. El proceso se ilustra en la Figura [2.4], para efectos prácticos, solo se comentará el proceso de colado y de solidificación para poder compararlo con la fundición centrífuga.

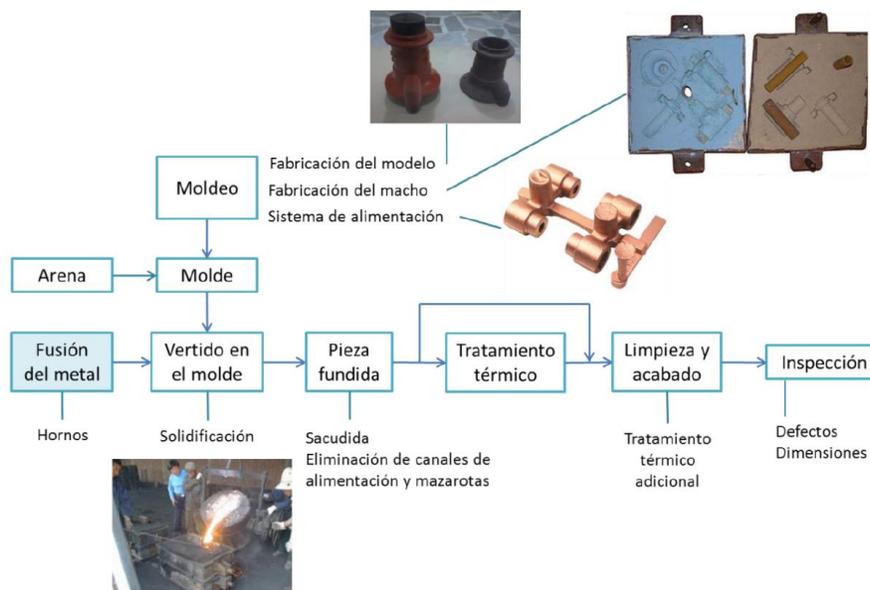


Figura [2.4] Proceso de la fundición de arena. (García. 2016)

2.2.1 Colada y solidificación de la fundición de arena

El vaciado del metal fundido tiene el mismo funcionamiento mostrado en la Figura. [2.4], la diferencia es que este equipo funciona mediante la gravedad y no por rotación del eje, por lo que es más sensible a las turbulencias en el molde. Las turbulencias del flujo varían

la velocidad del fluido, se deben de evitar para que se degrade el molde y afecte el producto final, además de la formación de óxidos no deseados.

Esta fundición está más en contacto con la evacuación del gas hacia la atmósfera, ya sea por la propia evaporación, aditivos, CO y CO₂ o por la expansión del aire presente en la cavidad del molde. Esto lleva a tener un mecanizado a la hora de eliminar las rebabas en las cajas de fundición, por lo que es necesario ajustar el sistema de alimentación y las mazarotas.

La solidificación es el proceso más importante, ya que de aquí se obtiene el resultado final de la pieza. Los procesos físicos involucrados generan los defectos conocidos como porosidades, por lo que se consideran las propiedades mecánicas y funcionales del material que influirá en el proceso de transformación líquido-sólido y del enfriamiento. Además, es importante considerar el intercambio de calor que se produce mediante la conducción y convección en las zonas con mayor contacto al medio ambiente, ya que se pueden generar distribuciones en la temperatura de forma discontinua, conocidas como “gradiente de temperatura”

Los procesos de esta solidificación se ilustran de mejor manera en la Figura [2.5], donde, al final de esta, se tiene una contracción en el enfriamiento que provoca las dendritas y dificulta el paso de la alimentación del líquido, provocando discontinuidades en la pieza. Por lo tanto, si la alimentación de la pieza es la adecuada en el equipo utilizado, no se tendrá porosidades y tampoco estas discontinuidades, además de tener un control preciso y la temperatura, sin embargo, estas condiciones no suelen ser las ideales al momento de trabajar con una fundición.

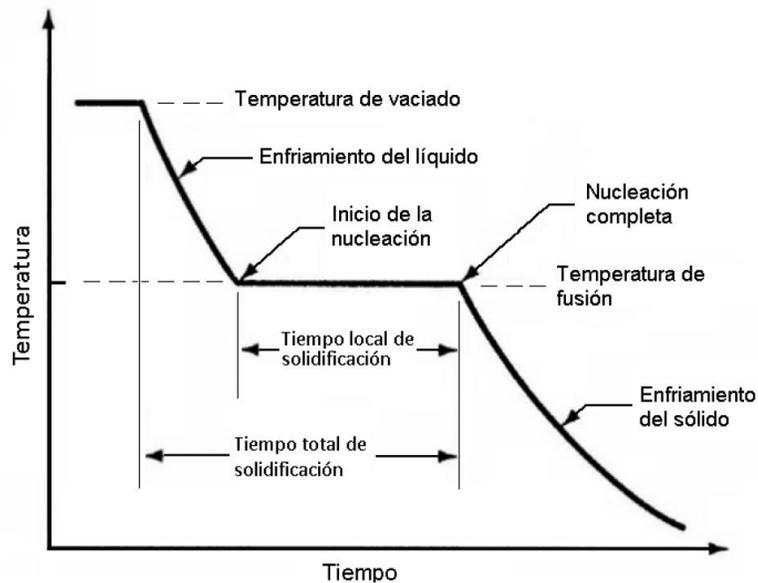


Figura [2.5] Gráfico del avance de la solidificación. (García, 2016)

2.2.2 Parámetros de la fundición de arena

Los parámetros específicos de la fundición nodular es el diseño del moldeo y del sistema de colada. La exactitud en el dimensionado final de la pieza depende del tipo de proceso y de la naturaleza de cada dimensión⁹. Los principales errores que pueden aparecer por una mala parametrización son:

- Errores del moldeo
- Errores en las dimensiones del molde
- Mala contracción del material y distorsión del enfriamiento
- Rebabas y un acabado deficiente

Por ello, se plantean las siguientes medidas para evitar estos errores:

- **Diseño del molde:** El modelo debe diseñarse reproduciendo fielmente la forma exterior de la pieza a fabricar y teniendo en cuenta aspectos como su disposición en el molde, sobredimensionado y la necesidad de la colocación de machos para dar formas interiores. El molde de arena se fabrica con la llamada mezcla de moldeo, que consiste en una mezcla de materiales inorgánicos (arena sílice y

aglutinante arcilloso), con cierta cantidad de agua. Considerando el uso de arenas de moldeo se obtienen ciertas propiedades que permiten conocer los parámetros de diseño. Estos parámetros se ilustran en la Tabla [2.1]:

Tabla 2.1. Propiedades de las arenas de moldeo

Material del molde	Conductividad térmica $k[\frac{W}{mK}]$	Densidad $\rho[\frac{kg}{m^3}]$	Calor específico $C_p[\frac{J}{kgK}]$	Expansión 20-1200 [°C] %	Temperatura de fusión [K]
Arena silícea	0.52	1600	1170	1.90	1986
Arena de cromita	0.38	2650	990	0.60	2363
Arena de olivino	0.35	1700	990	1.10	2143
Arena de zirconio	1.04	2720	840	0.45	2813

Fuente: García (2016).

- **Velocidad de vaciado:** la velocidad de vaciado deberá ser la suficiente para que llene la totalidad el molde sin producir turbulencias del flujo, las cuales responden a las variaciones erráticas en la velocidad del fluido. Esta turbulencia debe evitarse, ya que puede producir la degradación del molde y el desprendimiento local del mismo afectando directamente a la forma final de la pieza. Al igual que la fundición centrífuga, las velocidades varían de acuerdo con el tamaño de la fundición y del metal colado.
- **Preparación de la arena:** deben de cumplir con ciertas propiedades de plasticidad, cohesión, resistencia a las altas temperaturas, conductividad calorífica, flexibilidad, facilidad de desmoldeo y de fluidez. La preparación de la arena se realiza en un molino en el cual se añaden tanto la arena como el agua y el resto de los componentes que se estimen, posteriormente la mezcla se remueve hasta que adquiere el tamaño de grano y el nivel de consistencia deseado.

2.3 Fabricación de los anillos por fundición

Los anillos obtenidos por el proceso de fundición centrífuga se obtienen mediante tubos sin costura, donde se realiza un corte del material para su formación, mientras que los anillos obtenidos por la colada se realizan mediante un molde de arena donde, en cada

ramificación, se colocan de dos a seis anillos, para los cuales no es necesario el corte, solamente un rectificado o un acabado. Existen varios tipos de métodos y máquinas especializadas para la manufactura de los anillos por fundición centrífuga, sin embargo, los dos más importantes son:

- **Corte laser:** técnica que, a través de la energía térmica, es empleada para separar piezas de una pieza metálica, plástica, orgánica o incluso textil. Su gran precisión y velocidad permiten someter este proceso a distintos cortes, grabados o marcados, por lo que actualmente es de los más utilizados en el sector industrial. Durante el proceso de corte, el rayo láser se concentra en haz de luz sobre un punto de la superficie del material de trabajo elevando su temperatura hasta que se derrite o vaporiza. Una vez el rayo láser ha traspasado la superficie se inicia el proceso de corte, redirigiendo este en los puntos determinados según la geometría seleccionada hasta separar por completo el material. Al terminar el corte, se utiliza gas a presión (oxígeno, nitrógeno o bióxido de carbono) para extraer el material resultante.
- **Chorro de agua:** se realiza impactando el material a cortar un chorro de agua a gran velocidad que produce el acabado deseado. El método se puede emplear, sin corte, para preparar superficies, la limpieza de barcos, automóviles y en la industria aeroespacial. No genera contaminantes ni comporta oxidación superficial. Además, la generación de viruta no es un problema. La máquina dispone de un recipiente para recibir el chorro de agua y el material eliminado. Es necesario tener un modelo digitalizado por computadora (también conocido como CAD) de la pieza a cortar (en este caso, el anillo) para asignar las medidas requeridas al momento de utilizar la máquina de corte, esto con el fin de obtener un buen acabado en la pieza.

3. Equipos y metodología para la caracterización de los anillos

3.1 Microscopio electrónico de barrido (MEB)

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope, por sus siglas en inglés), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz que, con la ayuda de diferentes detectores, recoge los electrones generados de la interacción con la superficie para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma (Caballero & Romero, 2022). Este equipo proporciona información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes. El MEB puede utilizar dos tipos de electrones:

- **Electrones secundarios:** se producen cuando un electrón del haz pasa cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionando la suficiente energía a uno o varios de los electrones interiores para saltar fuera de la muestra. Estos producen muy poca energía, por lo que deben encontrarse cerca de la superficie para poder escapar.
- **Electrones retrodispersados:** se producen cuando un electrón del haz choca frontalmente con el núcleo de un átomo de la muestra, siendo repelido en sentido contrario fuera de la muestra. La intensidad de dicho efecto varía proporcionalmente con el número atómico de la muestra.

El microscopio utilizado en este trabajo de investigación es el PHILIPS XL30 S-FEG mostrado en la Figura [3.1] donde se pueden observar estructuras superficiales por electrones secundarios, distribución de materiales en una muestra por electrones retrodispersados y elementos que son analizados por EDS, (Analizador de dispersión de energía mediante rayos X) en la muestra. El análisis cualitativo calcula la concentración de elementos, con la posibilidad de distribuirlos en un gráfico o mapa.



Figura [3.1] Microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL30 S-FEG.

3.2 Difracción de rayos X

La teoría de la difracción de rayos X se da al mismo tiempo que se conoce la naturaleza de estos rayos en cristales, demostrando así que se tiene una nueva forma de estudiar la materia. Los rayos X consisten en radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz, pero con una longitud de onda mucho más corta. Su unidad de medida son los Angstrom (Å) igual a 10^{-10} m. Los rayos utilizados en la difracción tienen longitudes en un rango de $0.5 - 2.5 \text{ Å}$, mientras que la longitud de onda de luz visible está en un orden de 6000 Å .

La difracción de rayos X (DRX, por sus siglas en inglés) permite entonces conocer la geometría tridimensional de materiales cristalinos. Inicialmente, esta técnica se utilizaba para fines de investigación, sin embargo, se ha logrado darle una aplicación industrial en el desarrollo de materiales como metales, cerámicas, polímeros y plásticos, así como una amplia aplicación en la metalurgia y la industria farmacéutica.

Los rayos X reemitidos desde átomos cercanos entre sí, se consideran constructivos o destructivos, siendo este el fundamento de la difracción fundamentada en la Ley de Bragg. Esta ley permite conocer la interferencia de los rayos de acuerdo con los diferentes átomos proporcionados y el ángulo utilizado, esto mediante la Ec. [3.1]:

$$n\lambda = 2d \text{sen}(\theta) \quad [3.1]$$

donde:

- n es el número entero obtenido
- λ es la longitud de onda de los rayos X
- d es la longitud entre los planos de la red cristalina
- θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión, como se muestra en la Figura [3.2]

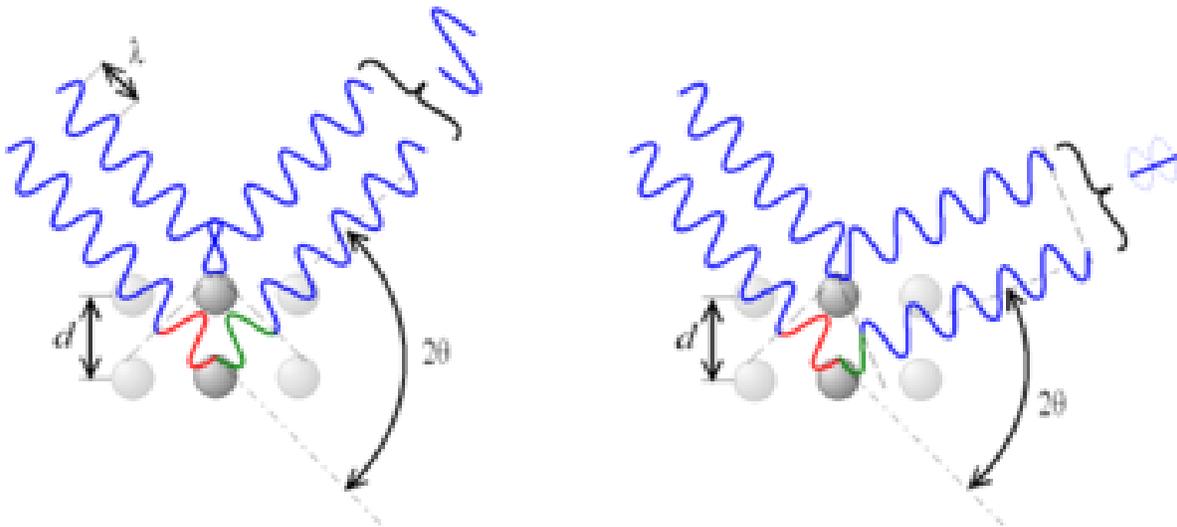


Figura [3.2] Ángulo de desviación (2θ) que dará la interferencia constructiva (izquierda) y destructiva (derecha).

El difractor de rayos X Modelo D8 Advance de marca Bruker fue el equipo utilizado en este trabajo de investigación, el cual se muestra en la Figura [3.3]



Figura [3.3] Difractómetro de rayos X Modelo D8 Advance de la marca Bruker.

3.3 Ensayos de dureza

3.3.1 Ensayo Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell es un "ensayo rápido" usado principalmente con materiales metálicos. El cálculo del ensayo Rockwell (HR) consiste en medir la profundidad de una penetración causada por una bola de carburo de diamante o acero. Utiliza los siguientes indentadores:

- Cono de diamante
- Bola de acero de 1/16", 1/8", 1/4" o 1/2"

El resultado son 30 escalas Rockwell diferentes, cada una de ellas caracterizada por una combinación diferente de tipo de indentador y carga principal que tendrán su propia aplicación individual o para un material específico. Dependiendo de la carga y el tipo de indentador, se utilizan las normas establecidas como la ISO 6508 y ASTM E18.

Para los anillos, se utiliza el ensayo de dureza Rockwell tipo C, ya que soportan una carga de aprox. 1470 [N] con el indentador tipo cono de diamante.

Los resultados de carga consisten en dos etapas de aplicación de carga tal como se muestra en la Figura [3.4], siendo estas una previa P_o y una posterior P_1 tal que:

$$P_f = P_o + P_1$$

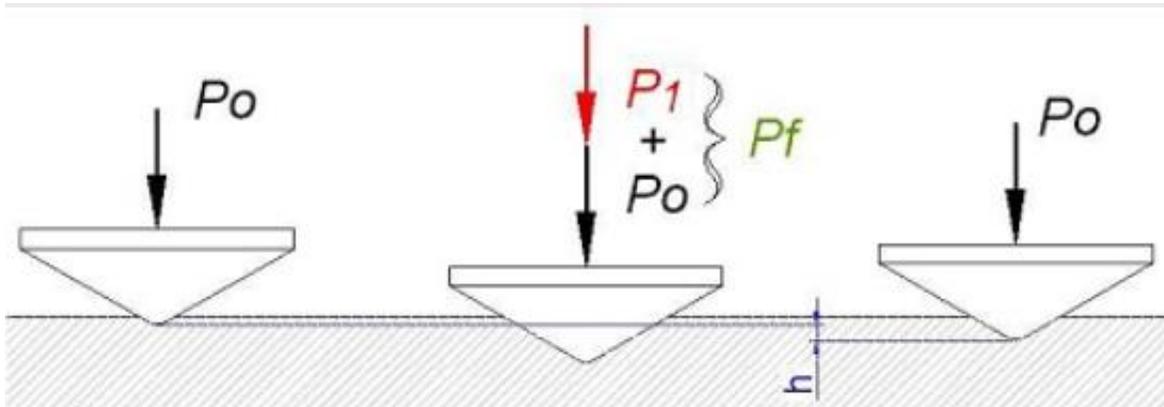


Figura [3.4] Esquema de aplicación de carga para el ensayo de dureza Rockwell.

Para las probetas, el cono penetra en la superficie una cantidad determinada h_o sobre la acción de la carga P_o que se mantendrá al final del ensayo. Esta penetración inicial permite eliminar la influencia de las condiciones superficiales. Posteriormente, se aplica la carga P_1 , acentuando poco a poco para después retirarla y determinar el número de dureza (HR) con la profundidad restante.

Para llevar a cabo el ensayo de dureza Rockwell deberá atenderse a las siguientes restricciones:

- La temperatura de ensayo deberá ser la ambiental (de 22° C) \pm 5.
- La superficie de la probeta deberá estar plana, limpia y perpendicular a la bola o cono indentador.
- El espesor de la probeta deberá ser al menos 10 veces la profundidad de penetración del cono o de la bola indentadora.
- Cada vez que se realice un cambio de indentador en la máquina, la primera huella obtenida no se tendrá en cuenta, para dar lugar a que el indentador se asiente.

- Se realizarán de 5 a 10 indentaciones por probeta, teniendo en cuenta que la separación del borde de la probeta y de una huella al borde de la otra deberá ser mayor a 2,5 veces el diámetro de la huella

3.3.1.1 Designación de la dureza.

Se utiliza la nomenclatura dada por la Ec. [3.2]:

$$n \text{ HR } (\text{letra}) \quad [3.2]$$

donde:

- n es el valor numérico de la dureza obtenida
- HR es la identificación del ensayo Rockwell
- (letra) corresponde al tipo de escala usada.

El durómetro digital marca Mitutoyo (Figura [3.5]) fue el equipo que se utilizó para realizar el ensayo de dureza Rockwell, el cual se encuentra en el laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.



Figura [3.5] Equipo digital para la obtención de dureza Rockwell.

3.3.2 Ensayo Brinell

El ensayo de dureza Brinell se utiliza para muestras de mayor tamaño con materiales cuya estructura de grano es grande o irregular. Este equipo presiona una bola de carburo de tungsteno sobre la muestra que posteriormente mide ópticamente el diámetro de la impresión. Existen varios métodos comunes de ensayo de dureza Brinell, que responden a diferentes materiales y rangos de dureza, para ello se utiliza la norma ASTM E10-01 para conocer el tipo de indentador.

La mayoría de los métodos puede realizarse en cualquier máquina de ensayo de dureza Brinell, utiliza un penetrador tipo bola de acero extraduro de diámetro D que se apoya sobre los anillos. Se ejerce una fuerza P durante cierto tiempo dado, dejando una huella de diámetro d sobre el metal. Esta dureza viene definida por la Ec. [3.3]:

$$HB = \frac{P}{S} \quad [3.3]$$

donde:

- S es la superficie de la huella [mm^2]
- P la presión del ensayo [kgf]

También puede usarse la Ec. [3.4]:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [3.4]$$

donde:

- P es la carga de la prueba [kg]
- D es el diámetro de la bola indentadora [mm]
- d es el diámetro de la huella marcada [mm]

3.3.2.1 Procedimiento.

El tamaño de la bola se elegirá en función del espesor de la probeta a ensayar. En la siguiente tabla se indican los diámetros (D) de la bola indentadora en función del espesor de la probeta, tal como se muestra en la Tabla [3.1]:

Tabla 3.1. Indicadores de tamaño para la bola indentadora

Espesor de la probeta [mm]	Diámetro de la bola D, [mm]
Mayor de 6	10
Entre 3 y 6	5
Menor de 3	2.5
	1.25
	0.625

Fuente¹⁰

Una vez determinado el diámetro (D) de la bola indentadora se determina el valor de la carga (P) que hay que aplicar.

Para la ejecución del ensayo, la carga se hace aumentar lentamente hasta alcanzar el valor determinado y se mantiene así constante durante un cierto tiempo (t), cuyo valor se calculará más adelante.

El valor de la carga (P) a aplicar sobre la probeta de ensayo se obtiene con la Ec. [3.5]:

$$P = KD^2 \quad [3.5]$$

donde la K es una constante que depende del tipo de material a utilizar, los más utilizados se muestran en la Tabla [3.2]:

Tabla 3.2. Materiales y sus valores K más utilizados

Material	K
Hierros y aceros	30
Cobre, bronce y latón	10
Aleaciones ligeras	5
Estaño y plomo	2.5
Metales blandos	1.25 – 0.5

Fuente¹⁰

Para el cálculo del tiempo de aplicación de la carga, dependerá del material a la probeta a ensayar, estos tiempos se muestran en la Tabla [3.3]:

Tabla 3.3. Materiales y sus valores de tiempo respectivos

Material	Tiempo t [s]
Hierros y aceros	10 a 30
Cobre, bronce y latón	30

Aleaciones ligeras	30 a 120
Estaño y plomo	120
Metales muy blandos	120

Fuente¹⁰

Algunos de los valores obtenidos de dureza para algunos materiales se muestran en la Tabla [3.4]:

Tabla 3.4. Valores típicos de dureza Brinell para algunos materiales

Material	Dureza Brinell [HB]
Aceros de herramientas templado	500
Acero dulce (0.80% de carbono)	210
Acero dulce (0.10% de carbono)	110
Bronce	100
Latón	50
Aluminio	25 - 30

Fuente¹⁰

El equipo utilizado para determinar la dureza Brinell marca KARL FRANK GMBH, que se encuentra en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Facultad de Ingeniería UNAM se muestra en la Figura [3.6]



Figura [3.6] Equipo para la obtención de dureza Brinell.

3.3.3 Ensayo Vickers

El ensayo de Vickers tiene la característica de ser utilizado a nivel micro y macroestructural, debido a su amplio rango de carga, múltiples aplicaciones y versatilidad en los materiales. Se considera más sencillo de utilizar que otros ensayos, ya que los cálculos requeridos son independientes del tamaño del penetrador, además de que este es de tipo diamante piramidal, el cual se puede utilizar en todos los materiales y rangos descritos anteriormente. Los rangos del ensayo Vickers son:

- **Macro dureza:** cargas superiores a 1 [kgf], la superficie debe esmerilarse.
- **Micro dureza:** cargas iguales o inferiores a 1 [kgf], la superficie debe someterse a un pulido mecánico o electropulido. No suele dañar la superficie tratada, por lo que no se muestra la huella donde se realiza la prueba.

Respecto a la carga aplicada en el ensayo de dureza, se tienen las estandarizaciones de la Tabla [3.5]:

Tabla 3.5. Valores nominales del ensayo de dureza Vickers

Estandarización	Rango de Carga	
ISO 6507	10 [gf] ≤ 100 [kgf]	0.0981 [N] ≤ 9.817 [N]
ASTM E384	1 [gf] ≤ 1 [kgf]	0.0098 [N] ≤ 9.807 [N]
	> 1 [kgf] ≤ 120 [kgf]	> 9.807 [N] ≤ 1176.8 [N]

Fuente¹¹

- El tiempo de indentación es entre 10 y 15 segundos
- El grosor de muestra según la norma ASTM tiene como mínimo 10 veces la profundidad de la penetración
- El grosor de muestra según la norma ISO debe ser como mínimo 1.5 veces la longitud de la diagonal obtenida

La medición de la Profundidad de Dureza de Huella (CHD) se utiliza con frecuencia para evaluar la profundidad de la dureza en aceros de superficie endurecida mediante una serie de impresiones de dureza, que se realiza desde el borde de la muestra seccionada hasta el centro. Una forma más sencilla de expresar este cálculo es con la dureza regida por la norma ASTM E92-82, se interpreta una diagonal formada por el indentador utilizado en el ensayo. A pesar de que existen tablas para la conversión de esta diagonal, también existe una ecuación que permite conocer esta dureza Vickers, mediante la Ec. [7]:

$$HV = \frac{2P \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad [3.6]$$

donde:

- P es la carga aplicada [kg]
- d es la longitud de la diagonal promedio del cuadrado de la impresión [mm]
- α es el ángulo de la cara de diamante, calculado en 136° entre caras opuestas

Para la obtención de la dureza Vickers se utilizó el equipo para muestras microestructurales marca Leitz del laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el cual se muestra en la Figura [3.7].

11. Struers. (2023,11,06). Ensayo de dureza Vickers (HV). <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Vickers>



Figura [3.7] Equipo para la obtención de dureza Vickers.

Este equipo cuenta con tres estaciones de trabajo, siendo estas:

- Un enfoque de la muestra mediante un aumento 10x
- Aplicación de la carga con un indentador de punta de diamante, con carga extra de 100 P (unidades de fuerza)
- Una zona de análisis para la medición de la diagonal de 50 x

Las estaciones de este equipo se muestran en la Figura [3.8]. y Figura [3.9].



Figura [3.8] Estaciones de trabajo y ejemplificación de la muestra.



Figura [3.9] Aumento disponible del equipo para la toma de muestra.

Algunas consideraciones extras para una correcta observación microestructural son:

- La superficie tiene que estar completamente lijada y pulidas hasta acabado espejo.
- La superficie debe de estar lo más perpendicular a la punta del indentador

3.4 Balance de carga en una fundición

En la industria siderúrgica se han usado con éxito los balances de materia y energía en los procesos de reducción directa en alto horno, siendo estos utilizados en la elaboración de acero, en el procesamiento de minerales y residuos siderúrgicos, etc., sirviendo de herramienta para evaluar la factibilidad técnico-económica de dichos procesos.

Una forma de obtener dichos balances es a partir de la caracterización química de las materias primas y los requerimientos tecnológicos y energéticos del proceso.

Antes de hacer el cálculo de la carga, se debe de determinar la cantidad de metal necesario para una producción dada y conocer el tiempo necesario, lo que lleva al cálculo de las pérdidas durante el proceso. Considerando algunas comprobaciones prácticas se pueden tomar a modo de recomendación las siguientes pérdidas¹²:

- Por rechazo entre 3 al 5 % de la cantidad de metal útil
- Por oxidación, rebabas, irreparables (por causa de la escoria, o sea, el metal que sale junto con la escoria, el metal que se derrama en el momento del vertido, etc.).
Se toma el 6% de la cantidad de metal útil
- Por sistema de alimentación y mazarotas
- Para el acero 40 a 60 % (a veces más o menos, todo depende del tipo de producción, de las dimensiones de las piezas, números de piezas en el molde y dimensiones de las cajas de moldeo, esto es válido para todas las aleaciones)
- Para el hierro maleable, nodular es de 35 a 40 %
- Para hierro gris entre 21 a 30 %
- Para aleaciones no ferrosas: con mazarotas es de 30 a 40 %; sin mazarotas es de 21 a 28 %.

El desarrollo del balance de carga consiste en:

- Calcular la cantidad de metal útil que hay en una caja de moldeo, el peso del metal de las piezas libres del sistema de alimentación y mazarotas.
- Calcular el peso de todas las pérdidas posibles.
- Cantidad de molde que se utilizarán
- Cantidad de metal total por colada
- Cantidad de coladas, turnos y días de trabajo

Después de realizar el balance de metal requerido, se calcula la carga por cualquiera de los métodos conocidos

3.4.1 Balance del metal

El balance del metal se determina considerando la cantidad en peso (kilogramos) del metal a utilizar en una producción determinada. Para ello debe considerarse:

- El tipo de horno, la productividad y la capacidad de este.
- La cantidad de piezas en un molde y la cantidad de moldes preparados
- El tipo de aleación que se obtendrá y el peso de cada pieza
- El método de fundición que se utilizará

Se sabe que las fundiciones utilizadas (son centrífuga y por molde de arena) ya cuentan con parámetros establecidos¹² que permiten conocer las características del molde y del sistema de colada utilizado.

Sin considerar el peso del metal de las piezas libres y partiendo del análisis proporcionado por el manual “Cálculo de fusión en la metalurgia”, se tiene:

- Una producción de 10,000 piezas de 10 [kg] cada una
- Cada molde tiene una capacidad de 10 piezas
- Las piezas son de fundición nodular
- El horno es de arco eléctrico con revestimiento básico, capacidad de 6 toneladas, 2 turnos de trabajo y 2 coladas por turno

En el balance debe considerarse:

1. **La cantidad de metal útil que hay en una caja de moldeo**, que es el peso del metal en las piezas libres del sistema de alimentación y mazarotas.
Si se saben que el peso de cada pieza es de 10 [kg] y cada caja de moldeo tiene 10 [pzas.], se tiene el metal útil:

$$Metal\ útil = 10 * 10 = 100[kg]$$

2. **El peso de las distintas pérdidas sería:**

- a. Por rechazo: representan el 3% del metal útil. Se obtendrá:

$$Xp = \frac{100 * 3}{100} = 3 [kg]$$

- b. Por oxidación, rebabas, irreparables, etc: representan el 6% del metal útil.
Se tiene:

$$Xo = \frac{100 * 6}{100} = 6 [kg]$$

- c. Por el sistema de alimentación y mazarotas: al ser varias piezas en el molde, de acero FA35 y mazarotas, se obtendrá un valor de pérdidas cerrado del 40%, obteniendo:

$$Xsa = \frac{100 * 40}{100} = 40 [kg]$$

3. **El balance del metal total** es la sumatoria de todas las variables anteriores, considerando 10 piezas sería:

$$BM = Metal\ útil + Xp + Xo + Xsa = 100 + 3 + 6 + 40$$

$$BM = 149 [kg]$$

4. **Cantidad de moldes a utilizar**, si son 10,000 piezas, cada caja tiene una capacidad de 10 piezas, por lo tanto, el número de moldes son:

$$Moldes = \frac{10000}{10} = 1000\ moldes$$

5. **La cantidad de metal total**, con la relación del balance del metal total, se tendría:

$$Mtotal = 1000 * 149[kg] = 149,000 [kg] = 149 [t]$$

6. **Cantidad de coladas, turnos y días:** este varía dependiendo de los ciclos de trabajo disponible en la planta.

3.4.2 Método de solución de ecuaciones lineales para la fabricación de un hierro colado en un horno de arco eléctrico con revestimiento básico.

Este método considera el valor medio de la composición química de cada elemento utilizado en la carga, siendo el retorno, la chatarra de hierro y el arrabio los principales materiales a considerar. Este método considera:

- El porcentaje de rechazo, la cantidad de mazarotas, el sistema de alimentación y otros factores que influyen en la cantidad de retorno.
- Las ferroaleaciones, estas se emplean para la desoxidación y ajuste en la composición química, tal es el caso del ferrosilicio y ferromanganeso
- Las pérdidas (oxidación) durante la fusión de la carga metálica, así como la disolución de las aleaciones y la desoxidación característica de las fundiciones en el horno de arco con revestimiento básico

3.4.3 Fórmulas

1. Cantidad de retorno en la carga

Esta depende del coeficiente de obtención de piezas buenas, se utiliza la Ec. [3.7]:

$$B = 100 - Kps \quad [3.7]$$

donde:

- Kps es el coeficiente de piezas buenas [%]

2. Contenido del elemento de aleación introducido en la carga

Se determina mediante la Ec. [3.8]:

$$Cal = Cret \left(\frac{B}{100} \right) \quad [3.8]$$

donde:

- Cret es el contenido del elemento en el retorno [%]

3. Contenido del elemento de aleación introducido por la carga (retorno) en el metal donde

Se consideran las pérdidas Mediante la Ec. [3.9]:

$$C_{ap} = C_{al} \left(\frac{100 - Y}{100} \right) \quad [3.9]$$

donde:

- Y es la pérdida del elemento de aleación en el proceso de fusión [%]

4. Consumo de la ferroaleación

Se pueden considerar las pérdidas, mediante la Ec. [3.10]:

$$F_{err} = \frac{(C_n - C_c)10000}{C_{al}(100 - Y)} \quad [3.10]$$

donde:

- Ferr es la cantidad del elemento que se introduce (ligadura o ferroaleación) en la fundición [kg]
- Cn es la concentración del elemento necesaria para obtener la composición de la fundición [%]
- Cc es la concentración del elemento que aporta la carga [%]
- Y son las pérdidas por oxidación del elemento de aleación durante la asimilación de la adición [%]
- Cal es la concentración del elemento de aleación en la ligadura (FeMn, FeSi, etc.) [%]

O bien se puede utilizar la Ec. [3.11]:

$$F_{err} = \frac{(100 A_c (C_n - C_c))}{C_{al}(100 - Y)} \quad [3.11]$$

donde:

- A_c es la cantidad de la aleación en el cual se introduce el elemento [kg]

5. Contenido de carbono en la fundición

Se determina por la diferencia entre su contenido en el metal preparado y la cantidad de carbono introducido mediante aleaciones, dada por la Ec. [3.12]:

$$C = C_o - \Sigma C_{cal} \left(\frac{G_{ei}}{100} \right) \quad [3.12]$$

donde:

- C_o es el contenido de carbono que se exige en el metal [%]
- C_{cal} es el contenido de carbono en la ligadura (ferroaleación) agregada a la fundición después de su desoxidación [%]
- G_{ei} es la cantidad de adición (ferroaleación) agregada al acero después de la desoxidación

6. Contenido de carbono en la carga

Tiene que ser mayor que la de fundición y se efectúa en la ebullición. Esta cantidad está determinada por la Ec. [3.13]:

$$C_c = \left(\frac{C * Y_c}{100} \right) + V_k T_k + C_{acero} \quad [3.13]$$

donde:

- Y_c es la pérdida de carbono durante la fusión

- V_k es la velocidad de oxidación del carbono durante el periodo de oxidación (0.004-0.006 %C/min)
- T_k es la duración del periodo de ebullición (15-20 min)

7. Contenido de chatarra de hierro y fundición

Dada por la Ec. [3.14]:

$$B + Ch + A + \Sigma Z = m$$

$$CB * \frac{B}{100} + Cch * \frac{Ch}{100} + CF * \frac{A}{100} + \Sigma Cc_{acero} * \frac{Gei}{100} = Cc \quad [3.14]$$

donde:

- m es la cantidad de metal a utilizar en el proceso
- B , Ch , A es el contenido de retorno, chatarra de acero y arrabio para la carga de fundición [kg]
- Z es el contenido de componentes de aleación que se añaden en la carga o al metal líquido antes de realizar la desoxidación [kg]
- CB , Cch , CFd , Cc_{acero} es el contenido de carbono en los elementos de aleación correspondientes de la carga [%]

8. Peso del componente de la carga (en el horno)

Se establece mediante la Ec. [3.15]:

$$Q_k = \frac{Qx}{100} \quad [3.15]$$

donde:

- Q es la capacidad del horno [kg]
- x es el contenido del componente en la carga [%]

9. Contenido de elementos que no participan en la carga

Se establece mediante la Ec. [3.16]:

$$C_{no\ al\ c} = \sum C_k \left(\frac{x}{100} \right) \quad [3.16]$$

donde:

- C_k es el contenido de los elementos de aleación que no se adicionan en el componente de la carga [kg]

10. Contenido promedio total de elementos de aleación que no se integran en el metal líquido

Se establece mediante la Ec. [3.17]:

$$C_{no\ al\ t} = C_{no\ al\ c} \left(\frac{(100 - Y)}{100} \right) \quad [3.17]$$

donde:

- Y es la pérdida de elementos de aleación [%]

11. Consumo de desoxidantes

Es el contenido máximo permisible de elementos desoxidantes en el metal preparado, mediante la Ec. [3.18]:

$$Des = \frac{(C_o - C_1 - C_2)10000}{C_{des}(100 - Y_{des})} \quad [3.18]$$

donde:

- C_o es el contenido del elemento desoxidante en el metal de la pieza
- C_1 es el contenido del elemento desoxidante en el acero previo a la desoxidación
- C_2 es la cantidad del elemento desoxidante aportando por otras adiciones al acero después de la desoxidación
- C_{des} es el porcentaje de composición química utilizada en la ferroaleación
- Y_{des} es la pérdida del elemento desoxidante en el proceso de desoxidación

12. Contenido de fósforo y azufre

Se encuentran en el metal, dada por la Ec. [3.19]:

$$P_m(S_m) = P(s) + P'(s)' \quad [3.19]$$

donde:

- $P_s(S_m)$ es la cantidad de fósforo después de la desfosforación o de azufre (desulfuración)
- $P's'(S'm')$ es la cantidad de P(s) introducido en el acero por los componentes en el periodo de reducción

13. Formación de escorias dentro del proceso de la fundición de hierro nodular.

Se determina sobre el peso total de la carga. Para la obtención de la escoria durante la fusión del acero en hornos de arco eléctrico con revestimiento básico se consume de 4 a 7 % de caliza (incluso 2-3 en la solera del horno) y 0,15-0,25% de espatoflúor.

El consumo de mineral de hierro para la oxidación del exceso de carbono en el proceso de ebullición del baño, cuando existe un incremento del contenido de C en el hierro fundido desde 0,15 a 0,55 % se aumenta de 3 a 7 %. Se utiliza la Ec. [16] para conocer el consumo.

3.4.4 Composición química de la fundición nodular

La fundición nodular está implicada en el cálculo del balance de carga. A diferencia de la fundición gris (de arena) la fundición nodular tiene una estructura de colada que contiene partículas de grafito en forma de pequeños nódulos esferoidales en una matriz metálica dúctil¹³. De este modo, este tipo de fundición tiene una resistencia mayor que una fundición gris y un considerable grado de ductilidad, estas propiedades y otras tantas pueden mejorarse con la utilización de tratamientos térmicos. Se tiene un intervalo específico de la composición química de acuerdo con el porcentaje peso en la fundición (Tabla [3.1]), siendo estas:

Tabla [3.1]. Fundición nodular

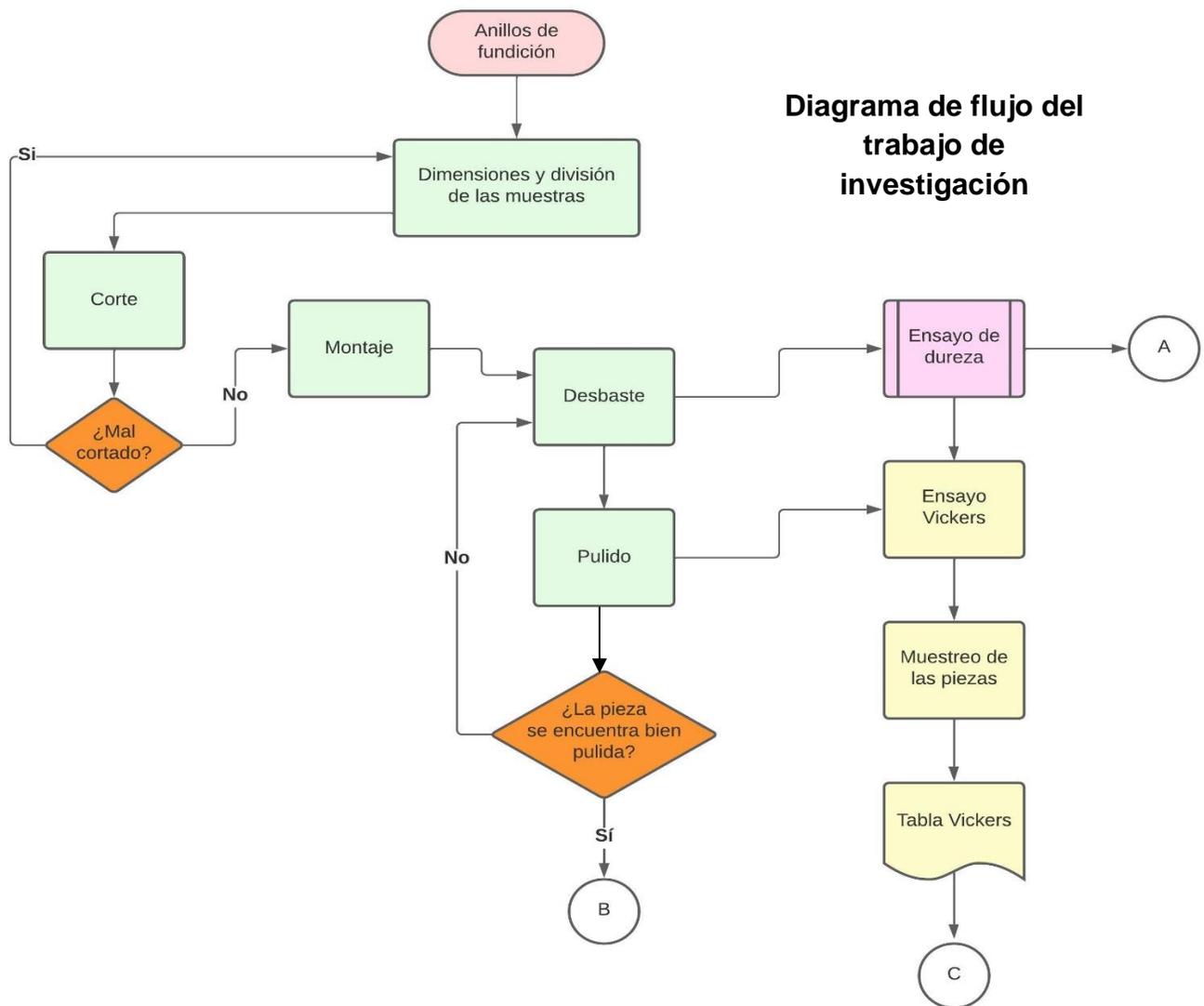
Contenido de los elementos [%]										
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
3.6-	0.15-	1.8-	0.03-	0.05-	0.01-	0.15-	0.03	0.002	0.005-	0.03-
3.8	1	2.8	0.07	0.20	0.1	1			0.2	0.06

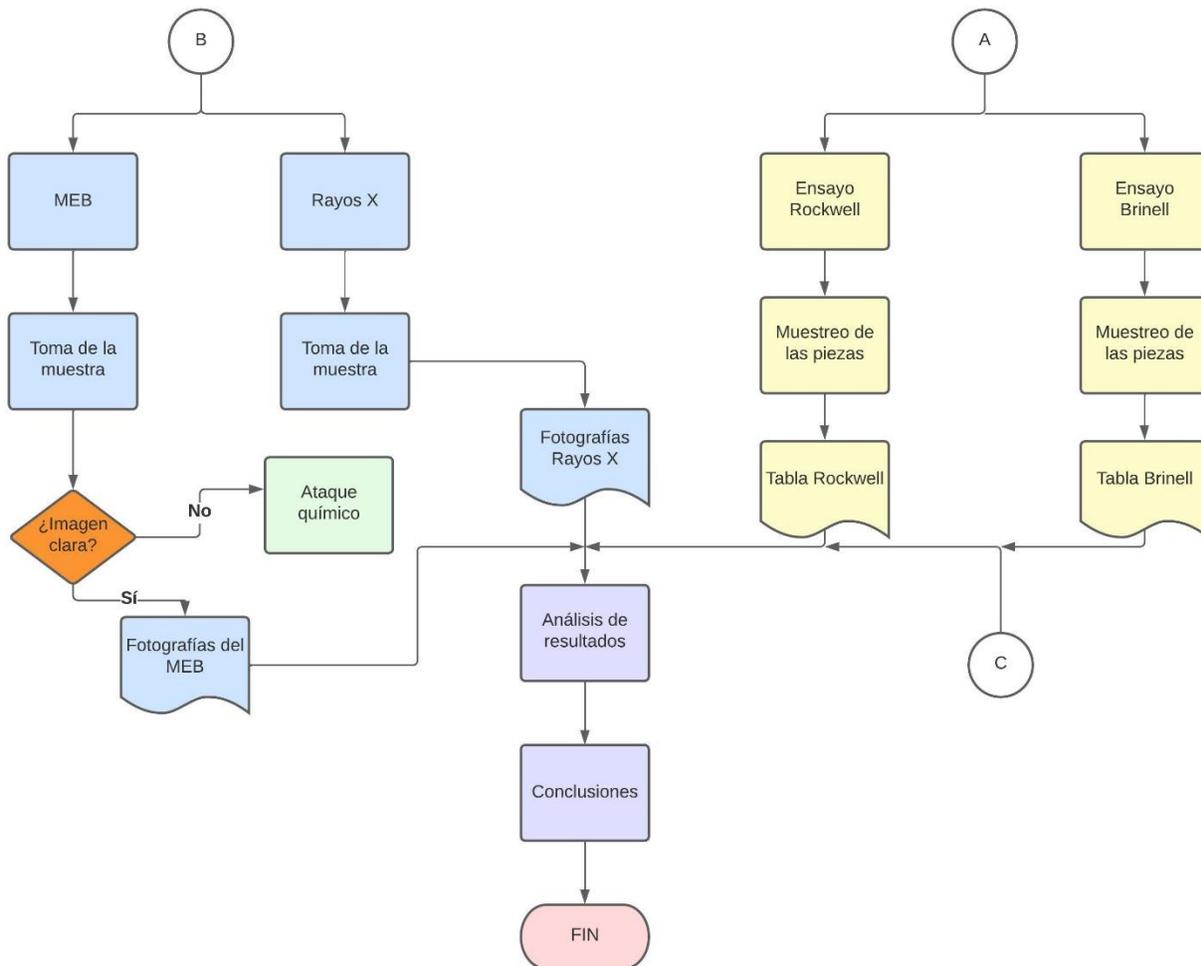
Fuente¹³

Las principales fundiciones fabricadas se rigen por la norma ASTM A536 de acuerdo con sus propiedades mecánicas.

4. Desarrollo experimental

El desarrollo experimental desarrollado en este trabajo de investigación consiste en realizar una caracterización metalográfica en ambos anillos, esto con el fin de tener preparadas las muestras necesarias para poder realizar tanto las muestras en microscopio como los ensayos de dureza. Dicho procedimiento se puede ver en el siguiente diagrama de flujo:





4.1 Caracterización metalográfica de las muestras

Una de las principales características de la observación microestructural de los materiales es el de observar determinados comportamientos presentes en la muestra obtenida, ya sea el tamaño de grano, límite del grano, formación de precipitados o inclusiones. Estas características se logran visualizar siempre y cuando se realice una preparación adecuada para la obtención de resultados con una gran confiabilidad.

Mediante el análisis metalográfico se evaluarán anillos obtenidos por el proceso de fundición en arena y por fundición centrífuga, de manera que se pueda establecer los microconstituyentes, impurezas o defectos microestructurales que caractericen cada proceso de manufactura, así como su contribución en las propiedades mecánicas.

4.2 Metodología para la preparación de las muestras

Considerando los casos de estudio, la preparación de las muestras para realizar la caracterización metalográfica de las piezas por fundición consta de los siguientes pasos:

4.2.1 Determinación de las muestras

Se tienen dos anillos, uno de ellos realizado mediante fundición en arena (fundición gris) y el otro realizado mediante la fundición centrífuga (fundición nodular) como se muestra en la Figura [4.1] y Figura [4.2]



Figura [4.1] Anillo sin costura de fundición de arena.



Figura [4.2] Anillo sin costura de fundición centrífuga horizontal.

Las dimensiones registradas para el anillo de fundición de arena fueron de 20.2 [cm] de diámetro interno y 22.1 [cm] de diámetro externo, mientras que para el anillo de fundición centrífuga se registró 22 [cm] de diámetro interno con 24 [cm] de diámetro externo. El grosor de los anillos es de 1 [cm], se puede apreciar en la Figura [4.3] del anillo de arena y la Figura [4.4] del anillo de costura.



Figura [4.3] Grosor del anillo de fundición de arena.



Figura [4.4] Grosor del anillo de fundición centrífuga horizontal.

Para cortar las muestras, se dividió cada anillo en un ángulo de 120° donde se realizó una marca para posteriormente realizar el maquinado, como se muestra en la Figura [4.5] y Figura [4.6]



Figura [4.5] Marcaje para el corte del anillo de fundición de arena a 120° .



Figura [4.6] Marcaje para el corte del anillo de fundición centrífuga horizontal a 120° .

4.2.2 Corte

El corte de los anillos se realizó mediante la máquina de corte de hoja rotativa QG-5A (ver Figura [4.7]), el disco utilizado pertenece a la marca Buehler para cortar aceros, la cual se muestra en la Figura [4.8].



Figura [4.7] Máquina a utilizar para los cortes de las probetas.



Figura [4.8] Disco para cortar acero Buehler 10-4212.

La instalación del equipo consistió en encontrar el ángulo adecuado para colocar los anillos, de esta manera se realizaron los cortes dentro de la máquina, como se muestra en la Figura [4.9]

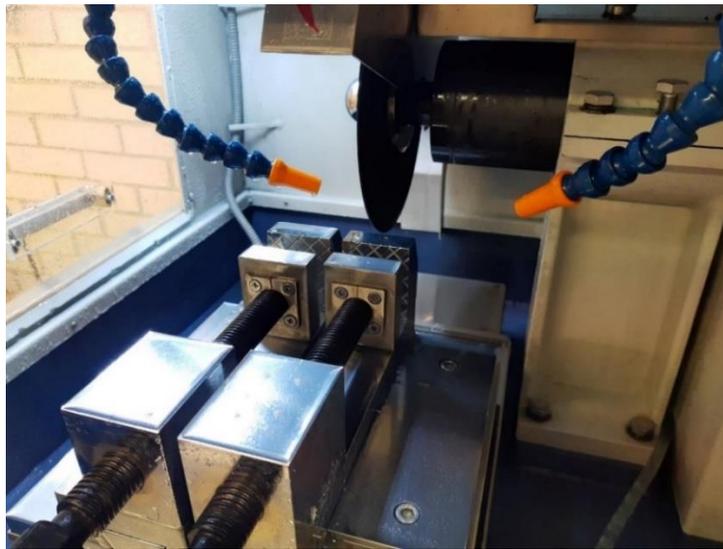


Figura [4.9] Montaje de los anillos en la máquina de corte.

Se realizaron en los anillos tres cortes (donde se había realizado el marcaje de 120°) para posteriormente volver a cortar piezas más pequeñas de 1 [in] y 1 [cm], y se cortaron tres de cada una, tal como lo muestra la Figura [4.10].



Figura [4.10] Cortes de los anillos por ángulos. Cada uno contará con 3 probetas más pequeñas de 1[in] y de 1[cm] por cada corte.

Durante el corte del anillo de arena, se tuvieron problemas al momento de realizar la operación, siendo estas:

- Un corte mal direccionado a pesar de tener una buena sujeción en la máquina. Esto provocó defectos en el corte de las probetas de los distintos tamaños, como se muestra en la Figura [4.11]
- Ruptura del disco de corte de la máquina durante una de las operaciones del material. Este suceso ocurrió por una mala aplicación de la carga de corte, un mal posicionamiento de la pieza o una mala cantidad del refrigerante utilizado.



Figura [4.11] Defectos ocurridos en las muestras durante el corte del anillo de fundición de arena.

Se deduce la falla del disco debido a la mala posición del anillo durante cada corte y a una velocidad de aplicación de la carga muy apresurada durante el proceso, ya que después de cambiar estos valores, los corte pudieron continuar, aunque se sigue presentando el mismo defecto de corte direccional mostrado en la Figura [4.11]

No hubo problemas o complicaciones al momento de cortar el anillo de fundición centrífuga, aunque se destaca un sobrecalentamiento en el disco de corte utilizado, situación que se solucionó dejando enfriar la máquina y un mayor uso de refrigerante.

Una vez acabado el corte, tendremos en total 36 cortes, 18 de tamaño de 1 [in] y 18 de tamaño de 0.4 [in] aproximadamente, esto nos permite tener material adicional para analizar y demostrar que las características del anillo se mantienen uniforme, de ahí que se haya hecho el corte principal cada 120°.

4.2.3 Montaje de la probeta

El montaje ayudó a tener una mayor protección en los bordes de las muestras utilizadas para su posterior observación, ya que se debe mantener la integridad de la base donde se realiza el análisis del tamaño de grano de las demás características microestructurales.

Para las muestras utilizadas, debido a su tamaño, se realizó un molde de resina para permitir la manipulación de estas, además de facilitar su observación. Para la fabricación del molde, se utilizaron 3 materiales básicos:

- Resina Poliéster preparada.
- Catalizador (K-2000).
- Moldes de polipropileno.

Esta resina de poliéster o de fibra de vidrio debe manejarse con medidas de seguridad adecuadas, debido a que es inflamable y tóxica, ya que cuenta con los siguientes datos de seguridad del Sistema Globalmente Armonizado¹⁴:

- H226 Líquido y vapor inflamables.
- H315 Provoca irritación en la piel.
- H319 Provoca irritación ocular grave.
- H332 Nocivo si se inhala.
- H335 Pude irritar las vías respiratorias.
- H372 Provoca daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas en cada inhalación.

La resina requiere el uso del catalizador, el cual debe de disolverse en ella (Figura [4.12]), permitiendo la manipulación más segura al rellenar los moldes. De acuerdo con el fabricante, se utilizan 100 [gr] de resina por 40 gotas de catalizador¹⁴. En este apartado, se trabajó al aire libre, guantes y cubrebocas para minimizar la exposición nociva de esta mezcla.



Figura [4.12] Catalizador (K-2000) usado en la resina poliéster.

Para poder verter la mezcla, se utilizaron moldes de polietileno de dos formas (ovalada y hexagonal), como se muestra en la Figura [4.13]. Esto para poder obtener una mayor área de dispersión y manipulación de las muestras.



Figura [4.13] Moldes utilizados, de forma ovalada y hexagonal.

Se utilizaron dos muestras por cada 120° de ambos anillos utilizados, es decir, una muestra de 1 [cm] y de 1 [in] para cada anillo, dando un total de 6 muestras del anillo por fundición con molde de arena y 6 muestras del anillo obtenidos por fundición centrífuga, como se muestran en la Figura [4.14]. y Figura [4.15].

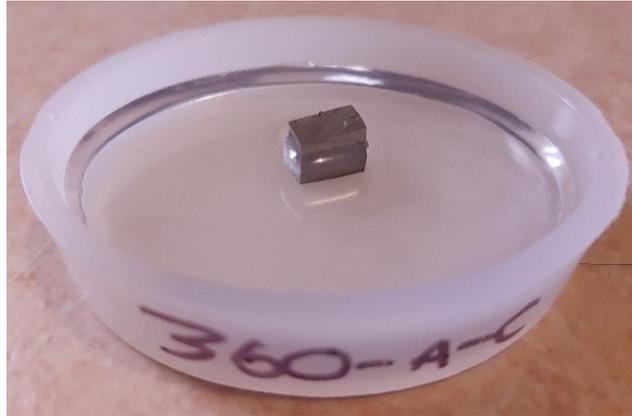


Figura [4.14] Muestra del anillo obtenido por fundición de arena, dimensión de 0.4 [in].



Figura [4.15] Muestra del anillo obtenido por fundición centrífuga horizontal, dimensión de 1 [in].

Las muestras se dejan solidificar por un periodo de 24 horas, obteniendo una superficie suficientemente lisa, evitando la ruptura de la muestra provocada por el desbaste. Estos resultados se observan en la Figura [4.16].

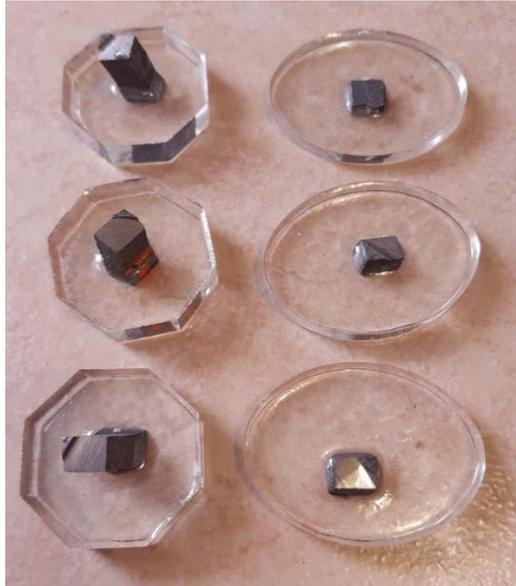


Figura [4.16] Muestras montadas del anillo de arena. Estas mismas muestras se obtuvieron para el anillo de fundición centrífuga.

4.2.4 Lijado / Desbaste

De acuerdo con el Manual Metalográfico (Reyna, 2021) se realiza un desbaste fino de las probetas con la ayuda de lijas de agua a diferente tamaño de partículas, ordenadas en la Figura [4.17].



Figura [4.17] Lijas de agua utilizadas para el desbaste y pulido de las probetas.

Este orden de grano es, de izquierda a derecha, tal como se muestra en la Tabla [4.1]:

Tabla [4.1]. Numero de lija vs tamaño de partícula en micrones

Número de lija	Tamaño de partícula (micrones)
120	115
240	52
360	28
400	23
600	15

Fuente ¹⁵

Se realizó un lavadero casero (ver Figura [4.18]) para realizar el desbaste de las probetas mediante el uso de las lijas de agua. El procedimiento descrito en el manual indica una aplicación de fuerza constante, a esto se le administra agua con cierta regularidad para desbastar sin inconvenientes. El tiempo dependía de la pieza a tratar o hasta que se obtuviese rayas nuevas perpendiculares en la pieza, es importante dar un giro de 90° entre cada nuevo nivel de lija para obtener un mejor resultado.

El desbaste de la probeta se da por terminado cuando la cara quede libre de planos y con rayas finas. El desbaste fino se realizó usando la lija No. 600, buscando obtener las mismas propiedades anteriormente descritas.



Figura [4.18] Estación de lijado.

A continuación, se indican las observaciones realizadas durante el proceso de desbaste:

15. ASA LIJAS (2013,11,06) GUIA DE LIJADO. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://4552735.app.netsuite.com/core/media/media.nl?id=33445&c=4552735&h=5dc6df648f51a49bc731&_xt=.pdf

- En relación con el tiempo utilizado para cada desbaste, variaba en función del material de la muestra, ya que las probetas obtenidas por fundición en molde de arena requerían más tiempo debido a la rugosidad que estas presentaban, complicando el proceso, mientras que las obtenidas por centrifugación no presentaban esta dificultad.
- Algunas zonas del lijado (en especial las del molde de arena), no desbastaban correctamente, debido a la forma curvada de las muestras, así como del llenado insuficiente del molde de resina, por lo que el proceso de desbaste se realizaba varias veces.

Una vez que se alcanzó el desbaste correcto con la lija No. 600, se realiza el siguiente paso.

4.2.5 Pulido

Esta etapa tiene como objetivo eliminar cualquier pequeña deformación que no se pudo quitar durante la etapa del desbaste, lo que permite tener un solo plano de la muestra para su análisis. El método más utilizado es el pulido mecánico, ya que se tiene la ayuda de un disco giratorio cubierto de un paño impregnado con una suspensión de alúmina (Al_2O_3) que ayuda a tener este efecto en la muestra, como se muestra en la Figura [4.19]



Figura [4.19] Máquina de lijado mecánico. Se utiliza el disco derecho para la lúmina gris y el disco izquierdo para la lúmina blanca.

Esta suspensión se trata de dos polvos abrasivos con diferentes diámetros de grano, siendo alúmina gris ($3\mu m$) y alúmina blanca ($1\mu m$) los disponibles en el laboratorio. Como muestra la Figura [4.20], estas suspensiones se agregan a los discos giratorios gradualmente para cada muestra hasta obtener una superficie lo suficientemente lisa y con la menor cantidad de rayaduras o imperfecciones, este proceso se lleva a cabo hasta que dicha superficie parezca un espejo.



Figura [4.20] Picetas de alumina gris y blanca.

El proceso de pulido de se pudo realizar de manera más sencilla en las probetas de centrifugación, en este caso, la reducción del tiempo y la calidad superficial fueron superiores respecto a las muestras del proceso de fundición de arena.

4.2.6 Ataque

Al tratarse de una fundición con porcentaje alto de carbono, se propone el uso de una solución de Nital para realizar el ataque químico. Este consiste en una composición de aproximadamente 97% de Etanol y un 3% es de Ácido Nítrico, por lo que se tiene que manejar con cuidado.

Inicialmente, al analizar las muestras mediante el microscopio metalográfico no requirieron un ataque químico, sin embargo, fueron atacadas posteriormente para observar sus

características microestructurales, para ello fue necesario una exposición de 10 a 20 segundos de Nital 3%.

4.2.7 Observación microestructural

En este apartado, se realizó el procedimiento adecuado para el correcto funcionamiento de los equipos de microscopía de barrido y de difracción de rayos X.

Con el apoyo de los técnicos y especialistas del Laboratorio de Microscopía Electrónica de la DIMEL y del Laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Politécnica del Valle de México, se analizaron las muestras de fundición de arena y de fundición centrífuga. Se tomaron las muestras de 1 [in] a 120 del ángulo de corte para su análisis.

4.2.8 Microscopio electrónico de barrido

Para realiza el análisis metalográfico se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca PHILIPS modelo XL30 S-FEG, el cual tiene una interfaz conectada a una computadora, que proporcionó las imágenes correspondientes de las muestras analizadas, tal como se muestra en la Figura [4.21].

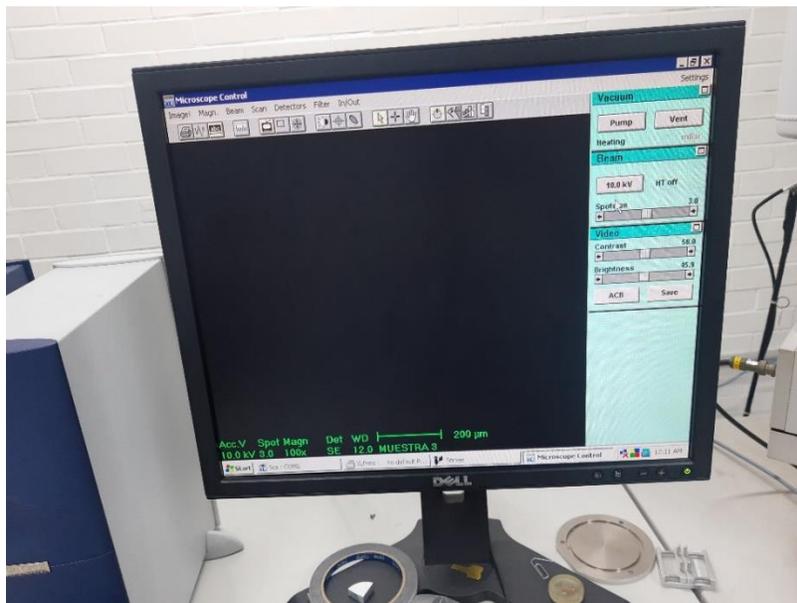


Figura [4.21] Interfaz del microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL30 S-FEG

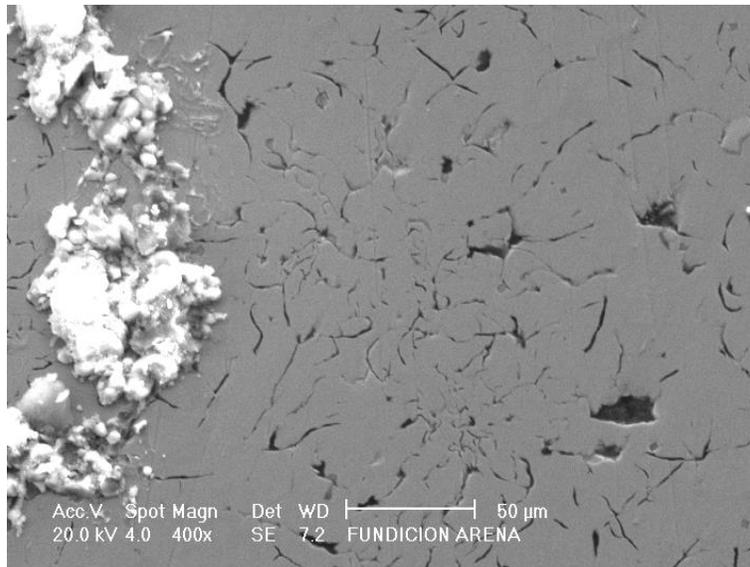
Para su uso debe considerarse:

- Una espera de 20 minutos para que el equipo pueda utilizarse correctamente.
- Debe utilizarse la técnica de electrones retrodispersados para el análisis de ambas muestras.
- El uso de un voltaje de 20 [kV], esto porque se utilizan fundiciones de hierro.
- Debe considerarse prescindir de un ataque químico para la fundición de arena, ya que los resultados del pulido no tienen problemas de visualización. En el caso de la fundición centrífuga, se realizaron ciertas pruebas en el microscopio para ver si se tenía un cambio una vez realizado el ataque, pero no se observó una diferencia notoria como para reportar las imágenes.

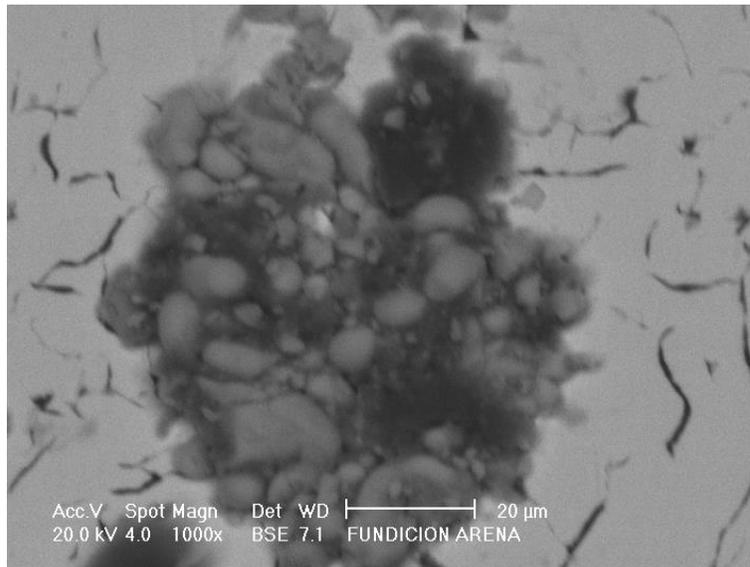
5. Análisis de resultados

5.1 Metalografía

En la Micrografía [1] se observa la formación de grafito laminar en una matriz ferrítica (Zona gris). La hojuela que se presenta es del tipo A, de acuerdo con la norma ASTM A 247, que recomienda en aplicaciones por su tamaño “pequeño” que aumenta la resistencia y la ductilidad del hierro, ya que no interrumpe la continuidad del material. También se observa una zona de óxidos presentes en la superficie (zona blanca), que se muestra a detalle en la Micrografía [2].

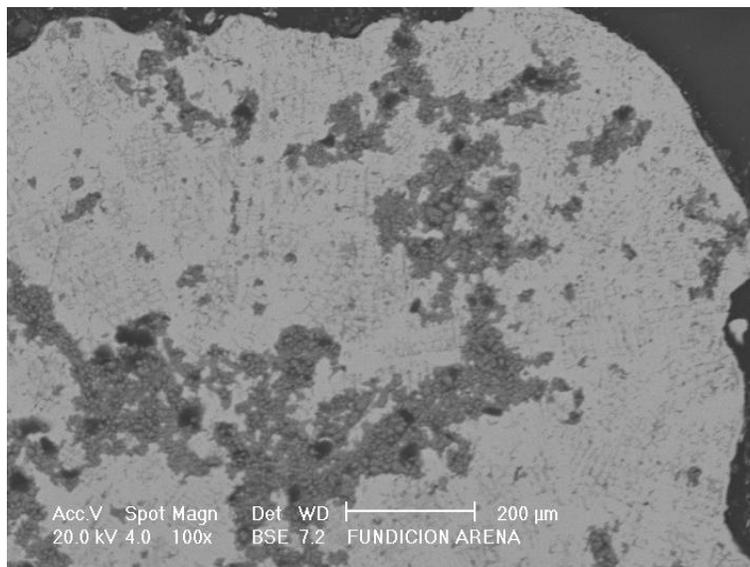


Micrografía [1]. Acercamiento a 400x. Escala de referencia de 50 μm



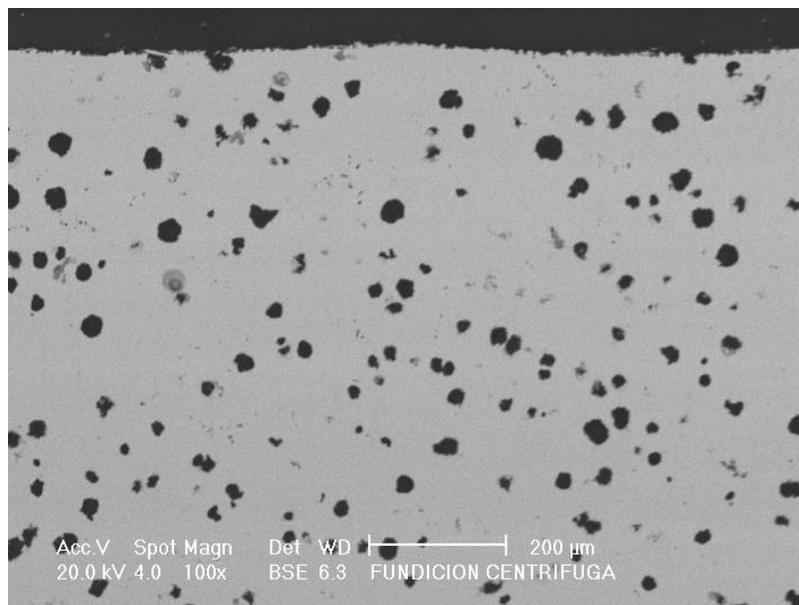
Micrografía [2]. Acercamiento a 1000x. Escala de referencia de 20 μm

En la Micrografía [3] se observa a 100 aumentos la manera en que solidificó el hierro gris, que fue en ramificaciones de dendritas primarias y secundarias, a su vez se observan la dispersión de óxidos sobre la superficie de la fundición. Es importante señalar que es posible ver la rugosidad de la muestra, la cual no es uniforme, como es el caso de la que se muestra en la fundición de hierro nodular por centrifugación (ver la Figura [2.1]).

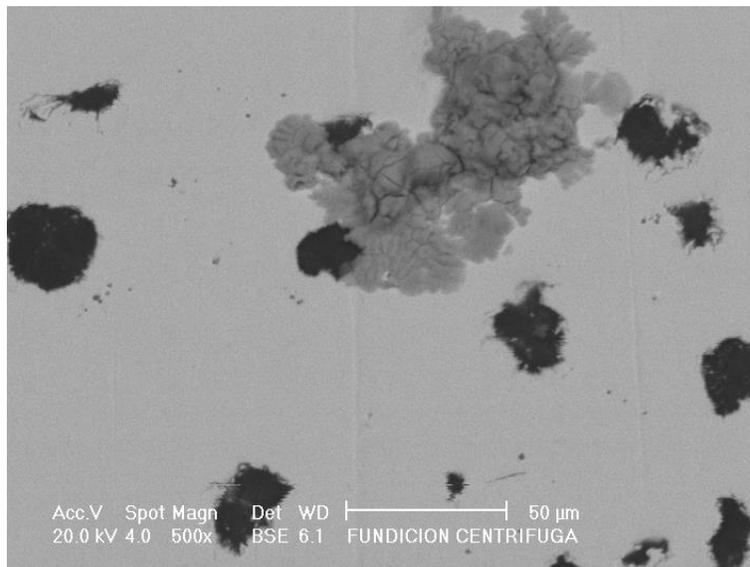


Micrografía [3]. Acercamiento a 100x. Escala de referencia de 200 μm

En la Micrografía [4] se observa a 100 aumentos la fundición de hierro nodular por el proceso de centrifugación, en ella se visualiza los nódulos de carbono característico de la fundición, con un tamaño aproximado entre 20 y 30 μm . Además, se aprecia una dispersión homogénea de los nódulos en la aleación, por lo que la centrifugación del molde no afecta la ubicación de estos. Con relación a la rugosidad del anillo, esta es continua a lo largo de la muestra por lo que no es necesario realizar una rectificación después de la fundición, como la que necesitaría los anillos obtenidos por molde de arena. En la Micrografía [5] se observa a 500 aumentos y una escala de referencia de 50 μm , la formación de óxidos (perjudicial ya que empieza a c) sobre los nódulos de carbono en la superficie del hierro nodular, sin embargo, es una cantidad menor en comparación de la fundición gris de granos nodulares cerca de la superficie.



Micrografía [4]. Acercamiento a 100x. Escala de referencia de 200 μm



Micrografía [5]. Acercamiento a 500x. Escala de referencia de 50 μm

5.2 Rayos X

Hierro nodular y gris

En las superficies de las piezas de hierro nodular y gris se obtuvieron los patrones XRD en modo micro-difracción θ - 2θ , a una longitud de onda $\lambda=1.5406$, mediante el uso de un rango de escaneo de 30° a 80° , 35kV, 35mA, velocidad de escaneo: 2.03178 e incrementos de 0.0203178. Para este análisis se utilizó un difractómetro de rayos X Bruker D8-Advance (Fig. [3.3]). Los difractogramas obtenidos se muestran en el Difractograma [1] y [2].

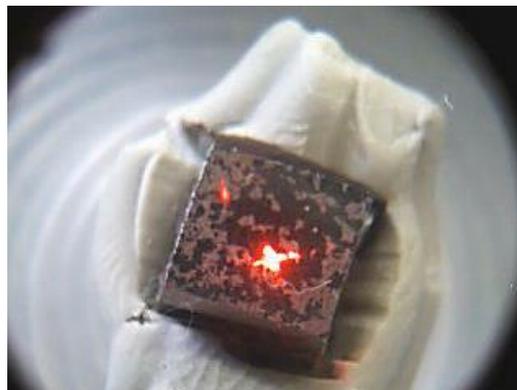
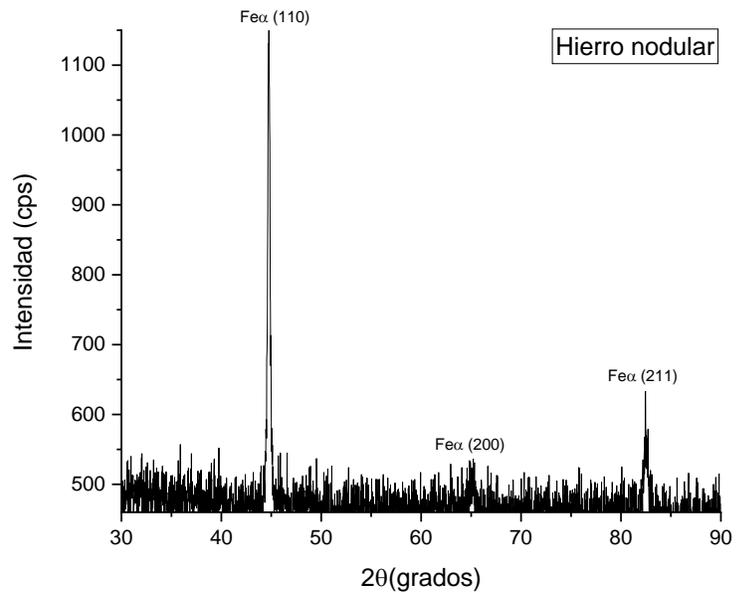


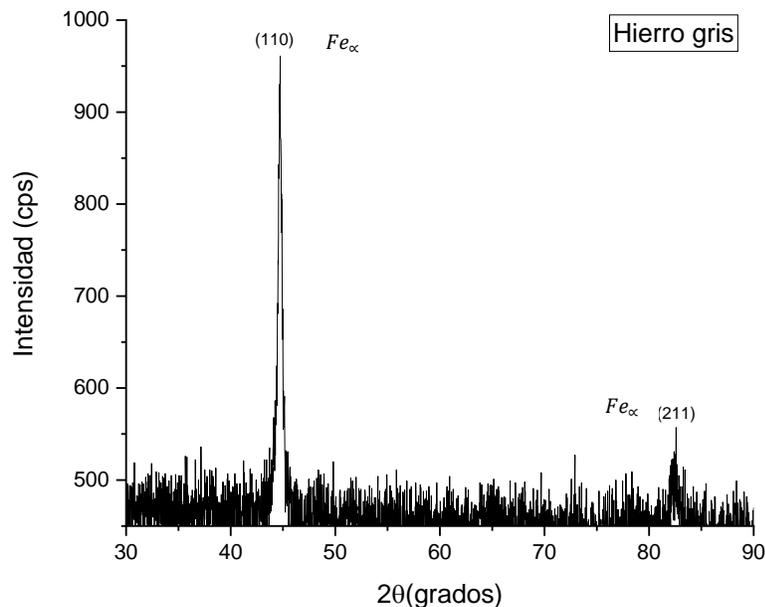
Figura [5.1]. Zona en la que se realizó el ensayo de rayos X de la pieza de hierro nodular.



Difractograma [1]. Patrón de difracción de rayos X sobre la superficie de una pieza de hierro nodular



Figura [5.2]. Zona en la que se realizó el ensayo de rayos X de la pieza de hierro gris.



Difractograma [2]. Patrón de difracción de rayos X sobre la superficie de una pieza de hierro gris

Los difractogramas mostrados de las piezas evaluadas, establecen que corresponde a fundiciones de hierro alfa (Fe_α), sin embargo, el proceso de manufactura (fundición por centrifugación) hace que cambie la textura de la pieza y se puede observar en el difractograma cuando aparece el plano (200). En el plano (110) del Fe_α presenta mayor intensidad, esto indica que la estructura cristalina esta menos deformada que en el hierro gris, el mismo comportamiento se refleja en el plano (211), esto indica que el hierro nodular presenta mejores propiedades mecánicas.

5.3 Balance de Carga

Para realizar el balance de carga para la obtención de 1100 [kg] de hierro nodular, utilizando el proceso de solidificación centrífuga se requirió proponer algunas consideraciones para el cálculo proporcionados por bibliografías externas o mediante normas establecidas¹⁶ que se mencionan a continuación

- Se utiliza un horno de arco eléctrico con revestimiento básico de alúmina

- Por las capacidades industriales que tiene la fundición nodular, se estima una capacidad de horno de 2000 [kg] (2 Toneladas)
- Se propone un coeficiente de piezas buenas del 70%
- La eficiencia del horno será de un 90%
- Se funde un retorno, chatarra de acero y arrabio principalmente, el contenido restante se asocia a distintas ferroaleaciones y los retornos se van a la escoria

Utilizando el método de solución propuesto en este trabajo de investigación, se puede dividir los resultados de la siguiente manera:

5.3.1 Composición química propuesta

Primeramente, se realiza el cálculo con los valores promedios (propuesta en %) del contenido de cada elemento que entra en la fundición nodular:

C= 3.7; Mn= 0.575; Si= 2.3; Cr= 0.05; Ni= 0.125; Mo= 0.055

Cu= 0.575; P= 0.03; S= 0.002; Ce= 0.1025; Mg= 0.045

El listado de las distintas ferroaleaciones y elementos de aleación se muestra a continuación:

- Niquel Ni1
- Ferro-cromo FeCr85
- Ferro-molibddeno FeMo80
- Ferro-silicio FeSi90
- Ferro-manganeso FeMn85

No se considera la carga del Magnesio y Cobre debido a los bajos valores que presentan estos en la carga final, de esta manera se obtiene la Tabla [5.1] de composiciones químicas:

Tabla [5.1]. Componentes de la carga y su composición química

Componentes de la carga	Contenido de los elementos %								
	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	C
Retorno	0.575	2.3	0.05	0.125	0.055	0.575	0.03	0.002	3.7
Chatarra de acero	0.50	0.30	--	--	--	--	0.06	0.06	0.30
Arrabio para fundición	0.70	0.80	--	--	--	--	0.30	0.05	3.80
Niquel Ni1	--	0.01	--	95	--	--	--	0.01	0.02
Ferro-cromo FeCr85	--	1.50	85	--	--	--	0.05	0.03	0.15
Ferro-molibddeno FeMo80	--	1	--	--	80	--	0.05	0.12	0.08
Ferro-silicio FeSi90	0.60	90	--	--	--	--	0.05	0.02	0.50
Ferro-manganeso FeMn85	85	2	--	--	--	--	0.03	0.03	0.50

Fuente: Propuesta, algunos datos son de Tarragó¹⁶

Se asume que las pérdidas se presentan en %:

Oxidación antes de la ebullición

Si= 97%; Mn= 75%; P= 55%; Cr= 30%; Ni= 2%; Mo= 4%

Durante la disolución de las ferroaleaciones en el metal líquido

Si= 18%; Mn= 18%; P= 20%; S= 40%; Cr= 3%; Ni= 0%; Mo= 2%

Durante la desoxidación del acero

Mn= 18%; Si= 15%; Al= 60%

5.3.2 Resultados del balance

Cantidad de retorno en la carga.

Utilizando la Ec. [3.7], se establece la cantidad de retorno generada en la carga, esto es importante porque permite establecer el material de fundición que se recicla en una posterior fundición, en el proceso propuesto:

$$B = 100 - Kps$$

$$B = 100 - 70$$

$$B = 30\%$$

Porcentaje del elemento de aleación introducido en la carga.

Para cada elemento de aleación que se introducen en la fundición en porcentaje, se utilizó la Ec. [3.8]. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

$$Cr = 0.05 \left(\frac{30}{100} \right) = 0.015\% Cr$$

$$Mo = 0.055 \left(\frac{30}{100} \right) = 0.0165\% Mo$$

$$Ni = 0.125 \left(\frac{30}{100} \right) = 0.0375\% Ni$$

$$Si = 2.3 \left(\frac{30}{100} \right) = 0.69\% Si$$

$$Mn = 0.575 \left(\frac{30}{100} \right) = 0.1725\% Mn$$

Contenido del elemento de aleación introducido por la carga (retorno) en el metal, considerando las pérdidas.

Utilizando la Ec. [3.9] se determina el contenido de los elementos de aleación que se introduce en la carga, para ello se consideran las pérdidas del proceso de fusión:

$$Cr = 0.015 \left(\frac{100 - 30}{100} \right) = 0.01\% Cr$$

$$Mo = 0.0165 \left(\frac{100 - 4}{100} \right) = 0.015\% Mo$$

$$Ni = 0.0375 \left(\frac{100 - 2}{100} \right) = 0.036\% Ni$$

$$Si = 0.69 \left(\frac{100 - 97}{100} \right) = 0.02\% Si$$

$$Mn = 0.1725 \left(\frac{100 - 75}{100} \right) = 0.043\% Mn$$

Consumo de ferroaleación.

Para determinar la cantidad en % de las ferroaleaciones utilizadas para balancear la carga (ferrocromo ($FeCr85$), ferromolibdeno ($FeMo80$), Niquel ($Ni1$), ferrosilicio ($FeSi90$) y

ferromanganeso ($FeMn85$) se utilizó la Ec. [3.10]. Los resultados se muestran a continuación:

$$\text{Ferro - cromo} \rightarrow FeCr85 = \frac{(0.05 - 0.01)10000}{85(100 - 3)} = 0.048\% FeCr85$$

$$\text{Ferro - molibdeno} \rightarrow FeMo80 = \frac{(0.055 - 0.015)10000}{80(100 - 2)} = 0.051\% FeMo80$$

$$\text{Niquel} \rightarrow Ni1 = \frac{(0.125 - 0.036)10000}{95(100 - 0)} = 0.093\% Ni1$$

$$\text{Ferro - silicio} \rightarrow FeSi90 = \frac{(2.3 - 0.02)10000}{90(100 - 18)} = 3.089\% FeSi90$$

$$\text{Ferro - manganeso} \rightarrow FeMn85 = \frac{(0.575 - 0.043)10000}{85(100 - 18)} = 0.763\% FeMn85$$

Contenido de carbono en el acero

Para determinar el carbono previo a la desoxidación al cromo y al manganeso, se utilizó la Ec. [3.12], obteniendo el siguiente resultado:

$$C = 3.7 - \left(0.15 * \frac{0.048}{100}\right) + \left(0.50 * \frac{0.763}{100}\right)$$

$$C = 3.69 \approx 3.7\%$$

Contenido de carbono en la carga.

Para determinar el contenido de carbono después de la desoxidación asumiendo la velocidad máxima de oxidación y el tiempo máximo de ebullición se utilizó la Ec. [3.13], obteniendo el siguiente resultado:

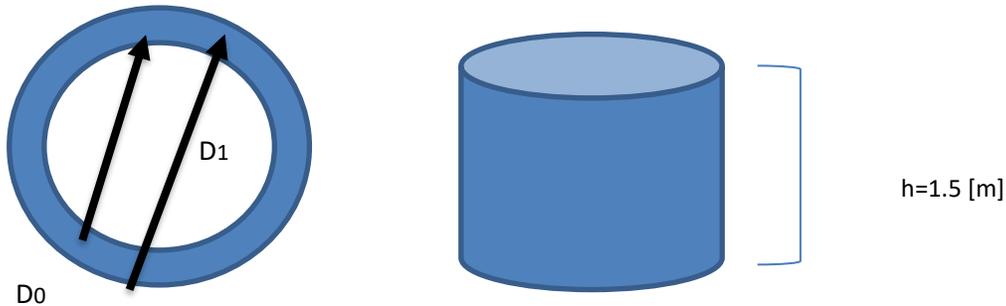
$$Cc = \left(\frac{3.7 * 30}{100}\right) + (0.006 * 20) + 3.7$$

$$Cc = 4.93\%$$

Contenido de chatarra de acero y fundición

Se puede conocer la cantidad de tubos sin costura para cada fundición utilizada conociendo las dimensiones de cada anillo, esto permite calcular la cantidad de piezas netas de la siguiente forma:

Para la Fundición en molde de arena



$$D_0 = 20.2 \text{ [cm]}; r_0 = 10.1 \text{ [cm]}$$

$$D_1 = 22.1 \text{ [cm]}; r_1 = 11.05 \text{ [cm]}$$

$$h = 150 \text{ [cm]}$$

Volumen de un cilindro

$$V_0 = \pi r_0^2 h = \pi (10.1 \text{ cm})^2 (150 \text{ cm}); V_0 = 48,071 \text{ [cm}^3 \text{]}$$

$$V_1 = \pi r_1^2 h = \pi (11.05 \text{ cm})^2 (150 \text{ cm}); V_1 = 57,539.44 \text{ [cm}^3 \text{]}$$

Para obtener una pieza:

$$V_c = |V_0 - V_1| = |48,071 - 57,539.44| = 9,408.44 \text{ [cm}^3 \text{]}$$

Conociendo la densidad general del hierro; $\rho_{Fe} = 7874 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, sustituimos:

$$7874 \frac{kg}{m^3} \left| \frac{1 m^3}{1,000,000 cm^3} \right| \left| \frac{1000 g}{1 kg} \right| = 7.874 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Para obtener el peso de la pieza:

$$W_{\text{tuboFA}} = 9,408.44 \text{ cm}^3 \left| \frac{7.874 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3} \right| \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right|$$

$$W_{\text{tuboFA}} = 74.55 \text{ [kg]}$$

Si tenemos 1100 [kg] de hierro:

$$\frac{1100 \text{ kg}}{74.55 \text{ kg}} = 14.75 \text{ [pzas]} \approx 14 \text{ [pzas]}$$

Si se tiene un retorno del 30%, disminuye la cantidad de piezas obtenidas:

$$14.75 * 0.3 = 4.425 \text{ [pzas]}$$

Por lo tanto, para la fundición en molde de arena, se obtiene:

$$14.75 - 4.425 = 10.325 \approx 10 \text{ [pzas] por fundición}$$

Para la Fundición centrífuga

$$D_0 = 22 \text{ [cm]}; r_0 = 11 \text{ [cm]}$$

$$D_1 = 24 \text{ [cm]}; r_1 = 12 \text{ [cm]}$$

$$h = 150 \text{ [cm]}$$

Volumen de un cilindro

$$V_0 = \pi r_0^2 h = \pi (11 \text{ cm})^2 (150 \text{ cm}); V_0 = 57,019.9 \text{ [cm}^3 \text{]}$$

$$V_1 = \pi r_1^2 h = \pi (12 \text{ cm})^2 (150 \text{ cm}); V_1 = 67,858.4 \text{ [cm}^3 \text{]}$$

Para obtener una pieza:

$$V_c = |V_0 - V_1| = |57,019.9 - 67,858.4| = 10,838.5 \text{ [cm}^3 \text{]}$$

Para obtener el peso de la pieza:

$$W_{\text{tuboFA}} = 10,838.5 \text{ cm}^3 \left| \frac{7.874 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3} \right| \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right|$$

$$W_{\text{tuboFA}} = 85.34 \text{ [kg]}$$

Si tenemos 1100 [kg] de hierro:

$$\frac{1100 \text{ kg}}{85.34 \text{ kg}} = 12.89 \text{ [pzas]} \approx 12 \text{ [pzas]}$$

Estableciendo el sistema de ecuaciones de la Ec. [15]:

$$B + Ch + A + \Sigma Z = 1100 \text{ [kg]}$$

Z contempla:

- 0.048% de FeCr85
- 0.051% de FeMo80
- 0.093% de Ni1
- 3.089% de FeSi90
- 0.763% de FeMn85

$$30 + Ch + F + 0.048 + 0.051 + 0.093 + 3.089 + 0.763 = 1100$$

$$34.044 + Ch + A = 1100$$

$$Ch + A = 65.95 \%$$

Asumimos tener en mismas cantidades la chatarra y fundición en la carga:

$$Ch = 32.975 \%; A = 32.975 \%$$

Se obtendrá entonces para la concentración de elementos en la marca de acero con ayuda de la Ec. [3.14]:

$$C_c = C_B * \frac{B}{100} + C_{ch} * \frac{Ch}{100} + C_F * \frac{A}{100} + \Sigma C_{clig} * \frac{Ge_i}{100}$$

$$C_c = \left(3.7 * \frac{30}{100}\right) + \left(0.3 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(3.8 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.15 * \frac{0.048}{100}\right) + \left(0.08 * \frac{0.051}{100}\right) \\ + \left(0.02 * \frac{0.093}{100}\right) + \left(0.5 * \frac{3.089}{100}\right) + \left(0.5 * \frac{0.763}{100}\right)$$

$$C_c = 1.11 + 0.099 + 1.25 + 0.00007 + 0.00004 + 0.00001 + 0.015 + 0.0038$$

$$C_c = 2.48\%$$

Peso del componente de la carga

Para determinar el peso de los componentes de la carga dentro del horno se utilizó la Ec. [16], arrojando los siguientes resultados:

$Q_B = \frac{1100 * 30}{100} = 330[kg]$	$Q_{Ch} = \frac{1100 * 32.975}{100} = 362.725[kg]$
$Q_F = \frac{1100 * 32.975}{100} = 362.725[kg]$	$Q_{FeCr} = \frac{1100 * 0.048}{100} = 0.528[kg]$
$Q_{FeMo} = \frac{1100 * 0.051}{100} = 0.561[kg]$	$Q_{Ni} = \frac{1100 * 0.093}{100} = 1.023[kg]$
$Q_{FeSi} = \frac{1100 * 3.089}{100} = 33.98[kg]$	$Q_{FeMn} = \frac{1100 * 0.763}{100} = 8.393[kg]$

$$Total = 1099.935 \approx 1100 [kg]$$

Contenido de elementos que no participan en la carga.

La Ec. [3.16] se utilizó para determinar el contenido del elemento de elementos de aleación que no participan en la carga del horno dando el resultado siguiente:

Para los componentes añadidos durante la desoxidación con ferrosilicio, ferromanganeso, fósforo y azufre se obtuvo:

$$Si = \left(2.3 * \frac{30}{100}\right) + \left(0.3 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.8 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.01 * \frac{0.093}{100}\right) + \left(1 * \frac{0.051}{100}\right) = 1.053\% Si$$

$$Mn = \left(0.575 * \frac{30}{100}\right) + \left(0.5 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.7 * \frac{32.975}{100}\right) = 0.569\% Mn$$

$$P = \left(0.03 * \frac{30}{100}\right) + \left(0.06 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.30 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.05 * \frac{0.051}{100}\right) = 0.127\% P$$

$$S = \left(0.002 * \frac{30}{100}\right) + \left(0.06 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.05 * \frac{32.975}{100}\right) + \left(0.001 * \frac{0.093}{100}\right) + \left(0.12 * \frac{0.051}{100}\right) \\ = 0.038\% S$$

Para los componentes añadidos después de la desoxidación de la fundición nodular, es decir, en la desulfuración de la carga dentro del horno se obtuvo:

$$Si_{des} = \left(1.5 * \frac{0.048}{100}\right) + \left(2 * \frac{0.763}{100}\right) = 0.015\% Si$$

$$P_{des} = \left(0.05 * \frac{0.048}{100}\right) + \left(0.03 * \frac{0.763}{100}\right) = 0.00025\% P$$

$$S_{des} = \left(0.03 * \frac{0.048}{100}\right) + \left(0.03 * \frac{0.763}{100}\right) = 0.00024\% S$$

Contenido promedio total de elementos que no se integran en el metal líquido. Para determinar el contenido promedio total de los elementos de aleación que no se integran en el metal líquido, se utilizó la Ec. [3.17]:

Elementos de aleación añadidos durante la desoxidación del hierro nodular:

$$Si = 1.053 * \left(\frac{100 - 97}{100}\right) = 0.031\% Si$$

$$Mn = 0.569 * \left(\frac{100 - 75}{100}\right) = 0.142\% Mn$$

$$P = 0.127 * \left(\frac{100 - 55}{100}\right) = 0.057\% P$$

$$S = 0.038 * \left(\frac{100 - 50}{100}\right) = 0.019\% S$$

b. Aportados por los componentes añadidos después de la desoxidación del acero

$$Si = 0.015 * \left(\frac{100 - 18}{100}\right) = 0.012\% Si$$

$$P = 0.00025 * \left(\frac{100 - 20}{100}\right) = 0.0002\% P$$

$$S = 0.00024 * \left(\frac{100 - 40}{100}\right) = 0.00014\% S$$

Consumo de desoxidantes.

Utilizando la Ec. [3.18]:

$$FeMn85 = \frac{(0.575 - 0.142) * 10000}{85 * (100 - 18)} = 0.62\% FeMn85$$

$$FeSi90 = \frac{(2.3 - 0.031) * 10000}{90 * (100 - 15)} = 2.96\% FeSi90$$

$$Al88 = \frac{0.05 * 10000}{88 * (100 - 60)} = 0.14\% Al88$$

Se realiza un balance de material de los desoxidantes (kg) utilizando la Ec. [3.15]. Se proponen los valores para el consumo de cada uno de los componentes, obteniendo:

$$Q_{FeMn85} = \frac{1100 * 0.62}{100} = 6.82 [kg] FeMn85$$

$$Q_{FeSi90} = \frac{1100 * 2.96}{100} = 32.56 [kg] FeSi90$$

$$Q_{Al88} = \frac{1100 * 0.14}{100} = 1.54 [kg] Al88$$

Contenido de fósforo y azufre.

El porcentaje correspondiente de fósforo y azufre obtenido por la Ec. [3.19] fue el siguiente:

$$P = 0.057 + 0.0002 = 0.0572\% P$$

$$S = 0.019 + 0.0004 = 0.0194\% S$$

Estos valores se encuentran dentro de los límites de la composición química compuesta¹⁶

Formación de escorias dentro del proceso de la fundición de hierro nodular. Consumo de aleaciones no metálicas

Para determinar el peso total de la carga dentro del horno considerando la escoria constituida por la caliza, el espatoflúor y el mineral de hierro consumido se propuso:

Caliza	Consumo entre 4 a 7% (valor considerado 6%)
Espatoflúor	Consumo entre 0.15% al 0.25% (valor considerado de 0.2%)
Mineral de hierro	Si se considera un incremento en el contenido de carbono del hierro nodular de 3% al 6.11%, se propone un consumo del 5% del C.

Para determinar el peso de los elementos que integran la escoria se utilizó la estos la Ec. [3.15], obteniendo los siguientes resultados:

$$Q_{caliza} = \frac{1100 * 6}{100} = 66 [kg] \text{ caliza}$$

$$Q_{esp} = \frac{1100 * 0.2}{100} = 2.2 [kg] \text{ espatoflúor}$$

$$Q_{min} = \frac{1100 * 5}{100} = 55 [kg] \text{ mineral de hierro}$$

5.3.3 Análisis del balance de carga

El balance de carga realizado en este trabajo de investigación permite establecer lo que, si bien es cierto, la cantidad calculada de chatarra, ferroaleaciones y retorno, para obtener la composición química de la aleación, establece con certeza obtener una fundición controlada, ya que los valores son congruentes a los establecidos por bibliografías externas, en especial, respecto a la cantidad real de material utilizado. Cabe señalar que hay algunos aspectos del balance, que sería cuestión de corroborar algunos datos acerca de las pérdidas, eficiencias, cinética de reacción de elementos que integran la aleación,

desoxidantes, formación de escorias, vinculados al proceso de fundición, con el fin de tener el control de las variables que intervienen en el proceso de fundición por centrifugación.

Es importante hacer mención que la fundición nodular no solidifica como otros metales ferrosos, que lo hacen progresivamente desde el exterior hacia el interior, ya que en este proceso la solidificación nodular hay metal líquido en la superficie. Por lo que es necesario:

- Estudiar el o los modelos que determinan las posibles rutas de corriente que pueden seguir el metal líquido durante la solidificación.
- Emplear sistemas de colada que originen la menor cantidad de turbulencia y que puedan atrapar la escoria y tierra antes que éstas penetren en la cavidad del molde.
- Diseñar sistemas de colada de forma que se mantenga mínima la turbulencia del flujo de metal dentro de la cavidad de molde, por lo que será rediseñar las particiones de modelo si fuera necesario.
- Colar piezas con la mayor velocidad posible para reducir el tiempo de oxidación en el molde.
- Emplear suficiente número de revoluciones para obtener buena distribución del metal y reducir la velocidad lineal de la corriente líquida.
- Siempre que sea posible se debe evitar moldear a mano el sistema de colada y montarlo sobre placas-modelo.

Dada la gran velocidad de colada, es fundamental asegurar un buen aireado de los moldes para asegurar la evacuación de los gases durante la colada

5.4 Ensayo Rockwell

Con el equipo descrito en el apartado de ensayos mecánicos, se utilizó el indentador de cono de diamante. La letra del ensayo corresponde a la "C", utilizando una carga de 150 [kg], tal como se muestra en la Figura [5.3].



Figura [5.3] Preparación del equipo Rockwell. Montaje de la base y el cono de diamante.

La dureza obtenida en nuestros ensayos corresponde a la dureza Rockwell de acuerdo con la nomenclatura dada por la Ec. [3.2]. Para los ensayos, se utilizaron probetas seccionadas de los anillos, con espesor de 1 [cm] y longitud de 2.54 [cm], con el fin de que los resultados pudieran ser comparados, así como comprender el comportamiento de estos.

Primeramente, la preparación de las probetas para realizar el ensayo de dureza Rockwell C, fue necesario un desbaste en zonas donde se realizó el ensayo, siguiendo la misma secuencia descrita en la caracterización metalográfica, sin necesidad del proceso de pulido. El ensayo se realizó en el centro, así como de los bordes de la pieza. De esta manera se vincularon los resultados (ver Tabla [5.2] y [5.3]) del ensayo de dureza Rockwell

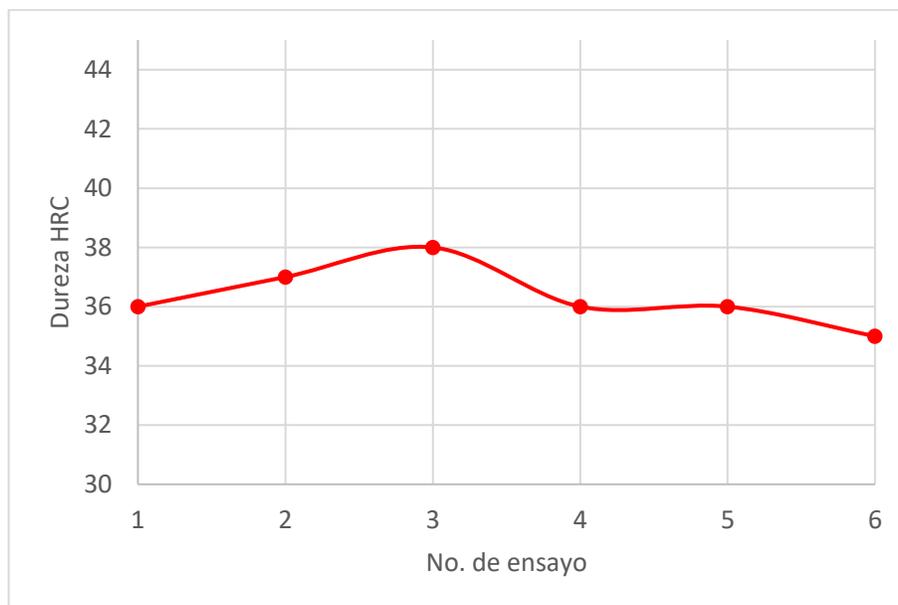
c con lo observado en las Figuras [5.4] y [5.5] del hierro nodular y gris obtenidas en el microscopio.

Para la dureza Rockwell C obtenida en fundición nodular, se muestra en la Gráfica [5.1], donde su comportamiento se puede considerar homogéneo, esto quiere decir que la aleación no es afectada por inclusiones o defectos que alteren su comportamiento mecánico, dando lugar a una pieza saludable

Tabla [5.2]. Dureza Rockwell C obtenida para la Fundición Nodular

No. de ensayo	Carga [kg]	Letra	Dureza Rockwell
1	36.2	C	36HRC
2	37.6	C	37HRC
3	38	C	38HRC
4	36.4	C	36HRC
5	36.2	C	36HRC
6	35.7	C	35HRC
PROMEDIO	36.68	--	36.33 HRC

Fuente propia.



Gráfica [5.1]. Ensayo Rockwell. Fundición nodular por el proceso de Centrifugación.

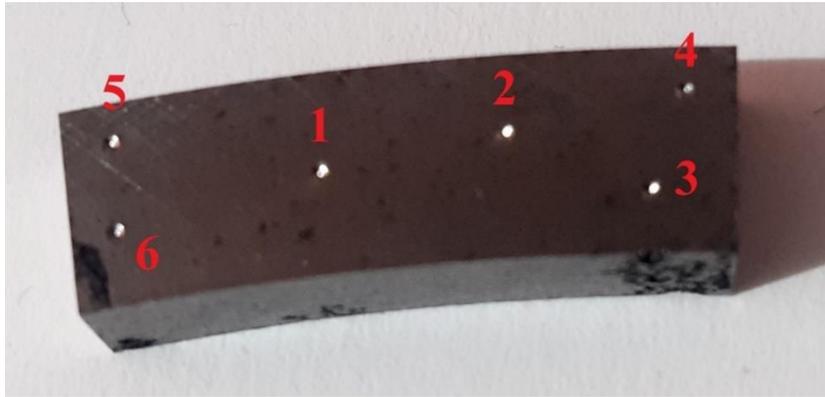


Figura [5.4]. Pieza ensayada (dureza Rockwell C) de la probeta de fundición nodular.

En el caso de la dureza Rockwell C obtenida para la fundición gris en molde de arena, establecen que esta es totalmente heterogénea, a su vez los resultados son muy bajos en comparación con los de hierro nodular.

Debido a que la fundición gris presenta inclusiones, así como un crecimiento de grano dendrítico, ocasiona este comportamiento descrito en el párrafo anterior, por lo que los anillos que presentan esta aleación tienen alteraciones mecánicas que perjudiquen su desempeño.

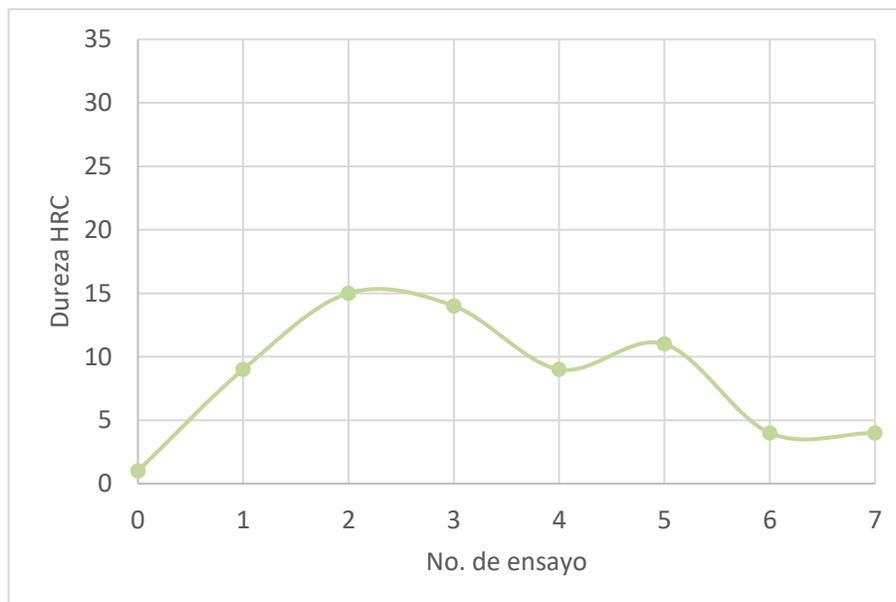
Los datos dispersos obtenidos por el ensayo para esta aleación, al analizarse se establece que el valor mínimo obtenido corresponde a un error de impacto, mientras que los valores más altos fueron obtenidos en la parte central de la pieza, lo que indica que sí existe una diferencia de dureza entre la parte interior (ensayo 2 y 3) y exterior de la pieza (ensayo 6 y 7).

Nuevamente se visualiza una afectación mecánica al no presentar esa homogeneidad, que provocará en su operación un mayor desgaste en las zonas de menor dureza, lo que representa un menor tiempo de vida operativa, en comparación con la fundición de hierro nodular. También se puede mencionar que los anillos fabricados por fundición gris pueden presentar fallos catastróficos por la presencia de inclusiones y defectos que alteren el funcionamiento del sistema.

Tabla [5.3]. Dureza Rockwell C obtenida para la Fundición Gris en molde de arena

No. de ensayo	Carga [kg]	Letra	Dureza Rockwell
F	1.1	C	1HRC
1	9	C	9HRC
2	15.1	C	15HRC
3	14.8	C	14HRC
4	9.4	C	9HRC
5	11.3	C	11HRC
6	4.1	C	4HRC
7	4.4	C	4HRC
PROMEDIO	9.729	--	9.429 HRC

Fuente propia.



Gráfica [5.2]. Ensayo Rockwell. Fundición gris en molde de arena.

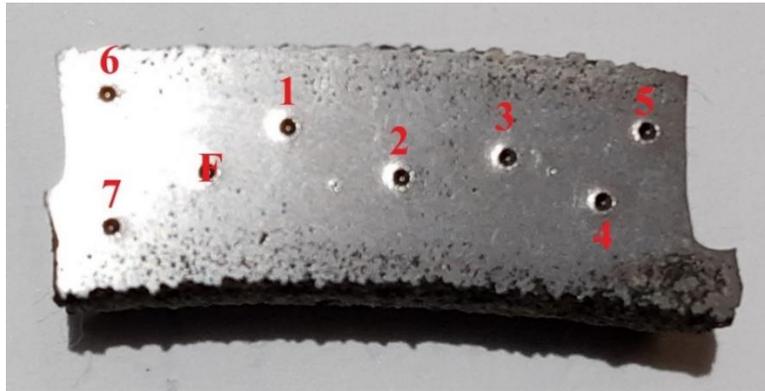


Figura [5.5]. Huellas de los ensayos de dureza Rockwell para la probeta de fundición gris.

5.5 Ensayo Brinell

Para la realización del ensayo Brinell a los anillos de fundición, se requirió los siguientes parámetros de equipo:

- Diámetro del balín: 2.5 [mm]
- Factor Q: 30
- Carga F: 187.5 [kg]
- Tiempo de aplicación: Aprox. 15 [s]

Se preparó la máquina con el balín determinado y se establece la carga de acuerdo como se observa en la Figura [5.6].



Figura [5.6] Designación de la carga para el ensayo.

Una vez seleccionada la carga, el ensayo debe de realizarse con poca luz, debido a que el equipo utiliza una linterna para poder distinguir la huella dejada una vez realizado el ensayo, esto se realiza con la ayuda de una pantalla y escala integrados en el mismo, tal como la muestra la Figura [5.7], y Figura [5.8]. El cálculo de la dureza Brinell se realiza usando la Ec. [3.4].



Figura [5.7] Estación para la toma de la huella.



Figura [5.8] Pantalla para la medición de la huella.

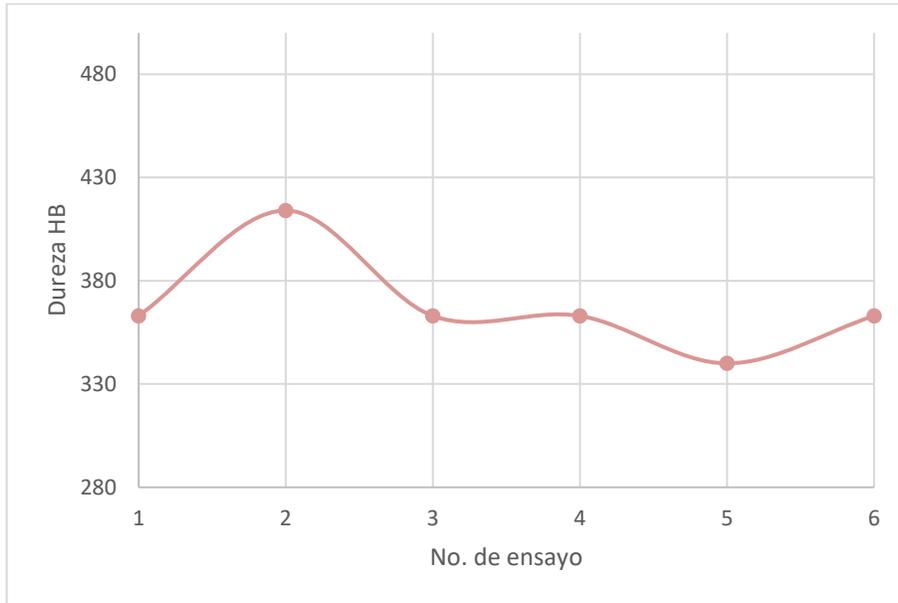
Para realizar el ensayo de la dureza Brinell a las muestras, primeramente, las probetas fueron preparadas superficialmente, para ello fue necesario realizar un desbaste fino (secuencia descrita en la caracterización metalográfica) en zonas donde se realizó el ensayo. La toma de dureza se realizó en el centro, así como en los bordes de la pieza. Los valores obtenidos para los anillos de hierro nodular por centrifugación se muestran en la Tabla [5.4], y las zonas donde se realizó el ensayo se muestra en la Figura [5.9].

Tabla [5.4]. Dureza Brinell de la Fundición Nodular (Centrífuga)

No. de ensayo	Factor Q	D. del balín mm	Carga P kg	D. de la huella mm	Dureza HB
1	30	2.5	187.5	0.8	363
2	30	2.5	187.5	0.75	414
3	30	2.5	187.5	0.8	363
4	30	2.5	187.5	0.8	363
5	30	2.5	187.5	0.825	340
6	30	2.5	187.5	0.8	363
PROMEDIO	--	--	187.5	0.795	367.66

Fuente propia.

La letra P que se muestra en la Figura [5.9], es la huella de la prueba de calibración del equipo. Los resultados de la dureza Brinell de la fundición nodular obtenida por centrifugación muestran un comportamiento homogéneo, aun cuando en dos ensayos (2 y 5) presentan variaciones, no simbolizan la presencia de anomalías los datos pueden observarse en la Gráfica [5.3].



Gráfica [5.3]. Ensayo Brinell. Fundición Centrífuga

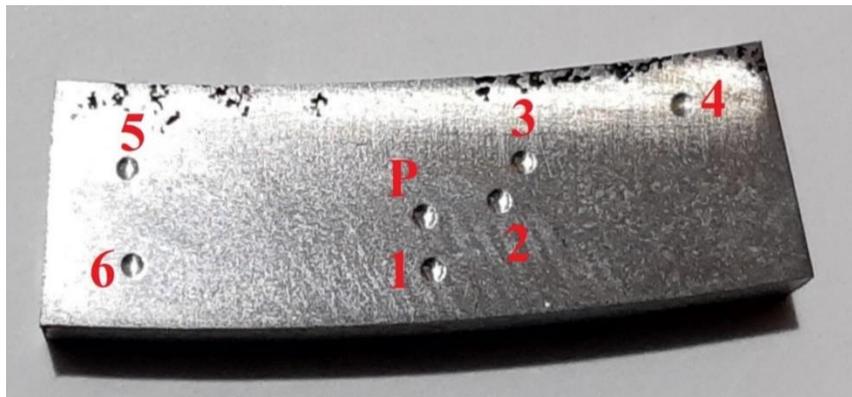


Figura [5.9]. Huellas de los ensayos de dureza Brinell para la probeta de fundición nodular

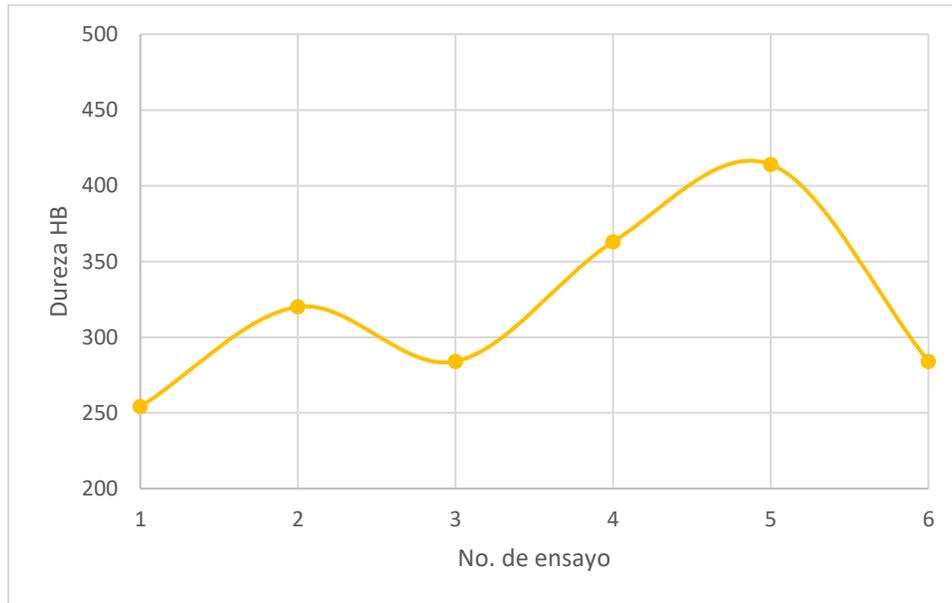
En el caso de la muestra de fundición gris en molde de arena los resultados obtenidos del ensayo de dureza Brinell se muestran en la Tabla [5.5], se grafican en el Gráfica [5.4] y las huellas de los ensayos se muestran en la Figura [5.8]. En esta aleación se puede observar que, si hay una discrepancia de las durezas obtenidas en los ensayos 1, 3 y 6 comparadas

con la de los ensayos 2, 4 y 5, que, aunque se aplica la misma carga la huella registrada es distinta, por lo que este resultado si puede alterar al sistema en operación.

Tabla [5.5]. Fundición Gris en el molde de arena

No. de ensayo	Factor Q	D. del balín [mm]	Carga P [kg]	D. de la huella [mm]	Dureza HB
1	30	2.5	187.5	0.95	254
2	30	2.5	187.5	0.85	320
3	30	2.5	187.5	0.9	284
4	30	2.5	187.5	0.8	363
5	30	2.5	187.5	0.75	414
6	30	2.5	187.5	0.9	284
PROMEDIO	--	--	187.5	0.85	319.83

Fuente propia.



Gráfica [5.4]. Ensayo Brinell. Fundición gris en molde de arena

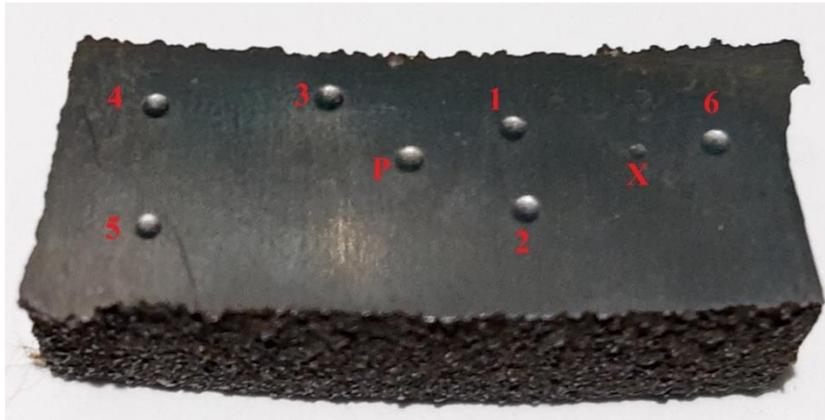


Figura [5.10]. Resultados del ensayo de dureza Brinell para la probeta de fundición gris.

5.6 Ensayo Vickers

En la realización del ensayo de dureza Vickers de las muestras de fundición nodular y gris se obtuvieron los resultados que se muestran en las Tablas [5.6] y [5.7] respectivamente. Para este ensayo es importante destacar, que la estación dos donde se aplicó una carga preliminar de 5 P, por lo que no fue necesario utilizar la carga que se reporta en tablas.

Para ambas fundiciones, fue necesario calibrar la huella que dejaba el indentador con el microscopio del equipo mediante la escala incorporada. En la Figura [5.11], se muestra la huella dejada por el indentador de punta de diamante, la cual debe coincidir con las líneas horizontales y verticales que muestran la escala, para posteriormente calcular la diagonal moviendo la escala hasta la parte superior de la huella, es decir, que coincidan los números de la escala inferior (poco visible en la imagen).

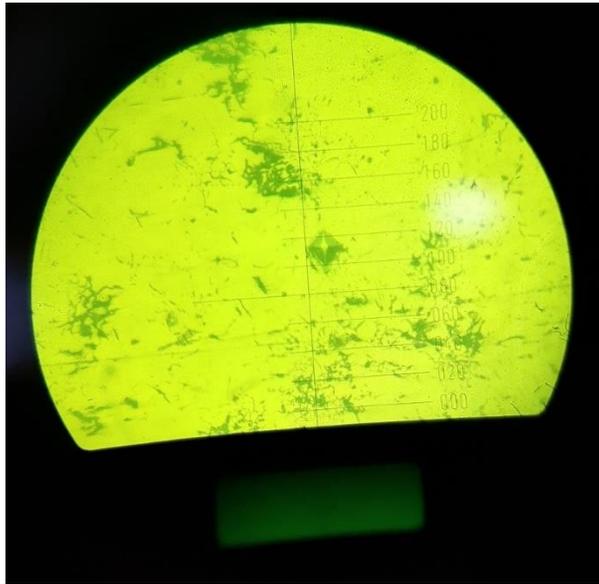


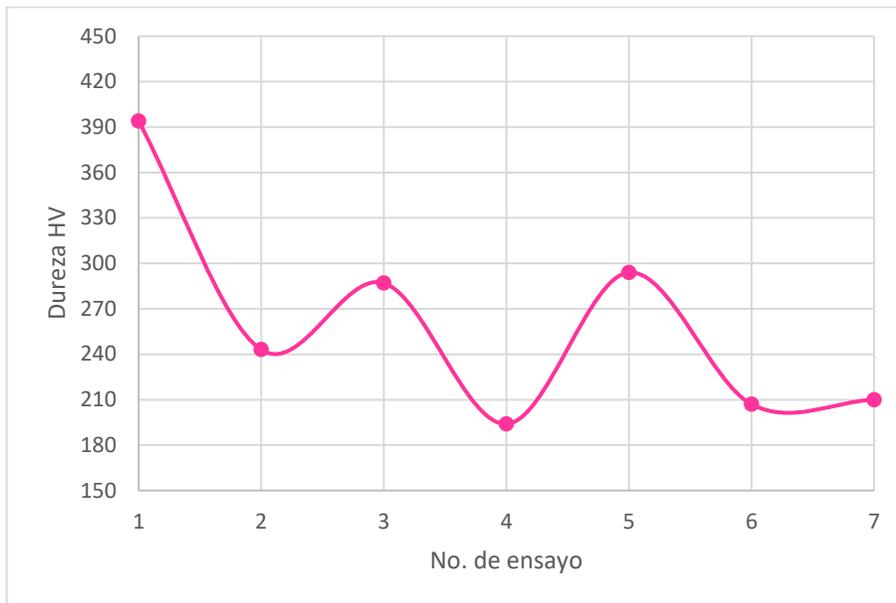
Figura [5.11]. Ensayo Vickers de la muestra de fundición gris

En el caso de usar la dureza Vickers para evaluar los anillos de hierro nodular por centrifugación y de hierro gris por molde de arena, los resultados obtenidos (ver Gráfica [5.5] y [5.6]) denotan un comportamiento totalmente heterogéneo, debido a la naturaleza del ensayo Vickers, puesto que los resultados vinculan tanto a microconstituyentes, como impurezas, inclusiones o fases distintas al metal base

Tabla [5.6]. Fundición Gris (Arena)

No. de ensayo	Carga [P]	Diagonal generada [μm]	HV de tablas
1	100	21.7	394
2	100	27.6	243
3	100	25.4	287
4	100	30.9	194
5	100	25.1	294
6	100	29	207
7	100	29.7	210
PROMEDIO	100	25.05	261.28

Fuente propia.



Gráfica [5.5]. Ensayo Vickers. Fundición gris en molde de arena

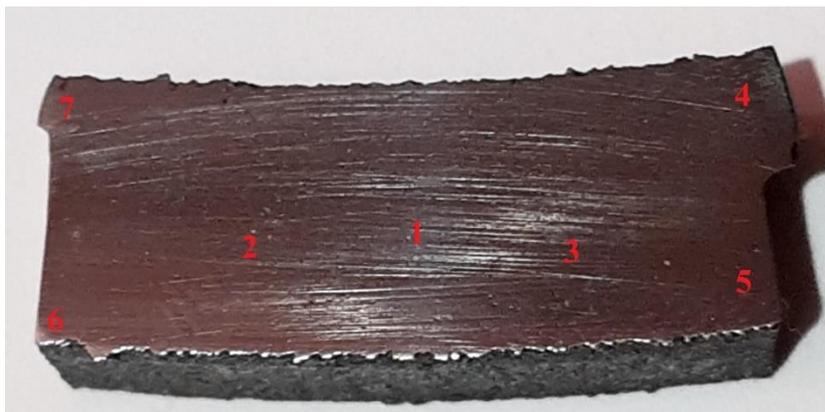


Figura [5.12]. Zonas donde se realizó el ensayo Vickers en la fundición gris

En ambos casos se obtienen valores distintos de dureza, sin embargo, al analizar los datos para la fundición gris es muy notorio que los valores se encuentran en un intervalo de dureza entre 190 y 280, mientras que para la fundición nodular los valores se encuentran entre 88 y 466. Esto quiere decir que el ensayo de dureza Vickers permite analizar con mayor detalle los elementos que integran la aleación, que a su vez permite discernir de diferentes mecanismos dentro del sistema en estudio. Ejemplo de ello son las zonas donde se encuentran los nódulos de carbono, ya que ellos denotan valores de dureza más altos,

como lo reflejan los valores 1, 2 y 6 del hierro nodular, mientras que los valores más bajos 3,4 y 7 representan la dureza de la matriz del orden de 153 a 187 HV.

Los valores más altos de microdureza obtenidos por hierro gris son entre 394 y 294 HV, que representa las zonas de mayor densidad de grafito disperso en la matriz, como en los ensayos 1 y 5, mientras las zonas de más baja densidad de carbono reportan 194 y 243 HV.

El ensayo de dureza Vickers permite analizar zonas donde se vinculan sucesos de interés que afectan el comportamiento mecánico del material, no así en ensayo de dureza Rockwell y Brinell que son más direccionados a las características generales de la aleación.

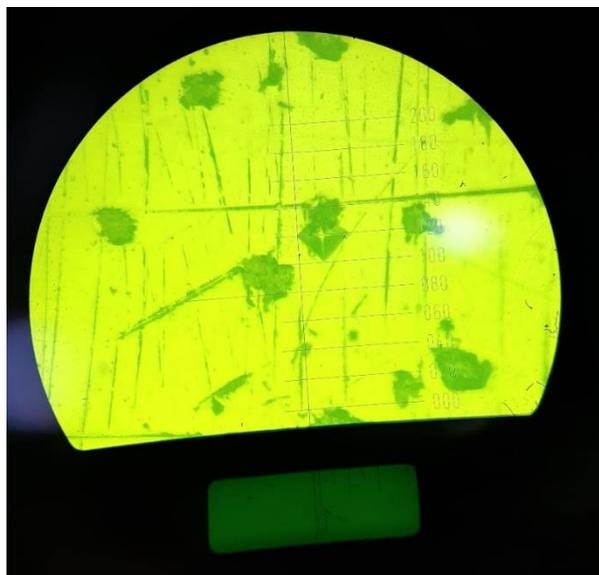


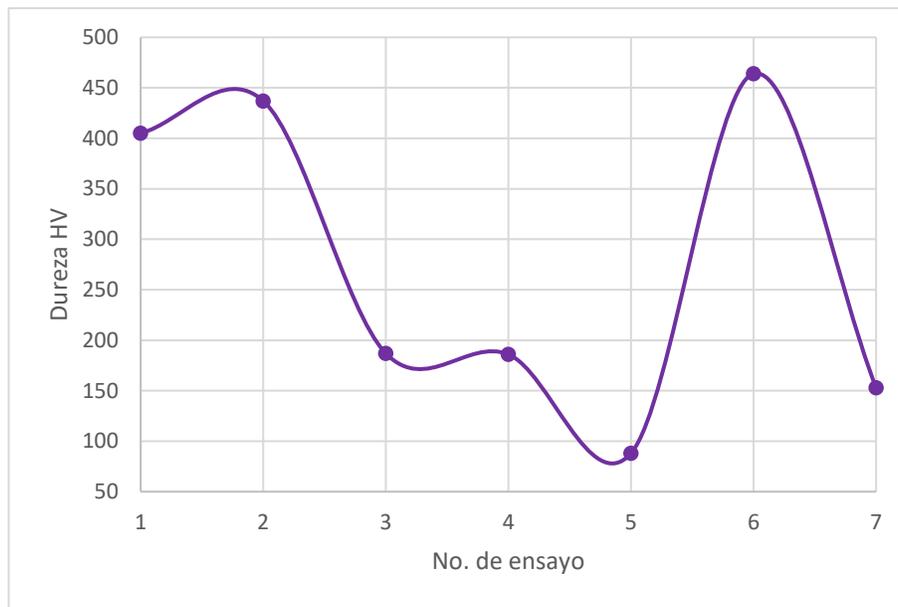
Figura [5.13] Huella en la fundición nodular.

Tabla [5.7]. Fundición nodular (Centrífuga)

No. de ensayo	Carga [P]	Diagonal generada [μm]	Dureza HV de tablas
1	100	21.4	405
2	100	20.6	437
3	100	31.5	187

4	100	31.6	186
5	100	45.9	88
6	100	20	464
7	100	34.8	153
PROMEDIO	100	29.4	274.28

Fuente propia.



Gráfica [5.6]. Ensayo Vickers. Fundición Centrífuga

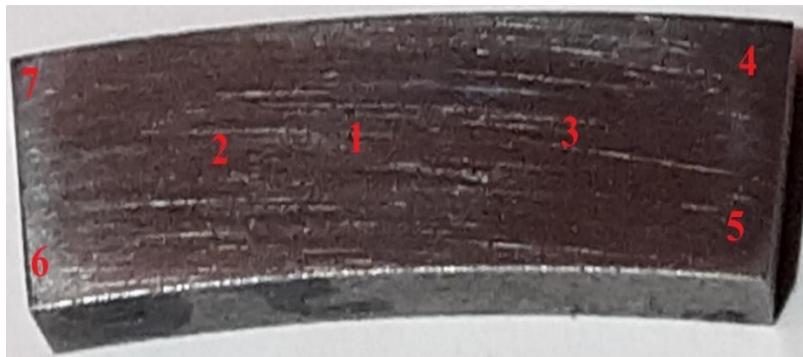


Figura [5.14]. Aproximación gráfica de los puntos donde se realizó en ensayo Vickers en la fundición nodular

6. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se realizó la caracterización metalográfica y química de anillos de hierro gris obtenidos por el proceso de fundición de molde de arena, así como de anillos de hierro nodular obtenido por el proceso de centrifugación. Se propuso y se analizó el balance de carga requerido para el hierro nodular. Además de realizar y comparar los ensayos de dureza Rockwell C, Brinell y Vickers para ambas aleaciones. Del conjunto de resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Los anillos de fundición gris presentaron una microestructura ferrítica y grafito laminar en forma de hojuela tipo A, de acuerdo con la norma ASTM A 247, esta aleación se recomienda en aplicaciones que requieran de una gran ductilidad, lo que permite que la pieza pueda ser rectificada dimensionalmente.
- Los anillos de hierro nodular presentan nódulos de carbono dispersos en la matriz, con un tamaño aproximado entre 20 y 30 μm . Esta aleación presenta excelente resistencia a la tracción y un alto límite elástico que le permite ser propicia para la fabricación de tubos sin costura mediante el proceso de fundición centrifuga. De acuerdo con los resultados obtenidos esta fundición cumple con la norma EN 545 e ISO 2531.
- El análisis de la composición química obtenida por espectrometría de emisión óptica por chispa de los anillos de hierro gris y nodular permitió verificar si estas aleaciones se encuentran bajo norma. También se identificó algunos óxidos presentes sobre el sustrato de ambas aleaciones, pero que no representan un daño sobre el comportamiento mecánico de las piezas.
- El balance de carga permitió calcular la cantidad de elementos para obtener la composición química de la aleación. De esta manera se puede establecer una fundición controlada. Cabe señalar que hay aspectos dentro del balance de carga, que se necesitan corroborar, tal es el caso de las pérdidas, eficiencias, cinética de

reacción de elementos, desoxidantes, escorias, que se vinculan a los procesos de fundición.

- La fundición nodular no solidifica como otros metales ferrosos, ya que este lo hace progresivamente desde el exterior hacia el interior, por lo que es necesario estudiar los modelos que determinen las rutas de corriente que puede seguir el metal líquido durante la solidificación, emplear sistemas de colada que originen la menor cantidad de turbulencia y que puedan atrapar la escoria antes de que éstas penetren en la cavidad del molde, diseñar sistemas de colada de forma que se mantenga mínima la turbulencia del flujo de metal dentro de la cavidad de molde, colar piezas con la mayor velocidad posible para reducir el tiempo de oxidación en el molde, emplear suficiente número de revoluciones para obtener buena distribución del metal y reducir la velocidad lineal de la corriente líquida. A su vez, debido a la gran velocidad de colada, es fundamental asegurar una buena evacuación de los moldes para asegurar que los gases no queden atrapados durante la colada.
- Los diferentes ensayos de dureza aplicadas a ambas aleaciones permiten establecer diferentes aspectos de las aleaciones, ya que el análisis de los resultados dependerá de la naturaleza del ensayo de dureza y su relación con la microestructura, así como de los componentes que integran la aleación.

7. Referencias

1. RELIANCE FOUNDRY. (2023,10,06). Introducción al Hierro Fundido: Historia, Tipos, Propiedades y Usos. <https://www.reliance-foundry.com/blog/hierro-fundido-es>
2. Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.
3. Stefanescu, D. M. (1988). Metals Handbook, Volume 15 - Casting. ASM International.
4. Avalos, J. L. D., & Pérez, E.O. (2016). Diseño de un prototipo de colada centrífuga horizontal para producir tubos de aluminio. [Título Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio Institucional de la UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2016/mayo/0744511/Index.html>
5. Huilca, C. L. G., & Almeida, D. P. F. (2012). Obtención de tubos sin costura por el proceso de colado por centrifugado horizontal. [Título Profesional, Escuela Politécnica Nacional] Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5419>
6. Gómez, C. M. D., & Jami, S. H. E (2017). Estudio paramétrico del proceso de colado centrífugo para la obtención de tubos de aluminio sin costura. [Título Profesional, Escuela Politécnica Nacional] Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19039>
7. García, J (2016). Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena. [Título Profesional, Escuela Técnica Superior de Ingeniería] Repositorio Institucional de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60372>
8. Struers. (2023,11,06). Ensayo de dureza Brinell. <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Brinell#>
9. Struers. (2023,11,06). Ensayo de dureza Vickers (HV). <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Vickers>
10. Tarragó, J. C. P., Herrera, H. C. T., Mena, E. R. M., & Medina, E. N. (2015). Cálculos de Fusión en la Metalurgia (p. 110). Recuperado de

[https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12967/1/Libro Cálculos prácticos de fusión de la metalurgia 23.pdf](https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12967/1/Libro_Cálculos_prácticos_de_fusión_de_la_metalurgia_23.pdf)

11. FUNDINOX CHILE S.A (2013,11,06) FUNDICIÓN NODULAR. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.fundinox.cl/ASTM_A53_6.pdf
12. POLIFORMAS (2013,11,06) HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://poliformas.mx/front/files/pdf/Ficha_RESINAPP-25059787.pdf
13. ASA LIJAS (2013,11,06) GUIA DE LIJADO. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://4552735.app.netsuite.com/core/media/media.nl?id=33445&c=4552735&h=5dc6df648f51a49bc731&_xt=.pdf

8. Bibliografía

1. Andrade, B. J. P. (2020). Rediseño y construcción de la máquina de colado centrífugo horizontal. [Título Profesional, Escuela Politécnica Nacional] Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21216>
2. Avalos, J. L. D., & Pérez, E.O. (2016). Diseño de un prototipo de colada centrífuga horizontal para producir tubos de aluminio. [Título Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio Institucional de la UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2016/mayo/0744511/Index.html>
3. Caballero, G & Romero, R. (2022). Microscopía Electrónica de Barrido. septiembre 03, 2022, de scai.uma.es Sitio web: <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
4. Castro, G. (2009). Fundiciones de Hierro. En el Departamento de Ingeniería Mecánica: Fundición. (pp. 1-25). Universidad de Buenos Aires.
5. Enríquez, J & Tremps, E. (2012). Fabricación de fundición nodular. [Monográfico, Universidad Politécnica de Madrid] Repositorio digital de la Universidad politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf
6. García, J (2016). Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena. [Título Profesional, Escuela Técnica Superior de Ingeniería] Repositorio Institucional de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60372>
7. Gómez, C. M. D., & Jami, S. H. E (2017). *Estudio paramétrico del proceso de colado centrífugo para la obtención de tubos de aluminio sin costura*. [Título Profesional, Escuela Politécnica Nacional] Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19039>
8. Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.

9. Huilca, C. L. G., & Almeida, D. P. F. (2012). Obtención de tubos sin costura por el proceso de colado por centrifugado horizontal. [Título Profesional, Escuela Politécnica Nacional] Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5419>
10. Reyes, J (2009). Fundición Nodular. (p. 3) Recuperado de: https://www.fundinox.cl/ASTM_A536.pdf
11. Ortiz, A., Ruíz, O. & Ortiz, J. (2013) MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA. (p.267). Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/2548>
12. Ortiz, C., Pingarrón, A, et. al. (2020). Manual de Prácticas del Laboratorio de Materiales I (p. 126). Recuperado de: https://www.ingenieria.unam.mx/labsmateriales/docs_calidad/manuales/Manual_LabMaterialesI.pdf
13. Reyna, G (2021). *Manual de prácticas de análisis metalográfico*. [Manual de prácticas, Centro de Enseñanza Técnico Industrial] Repositorio Institucional del Centro de Enseñanza Técnico Industrial https://siic.ceti.mx/recursos/DAC_Evidencias/
14. Rodríguez, H. (2022). Ensayos de Dureza en los Materiales. junio 16, 2022, de ingemecánica Sitio web: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>
15. Stefanescu, D. M. (1988). Metals Handbook, Volume 15 - Casting. ASM International.
16. Tarragó, J. C. P., Herrera, H. C. T., Mena, E. R. M., & Medina, E. N. (2015). Cálculos de Fusión en la Metalurgia (p. 110). Recuperado de [https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12967/1/Libro Cálculos prácticos de fusión de la metalurgia 23.pdf](https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12967/1/Libro_Cálculos_prácticos_de_fusión_de_la_metalurgia_23.pdf)
17. Universidad Nacional del Rosario. (2018). Fundición y moldeo. Repositorio Digital del Departamento de Formación Tecnológica, 1-30. Recuperado de <https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/14246/9201->

19%20TALLER%20Fundici%C3%B3n%20y%20Moldeo.pdf?sequence=2&isAllowed=y

18. Universidad Nacional del Rosario. (2014). *Materiales Metálicos*. Repositorio Digital del Departamento de Tecnologías de los materiales, 1-39. Recuperado de <https://rehip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/3284/5503-14%20Materiales%20Met%C3%A1licos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>