

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“ANÁLISIS DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN LOS DIÁMETROS DE UNA FLECHA DE
HIERRO NODULAR”**

P R E S E N T A

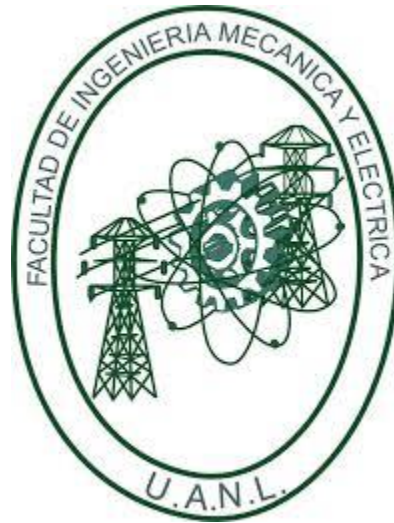
JORGE LUIS OLIVO VILLANUEVA

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO EN MAESTRÍA EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“ANÁLISIS DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN LOS DIÁMETROS DE UNA FLECHA DE
HIERRO NODULAR”**

P R E S E N T A

JORGE LUIS OLIVO VILLANUEVA

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO EN MAESTRÍA EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2020



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Análisis del Cambio Dimensional en los Diámetros de una Flecha de Hierro Nodular”, realizada por el alumno Jorge Luis Olivo Villanueva, con número de matrícula 1387930, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis

Dra. Sugeheidy Yaneth Carranza Bernal
Director

Dr. Jorge Adrián Aldaco Castañeda
Co-Director

Dr. Juan José Ramírez Natera
Revisor

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



FIME

064

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre de 2020



CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	9
Descripción del problema	24
Hipótesis	26
Objetivo	26
Objetivos específicos	26
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	27
Tamaño de la muestra	27
Selección de piezas	27
Dimensiones iniciales	31
Experimento	32
Dureza en núcleo	34
Composición química	36
Microestructura	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
Dimensiones iniciales	38
Dimensiones finales	40
Dureza en núcleo	42
Temperatura	43
Composición química	45
Microestructura	47
CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	52
ÍNDICE DE FIGURAS	60
ÍNDICE DE TABLAS	63

RESUMEN

En este trabajo de tesis se analizó el impacto de variables críticas como: temperatura, dimensiones iniciales, dureza, microestructura y composición química, en el maquinado de una flecha de hierro nodular, específicamente en las dimensiones finales de los diámetros "65", "108", "77" y "55", con el fin de mejorar el control del proceso y disminuir el desperdicio de la línea.

Para conseguir esto, se realizó una corrida de experimento en la que se maquinaron 45 piezas con durezas Brinell en el núcleo que van desde los 250 hasta los 158 HB. Las variables críticas se midieron en 3 etapas del proceso (después del desbaste, después de la primera inspección y después de la segunda inspección) y se procuró que el resto de las variables se mantuvieran constantes.

Las dimensiones iniciales de las piezas se midieron en una máquina de coordenadas. Para la medición de la temperatura de las piezas se usó un termómetro de contacto. Por su parte, las dimensiones finales de las piezas se midieron con calibradores de presión y para evaluar la dureza se usó un durómetro y un estereoscopio. La composición química se obtuvo con un microscopio electrónico de barrido mientras que para observar la microestructura se atacaron químicamente las piezas con Nital (4% ácido nítrico) y se usó un microscopio óptico.

Los resultados muestran que la dureza y la temperatura de la pieza afectan significativamente sus dimensiones finales. La dureza a su vez, depende directamente de la cantidad y tamaño de los nódulos, así como de los porcentajes de ferrita y perlita, y todo esto en conjunto depende de la composición química y de otras variables involucradas durante la fundición como el tiempo de enfriamiento y la inoculación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que, alrededor de los últimos 100 años, la humanidad ha vivido un gran desarrollo tecnológico en todos los sectores; este hecho junto con el gran incremento en la población mundial ha traído consigo mayores exigencias en la calidad tanto de los productos como de los métodos de fabricación.

El sector automotriz no es la excepción, por el contrario, es una de las industrias de mayor relevancia en el mundo y aún más en México.

Es importante recordar que la industria automotriz no solamente está compuesta de las empresas que diseñan y ensamblan los autos, sino también de todas aquellas empresas que se dedican a la fabricación de autopartes y de los proveedores de estos últimos, lo que da como resultado, considerando también la demanda global, una cadena de suministro bastante grande, comparable incluso con otras industrias como la alimenticia y la farmacéutica, por mencionar algunas.

La producción anual de autos a nivel mundial ha crecido claramente en los últimos 10 años, como se puede observar en la figura 1. Por ejemplo, tan solo en la última década, se ha tenido un incremento del 30%, lo que equivale a 21 millones de autos aproximadamente (incluyendo vehículos pesados) según datos del sitio web de la OICA (Organización Internacional de Constructores de Automóviles. www.oica.net)

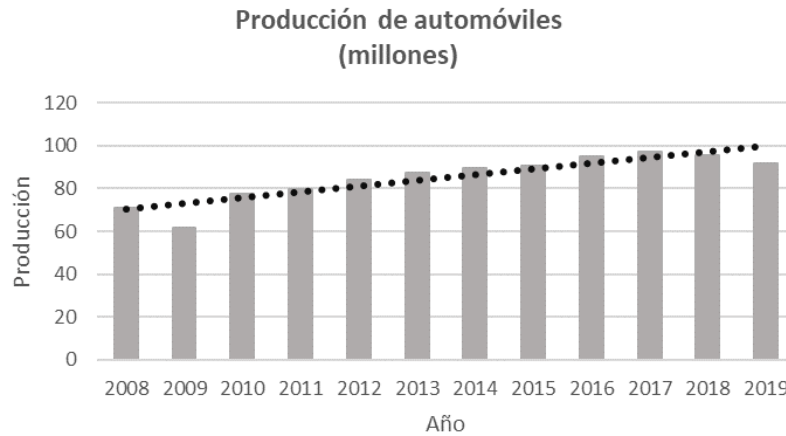


Figura 1. Producción anual de automóviles en el mundo (OICA. www.oica.net).

En el caso de México, el comportamiento es aún mejor pues casi ha duplicado su producción, de 2.15 a 4 millones aproximadamente (figura 2), lo que equivale a un crecimiento del 84% en el mismo periodo de tiempo, y pasó de ocupar el lugar 10 al 6 a nivel mundial; de continuar con esta tendencia México aspira a tomar el lugar 5 para el año 2020. En el 2019, por ejemplo, el sector automotriz fue el segundo más grande de México según datos del sitio web de la revista Expansión (www.expansión.mx).

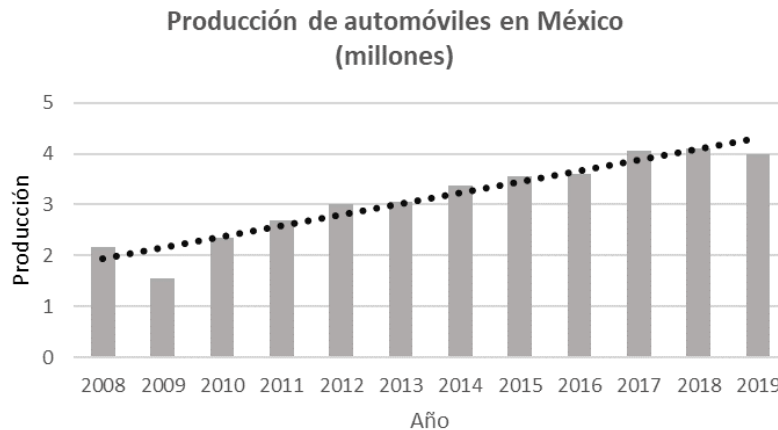


Figura 2. Producción anual de automóviles en México (OICA. www.oica.net).

Esta tendencia positiva del sector en el país, no solo se debe al incremento de la demanda mundial, sino de otras condiciones que hacen atractivo a nuestro territorio para que sea considerado como una de las mejores opciones para que las grandes firmas

automotrices establezcan sus operaciones. Algunas de estas condiciones son su posición geográfica y la mano de obra bien calificada y de bajo costo. En el 2012, según datos de KPMG, el índice de costo de manufactura en autopartes en México se ubicó entre 18.9 y 8% por debajo de países desarrollados productores en América, Europa y Asia, como se muestra en la figura 3 (www.kpmg.com).

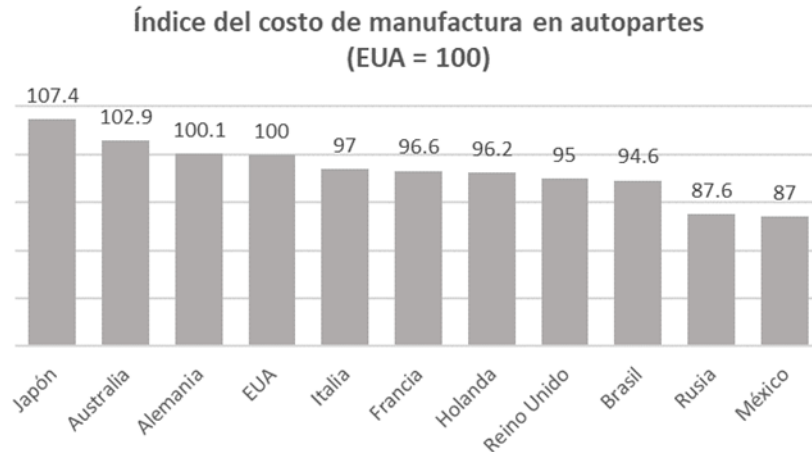


Figura 3. Índice de costo de manufactura en autopartes de KPMG (www.kpmg.com).

A pesar de todos estos datos a favor, la industria automotriz es altamente competitiva, y la única forma en que una nación puede aspirar a ser líder o por lo menos mantenerse en los mejores puestos, es la innovación y mejora de sus productos y procesos.

Con este tipo de filosofía organizacional, es con la que opera la empresa Sisamex, en la cual se desarrolló este proyecto.

La empresa Sistemas Automotrices de México, mejor conocida como Sisamex, es el resultado de una coinversión 50-50% de Quimmco y Meritor Inc. Es una organización de clase mundial que se dedica a la fabricación de componentes automotrices para vehículos comerciales. Sisamex fabrica ejes, frenos, componentes relacionados y ensambles para camiones y tracto camiones (Clase 5 a 8).

La planta de producción se localiza en Escobedo, Nuevo León, México y tiene alrededor de 2,000 empleados. La compañía provee sus productos a clientes como John Deere, CNH, Magna, Axle Alliance y a través de Meritor a importantes fabricantes de equipo

original, tales como International, Freightliner, Kenworth, Mercedes-Benz, entre otros. Así mismo, la compañía es un proveedor de componentes para Meritor y sus clientes a nivel global.

Los materiales que predominan en un automóvil son el acero y las fundiciones de hierro. Partes como la carrocería, chasis, tren motriz, suspensión, frenos, etc. están fabricadas de estos dos materiales con sus diferentes variantes. Por ejemplo, el tren motriz está formado de varias partes, una de ellas es la transmisión que, en pocas palabras, es la que se encarga de transferir la energía mecánica (movimiento) que genera el motor hacia las ruedas del automóvil. Para que esto suceda, la transmisión usa diferentes componentes como engranes, varillas, flechas, y otros (figura 4) que están expuestos durante su funcionamiento a condiciones adversas como altas temperaturas, diferentes tipos de fuerzas (torsión, fricción, etc.), fatiga, entre otras.

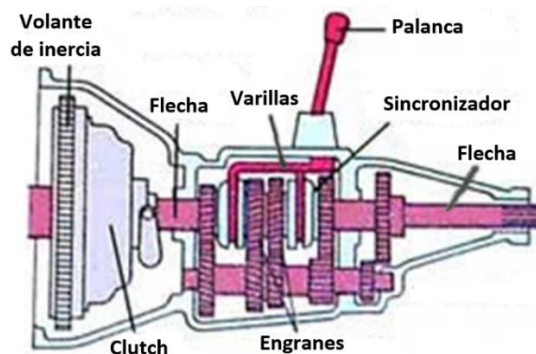


Figura 4. Algunos componentes de una transmisión.

Elegir correctamente los materiales que cumplan con estos estrictos requerimientos, se convierte en una tarea difícil durante la etapa de diseño.

Continuando con el ejemplo de la transmisión, uno de los materiales que mejor se desempeña en esta aplicación es el llamado hierro nodular, o también conocido como hierro dúctil o hierro de grafito esferoidal. La tabla 1 muestra los principales elementos que componen el hierro nodular.

Tabla 1. Composición elemental del hierro nodular.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg	% Fe
3.2 - 4.1	1.8 - 3	.1 - 1	0 - .03	0 - .03	.025 - .06	Restante

También puede haber otros, pero en menor proporción, como por ejemplo el cobre o estaño que ayudan a aumentar la dureza y el límite elástico, aunque a la vez reducen la ductilidad. Esta composición química junto con el tratamiento térmico adecuado, darán como resultado una microestructura y un conjunto de propiedades mecánicas claramente diferentes al resto de las fundiciones de hierro.

Una de las características importantes en las fundiciones de hierro es la formación del grafito, que en el caso del hierro nodular aparecerá en forma de nódulos o partículas similares a una esfera en lugar de “hojuelas” como en el hierro gris. La figura 5 muestra una microestructura típica del hierro nodular.

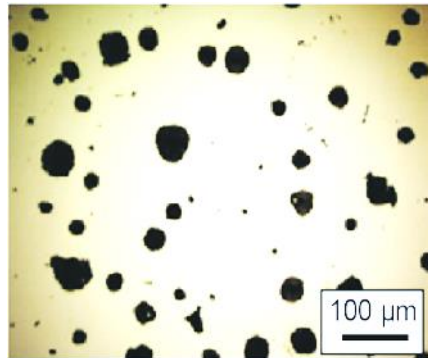


Figura 5. Microestructura del hierro nodular [1].

La matriz que rodea a los nódulos puede ser perlita, ferrita o una combinación de ambas, dependiendo de la composición química y del tratamiento térmico que se le dé como se muestra en la figura 6.

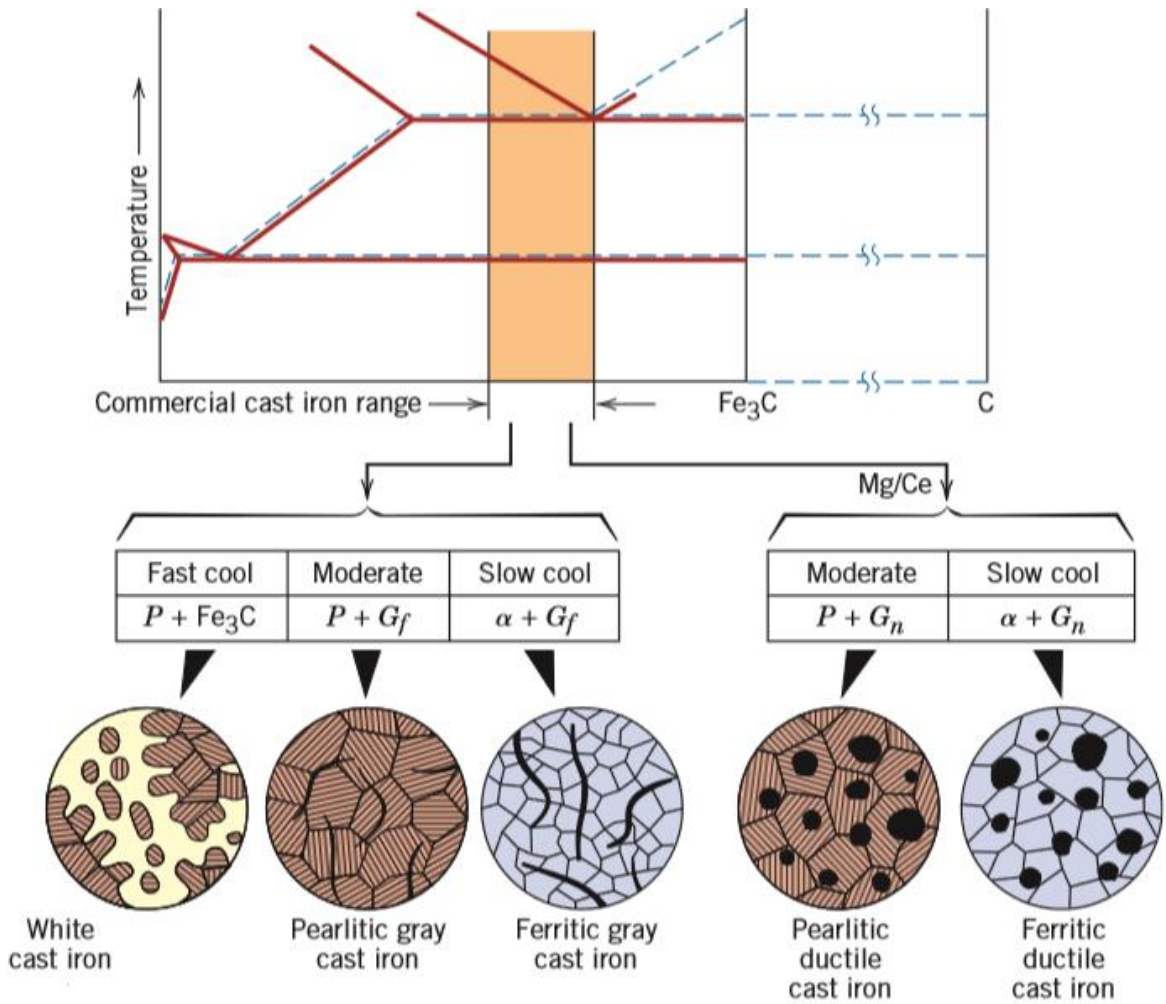


Figura 6. Microestructura según el tratamiento térmico [2].

La tabla 2 muestra diversas propiedades mecánicas y aplicaciones que presenta una fundición de hierro nodular como resultado de las fases que se forman.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del hierro nodular [2].

Grade	UNS Number	Composition (wt%) ^a	Matrix Structure	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
Ductile (Nodular) Iron							
ASTM A536							
60-40-18	F32800	3.5-3.8 C, 2.0-2.8 Si, 0.05 Mg, <0.20 Ni, <0.10 Mo	Ferrite	414 (60)	276 (40)	18	Pressure-containing parts such as valve and pump bodies
100-70-03	F34800		Pearlite	689 (100)	483 (70)	3	High-strength gears and machine components
120-90-02	F36200		Tempered martensite	827 (120)	621 (90)	2	Pinions, gears, rollers, slides

Por otro lado, para lograr la fabricación de las partes que componen un automóvil, es necesario utilizar diferentes procesos de manufactura como fundición, laminación, forja, extrusión, estampado, maquinado (torneado, fresado, rectificado, etc.), soldadura, tratamientos térmicos, etc.

Las operaciones de maquinado se pueden realizar en un centro CNC (Control Numérico por Computadora), el cual es una máquina semi automática capaz de realizar una o varias operaciones de maquinado (torneado, rectificado, etc.), es decir, solo requiere de una mínima intervención humana para ajustar las condiciones de trabajo para posteriormente continuar con la tarea automáticamente.

Durante el maquinado en un centro CNC intervienen muchas variables que afectan al desempeño de la producción. Algunas de estas variables pueden ser:

- Las condiciones de la materia prima como sus propiedades mecánicas, la geometría, los defectos superficiales, etc.
- Las condiciones de la herramienta como el desgaste por fricción, por impacto, etc.
- Las condiciones de la máquina como su instalación y mantenimiento, etc.
- Otras (temperatura, vibración, lubricación, etc.)

Una de las áreas de interés de la ingeniería de manufactura es precisamente el estudio de estas variables críticas para encontrar sus valores óptimos y mejorar el proceso de fabricación. Para lograr esto, existen diferentes métodos de análisis y mejora; los estadísticos, por ejemplo, ofrecen una buena confiabilidad en sus resultados, debido entre otras cosas a sus bases científicas. Metodologías como el DOE, el Taguchi o la Regresión son los más comunes. Cada método tiene sus particularidades las cuales ayudarán a decidir qué opción es la más adecuada. Por ejemplo, el diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés), es una técnica estadística en la que se manipulan deliberadamente una o más variables (independientes) con el fin de observar el efecto que tienen estas sobre otra variable de interés (dependiente) y así encontrar la correlación entre ellas y la combinación de valores que darían el mejor resultado.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Muchos coinciden en que las iniciativas ecológicas y económicas en la industria automotriz proporcionan la motivación para las empresas de realizar investigaciones intensivas para desarrollar mejores materiales y procesos de fabricación que les ayuden a mantenerse competitivas en uno de los sectores más importantes a nivel mundial [3]. Para mejorar sus productos sin comprometer sus costos, las empresas han visto una gran oportunidad en desarrollar materiales con una mejor relación “peso-propiedades” [4]. Es decir, encontrar materiales con propiedades iguales o mejores que los que se utilizan actualmente, pero con igual o menor peso que les ayuden a fabricar autos más ligeros y/o con mejores propiedades mecánicas en sus componentes, lo que al final se traduce en menor consumo de gasolina y una reducción de las emisiones tóxicas al ambiente, un mejor desempeño del vehículo (manejo), reducción de costos, etc.

Con este escenario, el hierro nodular se ha posicionado como una de las mejores opciones debido a las ventajas que ofrece en comparación con otras alternativas, como algunos aceros y otros tipos de fundiciones de hierro, en donde el hierro nodular ofrece propiedades mecánicas similares o superiores, así como procesos de fabricación (fundición – maquinabilidad) mejores y de menor costo. Por ejemplo, el hierro nodular ofrece alta resistencia, tenacidad, ductilidad y fatiga, además tiene buena dureza, elasticidad, resistencia al desgaste, al impacto, entre otras [5-14]. A su vez, ofrece buena maquinabilidad y para su fundición cuenta con:

- Alta fluidez, lo que ayuda a producir piezas con dimensiones y formas finales muy cercanas a las diseñadas, necesitando solo el uso de operaciones de acabado para obtener las dimensiones finales.

- Temperaturas de fusión y, en consecuencia, temperaturas de vertido más bajas (por ejemplo, 27-77 °C menos que el acero fundido)
- Menor contracción que cualquier metal ferroso [15].

Según el censo mundial de fundición del 2018, las fundiciones de hierro gráfico (en sus diferentes formas, entre ellas, el hierro nodular) constituyen el 70% de la fundición total de metales en el mundo, seguido por el 20% de las fundiciones no ferrosas y el 10% de la fundición de acero aproximadamente [16].

En el 2017, José de Sousa et al. [17], realizaron una revisión de diferentes investigaciones para comparar la maquinabilidad de las fundiciones de hierro (gris, blanco, maleable, nodular y de grafito compacto) considerando variables como fuerzas y temperaturas de corte, consumo de energía, rugosidad superficial, desgaste de la herramienta, entre otras.

Tabla 3. Efectos de algunos elementos en las fundiciones de hierro [17].

Chemical element	Effect during solidification	Effect during the eutectoid reaction
Aluminum	Hard graphitizing	Promote the ferrite and graphite formation
Antimony	Little effect	Strong stabilizing for pearlite
Boron (up to 0, 15%)	Hard graphitizing	Promote the graphite formation
Boron (above of 0, 15%)	Carbide stabilizing	Strong trend to retained the pearlite
Chromium	Strong trend to carburizing	Strong trend of pearlite formation
Copper	Weak graphitizing	Promote the pearlite action
Manganese	Weak trend to carburizing	Strong promoter of the pearlite formation
Molybdenum	Weak trend to carburizing	Strong promoter of the pearlite formation
Nickel	Graphitizing	Weak promoter of the pearlite formation
Silicon	Strong graphitizing	Promote the ferrite and graphite formation
Tellurium	Strong trend to carburizing	Weak pearlite stabilization
Tin	Little effect	Strong trend of the retained pearlite
Titanium (up to 0, 25%)	Graphitizing	Promote the graphite action
Vanadium	Strong trend to carburizing	Strong pearlite formation

Las fundiciones de hierro pueden tener diferentes propiedades mecánicas dependiendo de los elementos de aleación presentes (tabla 3) o del tratamiento térmico sufrido [17]. Las microestructuras también juegan un rol significativo y afectan las

propiedades físicas y mecánicas de estos materiales, principalmente cuando hay presencia de grafito puro (tabla 4). El grafito puro tiene una resistencia insignificante y proporciona una fuente de auto lubricación en el filo de corte durante el maquinado. La figura 7, muestra la capacidad de amortiguamiento de algunos materiales metálicos.

Tabla 4. Propiedades de algunas fundiciones de hierro [17].

Property	Gray	Nodular	Compact graphite cast iron (CGI)
Ultimate tensile strength (MPa)	235	650	500
Hardness (HB)	200	270	225
Young modulus (GPa)	110	165	140
Fatigue resistance (MPa)	100	265	205
Thermal conductivity (W/mK)	48	28	35

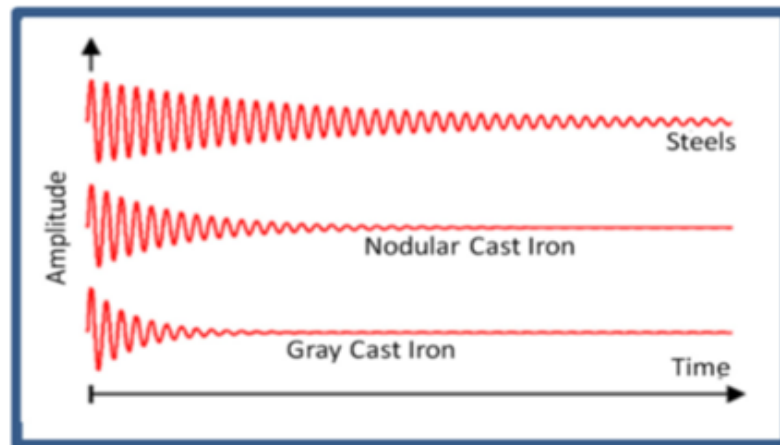


Figura 7. Comparación de capacidad de amortiguamiento [17].

La adición de elementos de aleación (silicio, magnesio, cromo, molibdeno, cobre, entre otros) y la aplicación de un tratamiento térmico adecuado [17], han contribuido enormemente a mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones de hierro como, por ejemplo, resistencia mecánica, rigidez y dureza.

La maquinabilidad de un material generalmente se evalúa analizando la vida útil de la herramienta, las fuerzas de maquinado, el consumo de energía, la forma de la viruta y la

calidad de la superficie de la pieza de trabajo [17], dependiendo de las especificaciones de la aplicación y del proyecto. En general, las fundiciones de hierro exhiben una buena maquinabilidad para casi todos estos criterios, especialmente cuando se comparan con el acero.

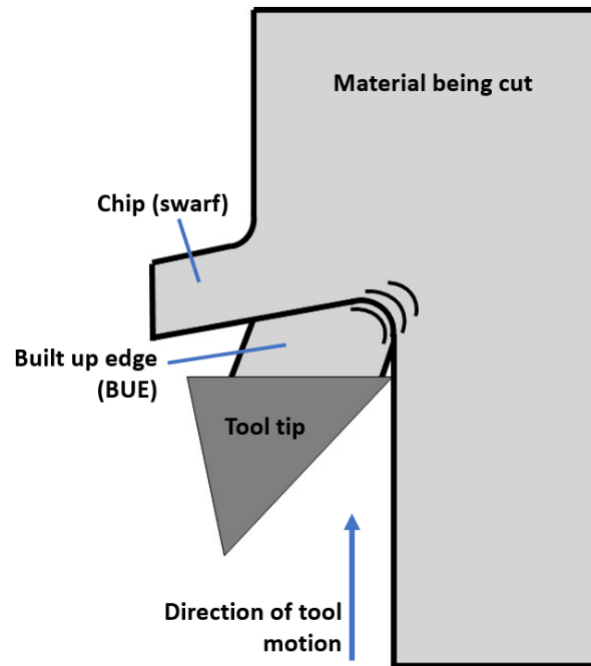


Figura 8. Ejemplo de formación del “BUE”.

La variación de la maquinabilidad en los diferentes tipos de fundiciones de hierro depende de su composición química y microestructura [17]. Las principales modificaciones que se le hacen comúnmente a las fundiciones de hierro son:

- La reducción del contenido de carbono en la matriz (debido a la aparición de carbono libre que debilita la matriz y, en consecuencia, tiende a mejorar la maquinabilidad).
- El aumento del contenido de silicio (disminuyendo el tamaño del borde construido, conocido como BUE (figura 8), mejorando así la maquinabilidad del material, particularmente cuando el BUE es un criterio importante).
- El aumento en el contenido de perlita (aumentando la dureza y por lo tanto disminuyendo la maquinabilidad del material).

Por otro lado, la composición química no es el único parámetro influyente en la maquinabilidad de las fundiciones de hierro porque la forma del grafito también ejerce una fuerte influencia [17]. El grafito como un componente de dureza relativamente baja en comparación con los otros constituyentes de la matriz, produce discontinuidades en el material, lo que mejora la capacidad de ruptura de la viruta durante el proceso de maquinado. El grafito actúa como lubricante, reduciendo la fricción entre la pieza de trabajo y la herramienta y reduce el riesgo de micro soldaduras; por lo tanto, el efecto general es mejorar la vida útil de la herramienta.

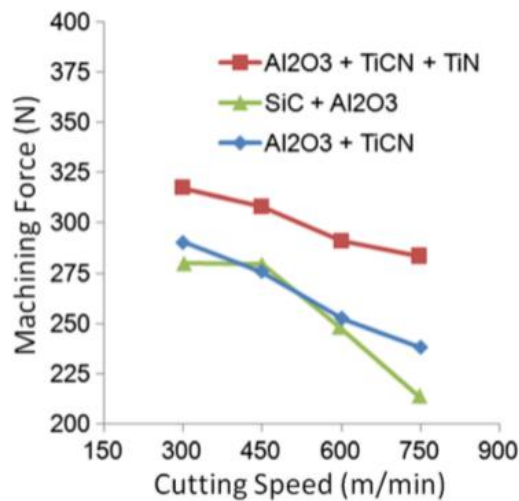


Figura 9. Comparación de fuerza y velocidad de corte en el maquinado de hierro nodular con diferentes herramientas cerámicas [17].

La reducción de las fuerzas de maquinado al aumentar la velocidad de corte (figura 9), está relacionada con el aumento de las temperaturas en las zonas de corte [17]. Lo que resulta en la reducción de la resistencia al corte del material de trabajo y en el espesor de la viruta formada durante el corte, mientras que, al mismo tiempo, la longitud de contacto de la herramienta de la viruta disminuye.

La energía de corte específica (fuerza de corte dividida por el área de corte) tiende a aumentar al aumentar la dureza y resistencia del material maquinado y tiende a disminuir con el aumento de la velocidad de avance y la velocidad de corte [17]. Esto se debe a que,

al aumentar la velocidad de avance, aumenta el área de corte y aumenta la velocidad de corte, la fuerza de corte disminuye. Sin embargo, la potencia de corte está prácticamente compuesta solo por el producto de la fuerza de corte y la velocidad de corte, y, por lo tanto, el consumo de potencia aumentará al aumentar la velocidad de avance y la velocidad de corte. El ángulo de inclinación también tiene un gran efecto sobre la potencia de corte, la cual disminuye al aumentar este ángulo. La potencia aumentará con el aumento del tiempo de corte (o la longitud de corte) ya que el desgaste de la herramienta aumentará progresivamente.

El rendimiento de maquinado de un material depende de los esfuerzos en los planos de corte, que, a su vez, dependen de la resistencia mecánica y la presencia de elementos de aleación, pero también depende de las condiciones de corte [17]. El consumo de energía generalmente aumenta al aumentar la velocidad de corte, aunque las fuerzas de corte se reducen, ya que esto promueve un ablandamiento del material y puede prevenir la adherencia en el área de corte. La aplicación de un buen lubricante también reducirá las fuerzas y, en consecuencia, el consumo de energía.

La integridad de la superficie y la precisión dimensional están influenciadas por el proceso de maquinado, las condiciones de corte, la geometría, el material y el desgaste de la herramienta, el tipo de la viruta y la rigidez de la máquina y la herramienta (vibración); involucrando deformación plástica, recuperación elástica, generación de calor, recristalización dinámica, vibración, esfuerzos residuales e incluso reacciones químicas que pueden promover cambios en el acabado de la superficie (rugosidad superficial y rebabas) y sub superficie (deformaciones plásticas, esfuerzos residuales y micro dureza) [17].

En general, cuanto mayor es la dureza del material, menor es la rugosidad de la superficie [17]. En el caso de las fundiciones de hierro, la rugosidad de la superficie está directamente influenciada por ciertas características del material, como la dureza y la microestructura. Las bajas tasas de desgaste de la herramienta y las altas tasas de eliminación de material, más el bajo valor de las fuerzas de corte y el consumo de energía son características del maquinado de las fundiciones de hierro. Durante el maquinado de este material, las partículas de grafito determinan el nivel de rugosidad de la superficie, mientras que la matriz determina la extensión de la vida útil de la herramienta.

La adición de níquel y cobre a las fundiciones de hierro mejora la maquinabilidad al reducir las fuerzas de corte y la rugosidad de la superficie [17].

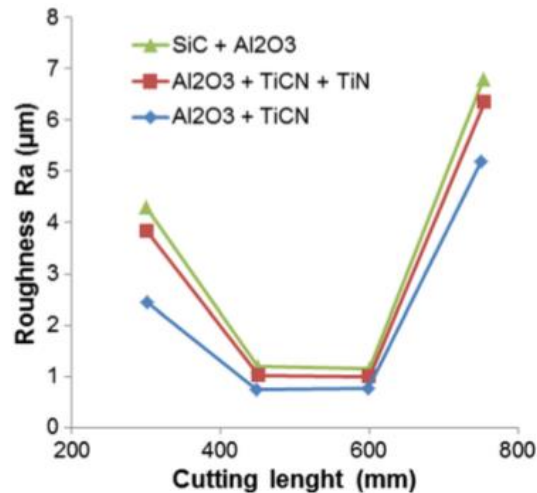


Figura 10. Comportamiento de la rugosidad a lo largo de la longitud de corte durante el maquinado de un hierro nodular (246 HB) usando diferentes herramientas cerámicas [17].

Al maquinar un hierro nodular (3.62% C, 2.57% Si, 0.08% Cr; .016% Mn) de dureza 246 HB con diferentes herramientas de corte, la rugosidad de la superficie no aumentaba continuamente con la longitud de corte, a diferencia del desgaste, (figura 10) [17]. No obstante, en unas pocas situaciones particulares sí notaron un aumento continuo de la rugosidad de la superficie, pero en general, el comportamiento de este parámetro fue bastante inestable o aleatorio, por lo que se podría decir que esta característica está directamente relacionada con la progresión del desgaste del flanco (esquina), ya que en la mayoría de los casos, la curva de la rugosidad de la superficie mostró el patrón de "zig zag", es decir, la calidad de la superficie se deterioraba en un valor de longitud de corte determinado, mejorando en algún rango medio, y posteriormente comenzaba a deteriorarse de nuevo. Por lo tanto, es difícil sacar conclusiones generales sobre la influencia del desgaste en la rugosidad de la superficie al maquinar fundiciones de hierro.

Muchos otros factores, además del desgaste de la herramienta, pueden afectar la calidad de la superficie maquinada, como la heterogeneidad del material y la distribución aleatoria de los nódulos de grafito, características que se encuentran principalmente en los hierros nodulares [17]. Algunos efectos indeseables, como el aumento excesivo de la ductilidad del material de trabajo y la presencia de BUE, afectan directamente el acabado de la superficie de las fundiciones de hierro, es decir, causan una gran rugosidad de la superficie y grandes rebabas. La mejor manera de minimizar la rugosidad de la superficie durante el maquinado es mediante la selección adecuada de las herramientas y condiciones de corte. Para reducir la rugosidad de la superficie al maquinar fundiciones de hierro, los autores sugieren el uso de bajas tasas de alimentación; herramientas de corte de carburo cementado (grado "K"), ya sean recubiertas o no recubiertas; ángulo de inclinación negativo; y una herramienta de gran radio de punta. El uso de herramientas de cerámica o pCBN permite el maquinado a altas velocidades de corte, lo que genera un buen acabado de la superficie y puede, en algunos casos, eliminar la operación de rectificado.

Las herramientas comúnmente utilizadas para el maquinado de fundiciones de hierro son acero de alta velocidad, carburo cementado grado "K" (recubierto con TiN, TiAl, multicapas TiAlN o sin recubrimiento), cerámicas (Si_3N_4 ; $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$; SiAlON; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ — Whisker; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ - Mixto) y ultra duro (pCBN-HorpCBN-L, donde H es el porcentaje medio alto de contenido de CBN y L de bajo contenido de CBN) las cuales deben ser resistentes a la abrasión y tener alta tenacidad, además de ser químicamente inertes para evitar interacciones con el material de trabajo [17].

El recubrimiento de TiAlN aplicado en las herramientas de carburo cementado grado "K" se ha utilizado ampliamente en el maquinado de fundiciones de hierro para mejorar la productividad y reducir los costos [17]. Este recubrimiento puede mantener una alta dureza y resistencia a la oxidación incluso a altas temperaturas. También se encontró que los recubrimientos de TiAlN de 10.5 μm de grosor son los más apropiados al maquinar hierro nodular. Las herramientas cerámicas basadas en Al_2O_3 y Si_3N_4 tienen baja afinidad química con las fundiciones de hierro, lo que mejora considerablemente el acabado de la superficie, incluso a altas velocidades de corte.

Tratando específicamente con hierro nodular, que, en su mayor parte, tiene una microestructura de alta ductilidad, las herramientas de maquinado más adecuadas son las cerámicas, particularmente el SiAlON y el pCBN (nitruro de boro compacto policristalino) [17]. Las herramientas de cerámica (óxidos de aluminio, nitruros de silicio, cerámica mixta, etc.) permiten velocidades de corte en el rango de 350 a 800 m/min; sin embargo, la longitud de contacto de la herramienta de viruta es significativamente mayor en comparación con las herramientas pCBN. El uso de estas herramientas implica una mayor productividad y mejores acabados superficiales en piezas fabricadas cuando se maquinan a altas velocidades de corte y bajas velocidades de avance.

La cerámica basada en nitruro de silicio tiene altas resistencias mecánicas debido a los enlaces covalentes, junto con sus propiedades químicas que apenas se ven afectadas a temperaturas elevadas [17]. Estas herramientas también tienen una alta resistencia al choque térmico y al desgaste abrasivo y adhesivo (tipo de desgaste predominante en las herramientas de corte al maquinar hierro nodular) en comparación con la cerámica basada en óxido de aluminio. Al evaluar en experimentos el desgaste y la vibración de la máquina se observó que las herramientas de cerámica a base de alúmina no eran satisfactorias para el maquinado de hierro nodular, debido a su baja tenacidad [17].

El tipo de desgaste que prevalece en un proceso de maquinado específico depende de las herramientas y el material involucrados, así como de las condiciones de corte y la estabilidad dinámica de la máquina [17]. Específicamente, en el maquinado de fundiciones de hierro, el desgaste en los flancos tiende a prevalecer normalmente desarrollado por adhesivos y mecanismos de desgaste abrasivo. La abrasión se debe a la presencia de partículas duras en el área de corte, que pueden provenir de la matriz que contiene precipitados duros, como SiC, Fe₃C, WC, TiC, entre otros, dependiendo de la composición química del material de trabajo, o cuando las partículas duras se quitan de la herramienta por desgaste.

Al evaluar el uso de herramientas de diamante policristalino (PCD) en el maquinado de fundiciones de hierro, se ha encontrado que, debido a la alta afinidad química de la PCD con cualquier tipo de fundición de hierro, no se recomienda su uso en estos materiales, debido a la muy baja vida de la herramienta promovida por el desgaste por adherencia [17].

Además, este mecanismo de desgaste se activa térmicamente y, aproximadamente a 750 °C, la forma alotrópica del carbono en las herramientas PCD cambia de cúbica centrada en el cuerpo (diamante) a hexagonal compacto (grafito), especialmente cuando esta temperatura permanece por más de 1.5 min. y la herramienta pierde drásticamente sus propiedades mecánicas, llevando a la herramienta a un fallo catastrófico. Se puede aplicar PCD para el maquinado de este tipo de materiales si el coeficiente de fricción se reduce drásticamente de manera que la generación de calor y la temperatura queden en niveles bajos, eliminando el mecanismo de desgaste por difusión.

Se realizó una investigación sobre el maquinado de un hierro nodular evaluando la vida útil de la herramienta y el acabado superficial [17]. En ella se comparaban las condiciones de maquinado en seco y húmedo, utilizando MWF comerciales a base de aceite, con la misma configuración de parámetros de maquinado. Los resultados mostraban que el rendimiento del maquinado en seco era comparable al del maquinado en húmedo. Se encontró que el rendimiento del maquinado en húmedo, en términos de vida útil de la herramienta, era mejor que el maquinado en seco; sin embargo, la calidad de la superficie del maquinado en seco fue casi similar a la del maquinado en húmedo. A partir de esos resultados, fue evidente que el maquinado en seco se puede realizar a altas velocidades de corte, bajas velocidades de avance y profundidades de corte, y utilizando herramientas revestidas adecuadas. En la perforación, la adhesión y la acumulación de material en las ranuras de la broca aumentan el torque y la temperatura, y con frecuencia causan una falla catastrófica de la herramienta.

También analizaron el maquinado de hierro nodular (246 HB) con diferentes herramientas de cerámica a diferentes velocidades de corte (figura 11) [17]. La herramienta de cerámica de alúmina revestida con TiN mostró el mejor rendimiento. Este resultado confirmó que la alta dureza del recubrimiento de TiN (3000 kgf/mm²) mejoró considerablemente la resistencia de las herramientas cerámicas durante el maquinado de hierro nodular.

En general, las fundiciones de hierro son materiales considerados relativamente fáciles de maquinar, particularmente se considera como criterios de maquinabilidad al tipo de viruta/morfología, las fuerzas de corte y el consumo de energía [17].

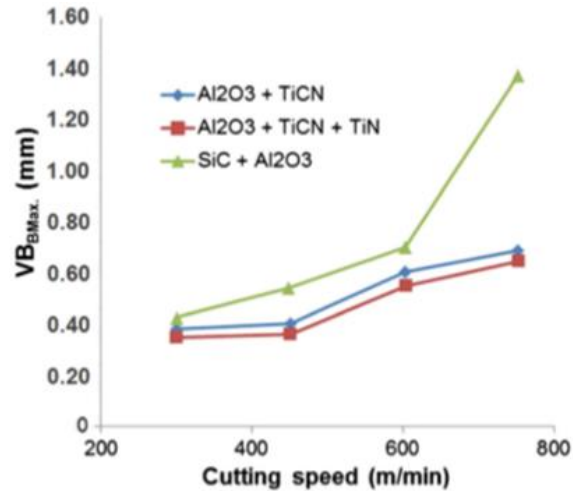


Figura 11. Desgaste del flanco de la herramienta vs la velocidad de corte en el torneado de un hierro nodular (246 HB) con herramientas cerámicas [17].

En 2018, Wilson L. Guessser y colaboradores [18] estudiaron la maquinabilidad del hierro nodular en forma de barras rectangulares, encontrando que esta cambiaba dependiendo de si su matriz era ferrítica o ferrítica-perlítica (la perlita muestra una mayor dureza que la ferrita). La figura 12 muestra las dimensiones de la barra y las regiones evaluadas. La tabla 5 muestra información importante del material probado.

En esta investigación [18], se estudió la variación en la velocidad de solidificación en barras de hierro nodular y su efecto en variables de maquinabilidad como torque, consumo de energía, vida útil de la herramienta (analizando el desgaste de la herramienta) y la rugosidad superficial, demostrando que las condiciones de maquinado deben cambiar dependiendo de la sección que se quiera maquinar en la barra de hierro nodular.

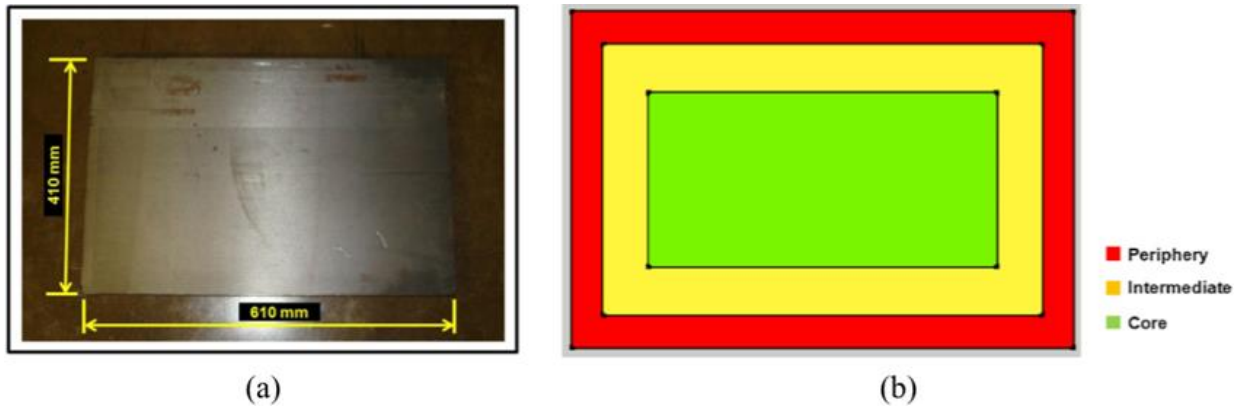


Figura 12. Muestra de hierro nodular usada en la investigación. a) Dimensiones y b) regiones evaluadas [18].

Tabla 5. Información relevante de las 3 regiones de la muestra de hierro nodular usada para la investigación [18].

Region/ sector	Pearlite (%)	Carbide (%)	Nodularization (%)	Graphite particles (number/mm ²)	Graphite nodule size (μm)	Average hardness (HB)
Periphery	3	0	98	272	30	176
Intermediate	9	0	95	90	35	179
Core	9	0	95	85	38	180

El tipo de matriz obtenida dependerá de la velocidad de transformación de la austenita en estado sólido a ferrita (también llamada “reacción eutectoide estable”) o a perlita (también llamada “reacción eutectoide metaestable”) [18]. Esta velocidad de transformación depende de la distancia entre sí de las partículas de grafito (carbono), por ejemplo, si la distancia aumenta, el tiempo para la transformación puede no ser suficiente y provocar la descomposición de la austenita en perlita y dar como resultado una matriz ferrítica-perlítica. Es decir, la distancia entre las partículas de grafito, medida por el número de partículas de grafito por unidad de área, determina el tipo de matriz de hierro nodular.

El número de partículas de grafito se rige principalmente por la velocidad de solidificación [18]. Por ejemplo, en la colada continua de barras de hierro nodular, existe una variación en la velocidad de solidificación de la superficie de la barra y el centro de la sección (la velocidad de solidificación va disminuyendo de la superficie hacia el centro o núcleo de la sección de la pieza). Esto es particularmente importante en secciones gruesas,

donde la diferencia en la velocidad de solidificación es significativa, lo que lleva a una variación en la microestructura entre la superficie y el centro. La figura 13 presenta la microestructura de las regiones evaluadas.

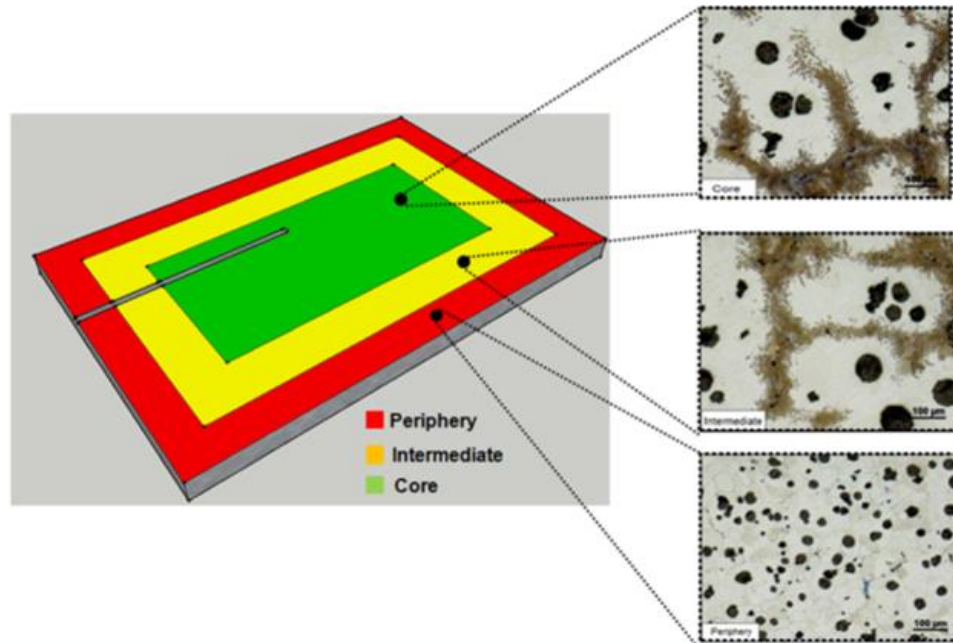


Figura 13. Microestructura de las 3 regiones de la pieza evaluada [18].

El desgaste de las herramientas de fresado en el maquinado de la región del núcleo de barras gruesas rectangulares de hierro nodular grado 45012 fue mayor que el observado en el maquinado de la periferia y las regiones intermedias [18]. El desgaste fue aproximadamente 8 a 16% mayor en el núcleo, que se asocia con la variación en la microestructura a lo largo de la sección; es decir, una mayor cantidad de perlita está presente en el área central, lo que resulta en una mayor dureza en esa área.

Los valores de torque obtenidos en el núcleo de las barras producidas por la colada continua fueron significativamente más altos que los de la región periférica, bajo las cuatro condiciones de corte probadas [18]. En comparación con la región intermedia, los valores del núcleo fueron significativamente más altos solo para una velocidad de corte de 250 m/min y una velocidad de avance de 0.1 mm/diente. No hubo diferencias significativas en el torque medido en las regiones intermedias y periféricas.

La región central de las barras presentó una potencia de maquinado promedio más alta en relación con las regiones intermedias y periféricas [18]. Sin embargo, según los resultados de ANOVA, las diferencias entre las regiones no fueron significativas. La mayor diferencia detectada fue entre los valores de torque obtenidos al maquinar las regiones del núcleo y la periferia, a una velocidad de corte de 255 m/min y una velocidad de avance de 0.1 mm/diente. El núcleo proporcionó mayor potencia de maquinado que la periferia (diferencia del 17,41%). Una comparación de la rugosidad superficial (parámetro Ra) para las tres regiones (núcleo, intermedio y periférico) no mostró diferencias.

Los resultados de la vida útil de la herramienta, el torque y la potencia de maquinado obtenidos en esta investigación indicaron que las condiciones de maquinado deben cambiar según la posición en la sección (núcleo, intermedio y periférico) de una barra gruesa de hierro nodular [18].

Tabla 6. Composición química de las muestras de hierro nodular [19].

Material		Graphite	Ferrite	Pearlite
Designation	Alloy	%	%	%
1	Unalloyed	12.28	87.72	–
2	%0.5 Ni–%0.7 Cu	8.49	18.88	72.63
3	%0.7 Ni–%0.7 Cu	8.25	17.89	73.86
4	%1 Ni–%0.65 Cu	8.62	15.23	76.15
5	%1.03 Ni–%0.7 Cu	8.42	14.61	76.97
6	%1.12 Ni–%0.6 Cu	8.97	16.34	74.69

En 2003, Ulvi Seker et al. [19] presentaron los resultados de unas pruebas de maquinado que realizaron con hierros dúctiles aleados con Ni y Cu en diferentes cantidades (tabla 6). La evaluación se hizo en función de las fuerzas de corte y la rugosidad superficial. En la figura 14 se observan las microestructuras de las muestras utilizadas en la prueba.

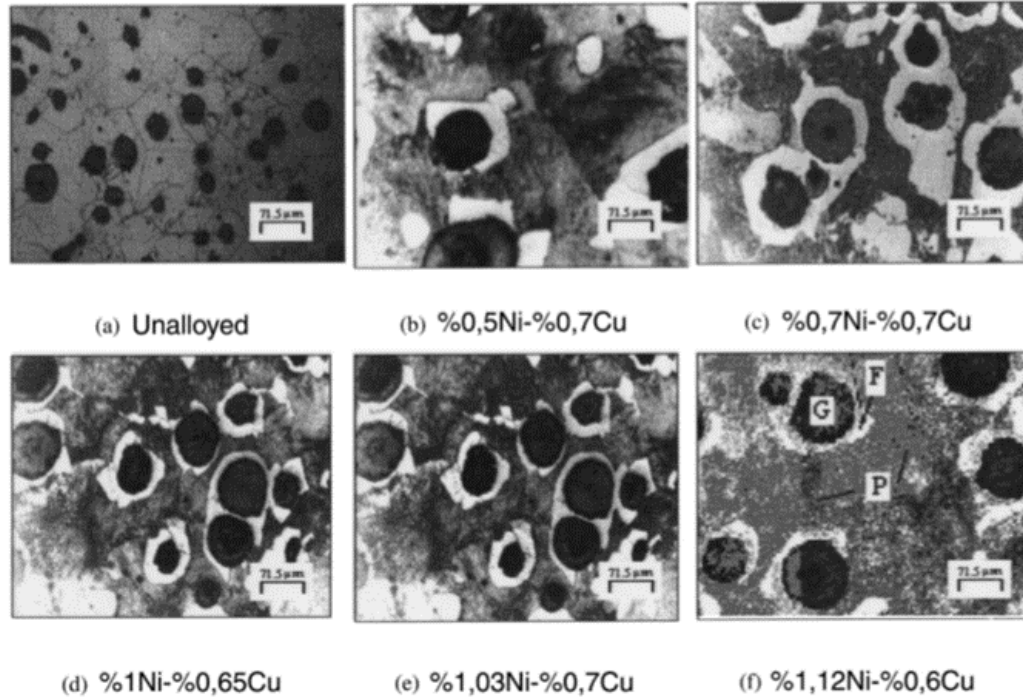


Figura 14. Microestructuras de las muestras de hierro nodular [19].

El valor de fuerza de corte más bajo se registró en el torneado de la muestra sin alear, sin embargo, mostró la mayor rugosidad superficial [19]. Esto puede explicarse por el alto contenido de ferrita en la estructura de la muestra sin alear.

Tabla 7. Propiedades mecánicas, fuerzas de corte y rugosidad superficial de las muestras de hierro nodular [19].

Specimen	UTS (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRc)	Primary force F_c (N)	Feed force F_f (N)	Surface roughness Ra (μm)
1	498	443	9.64	9.2	120	41.78	2.97
2	729	496	2.63	24.8	160	80.5	1.34
3	706	490	4.19	23.68	180	93.94	1.5
4	784	512	2.26	26.25	170	87.34	1.49
5	763	505	2.58	22.2	175	91.84	1.74
6	757	501	4.59	21.4	170	84.37	2.02

Los valores de rugosidad superficial obtenidos para las muestras de hierro nodular aleado son mejores que los de la muestra sin alear en al menos un 50% aproximadamente [19]. Esto puede explicarse por su mayor dureza. Los mejores resultados en términos de

fuerzas de corte y rugosidad superficial pertenecen al espécimen aleado con 0.7% de Ni y 0.7% de Cu (tabla 7).

Cuando se consideran los resultados de la fuerza de corte y la rugosidad superficial teniendo en cuenta las propiedades mecánicas, el espécimen aleado con 0,65% de Cu y 1% de Ni parece prometedor (figura 15). Por lo tanto, cuando se realiza una selección entre estos especímenes, debe depender de la aplicación.

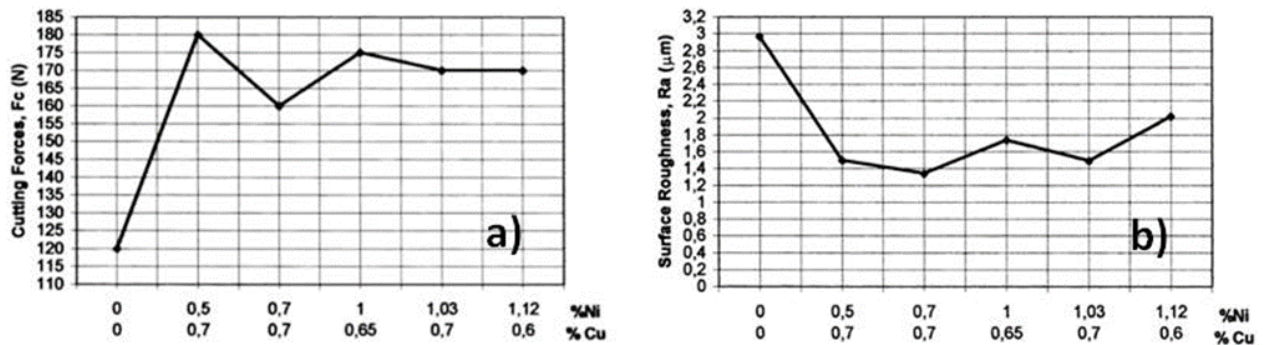


Figura 15. a) Variación de la fuerza de corte en cada muestra de hierro nodular, b) Variación de la rugosidad superficial en cada muestra de hierro nodular [19].

Descripción del problema

Para cumplir con las necesidades de sus clientes, Sisamex cuenta con diferentes líneas de producción, una de ellas está destinada a la fabricación de flechas de transmisión de hierro nodular para American Axle Manufacturing.

Una de las máquinas que forma parte de esta línea, es el centro de maquinado por control numérico computarizado (CNC). La máquina se encarga de realizar principalmente operaciones de desbaste y acabado tanto interior como exterior. Después de este proceso, se continua a una máquina diferente para el “estriado”.

Al finalizar, la pieza deberá cumplir con las especificaciones del cliente, sin embargo, actualmente existe un alto porcentaje de producción que no cumple con estos requerimientos, dando como resultado grandes cantidades de desperdicio. Se ha detectado

que alrededor del 90% del desperdicio es causado por diámetros fuera de dimensión, en específico los diámetros "65", "108", "77" y "55". De este porcentaje de desperdicio, aproximadamente el 90% sucede al salir de la máquina de desbaste y acabado, mientras que el otro 10% ocurre al salir de la máquina de estriado.

Para revertir esta situación, actualmente se requiere que el operador realice los ajustes necesarios en la máquina (como cambio de inserto, posición de inserto, etc.) para corregir la dimensión final de la pieza, desafortunadamente, esta práctica no es muy eficiente ya que dichos ajustes deben de llevarse a cabo con la máquina parada, lo que se traduce en tiempo muerto, y afecta, junto con el desperdicio, a la productividad de la línea.

Durante la observación y análisis de la operación, se detectó que algunas variables críticas son la temperatura, dimensiones iniciales, dureza, microestructura y composición química del material; misma opinión que comparten técnicos e ingenieros de este proceso.

Teniendo como base esta información, se realizó un experimento en el que se manipularon algunas variables del proceso y se observó su comportamiento con el fin de analizar y determinar la influencia de cada una en las dimensiones finales de la pieza en los diámetros "55", "65", "77" y "108" (ver figura 16). De esta forma se priorizaron las variables para tener un mejor control del proceso.

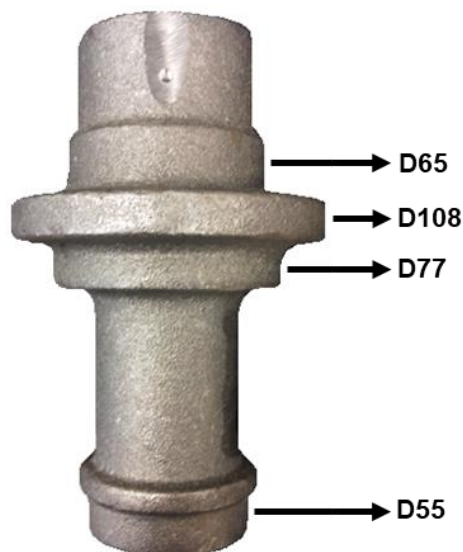


Figura 16. Diámetros evaluados (dimensiones del maquinado)

Hipótesis

Es posible controlar y mejorar las dimensiones finales de flechas de hierro nodular maquinadas en los diámetros "55", "65", "77" y "108" al establecer la relación de éstas con las variables críticas del proceso: dureza, temperatura, microestructura, composición química y dimensiones iniciales, para disminuir el porcentaje de desperdicio.

Objetivo

Definir la relación e influencia que tienen las dimensiones iniciales, dureza, temperatura, microestructura y composición química del material en las dimensiones finales de los diámetros "65", "108", "77" y "55" obtenidos en la fabricación de una flecha de hierro nodular.

Objetivos específicos

- Definir un método de medición para las variables críticas consideradas en el proyecto (dureza, microestructura, temperatura, composición química y dimensiones iniciales)
- Determinar la relación entre las variables de interés que ayude a valorar el impacto que tiene cada una.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para lograr los objetivos del proyecto, se realizaron las siguientes actividades:

1. Definición del tamaño de la muestra para la corrida de experimento.

Para cumplir con una muestra representativa, se seleccionaron piezas de 5 durezas diferentes tratando de cubrir todo el intervalo permitido por la especificación (de 185 a 260 HB aproximadamente). Se evaluaron las variables de interés en 3 etapas diferentes del proceso (desbaste, inspección 1 e inspección 2) como se muestra en la figura 17, y todo esto se repitió 3 veces con el fin de evitar errores en la medición, dando como resultado un tamaño de muestra de 45 piezas (5 durezas X 3 etapas X 3 réplicas)

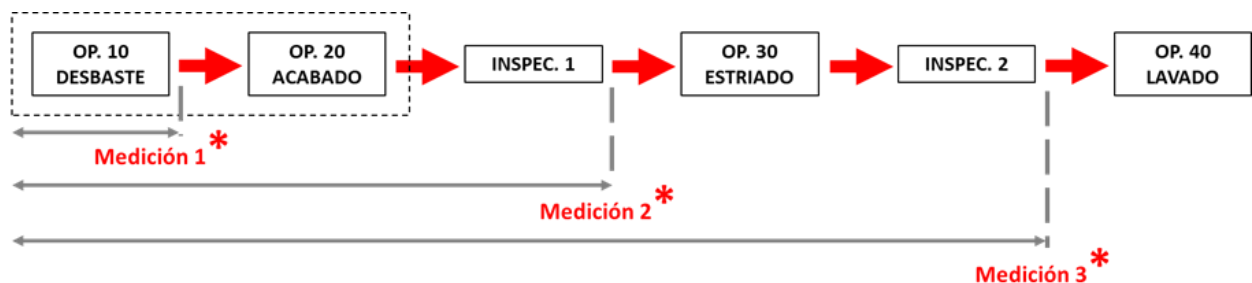


Figura 17. Etapas del proceso donde se midieron las variables de interés.

2. Selección de piezas para la corrida de experimento.

Se seleccionaron 9 piezas de cada grupo de dureza (185, 204, 221, 238 y 260 HB aproximadamente) tratando de cubrir todo el intervalo permitido por la especificación, el

cual es aproximadamente de 185 a 260 HB en el núcleo (diámetro 77). Para obtener la dureza en el núcleo era necesario una prueba destructiva, por lo que se desarrolló un método para calcular este dato a partir de la dureza superficial.

El primer paso fue definir la parte de la pieza en la cual se calcularía la dureza superficial considerando su geometría y posición en el molde durante la fundición. Dadas las dimensiones y forma tanto de la pieza como del equipo de medición, el diámetro de 64 mm fue el que mejor funcionó para la prueba, como se muestra en la figura 18. Para la indentación se usó una esfera diamante de 10 mm y una carga de 3000 kgf en ambos diámetros (64 y 77).



Figura 18. Método para evaluar dureza en el diámetro de 64 mm.

En el diámetro de 64 mm se evaluó la zona “Cope” (parte superior en el molde), “Drag” (parte inferior en el molde), parte izquierda y parte derecha. La superficie de cada zona, se preparó con una operación de pulido para disminuir el error durante la indentación. En la figura 19 se pueden observar las 4 zonas donde se calculó la dureza superficial de las piezas, así como los diámetros involucrados.

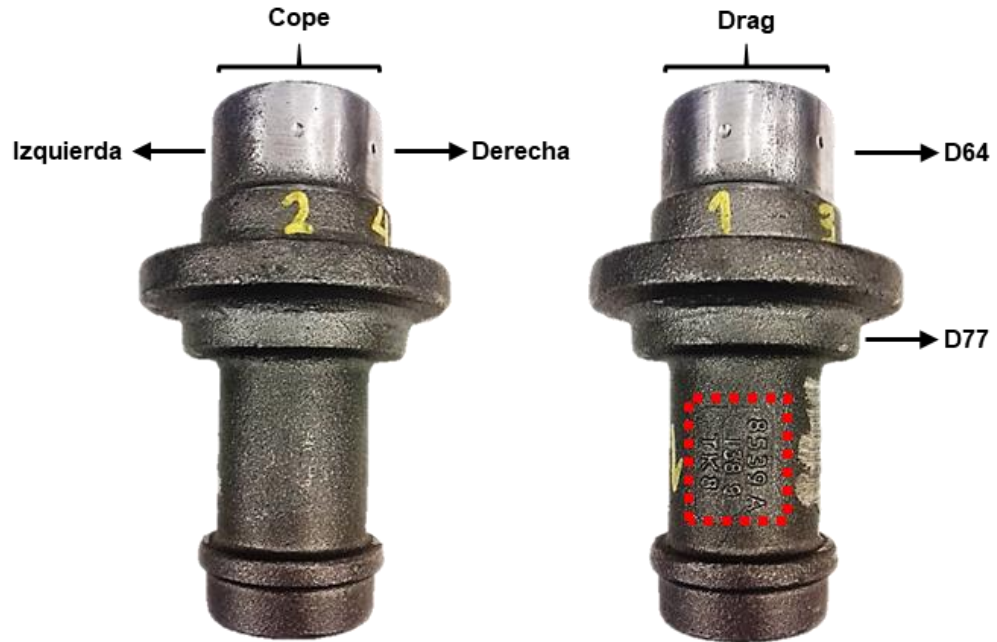


Figura 19. Zonas y diámetros para evaluación de dureza.

Los resultados preliminares de esta prueba mostraron que la dureza superficial del diámetro de 64 mm en la zona “Cope” tiene el comportamiento más similar a la dureza en el núcleo del diámetro de 77 mm que el resto de las zonas, por tal motivo, se agregó un pulido perpendicular en la superficie de este último diámetro para disminuir el error en la medición de la huella (ver figura 20).

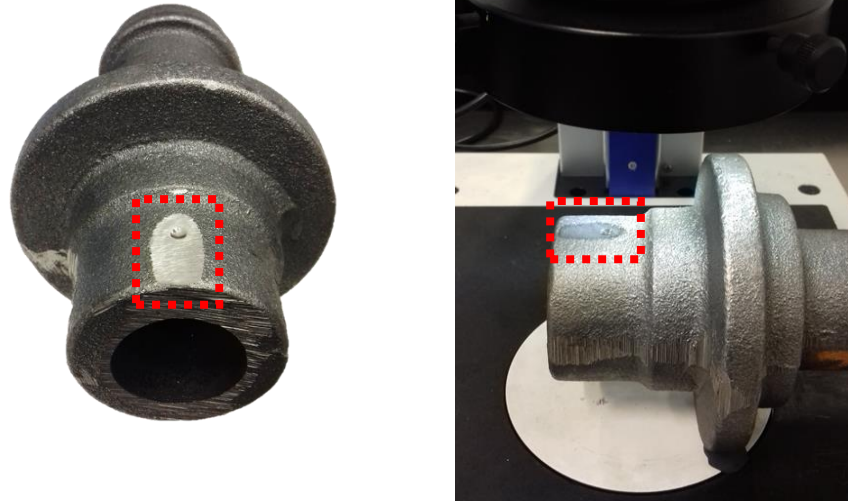


Figura 20. Preparación de superficie plana (“Cope plano”) para evaluar dureza.

La figura 21 muestra los resultados de la comparación entre la dureza superficial (diámetro 64) y la dureza en el núcleo (diámetro 77) de las zonas evaluadas, donde se observa un mejor comportamiento del “Cope plano”.

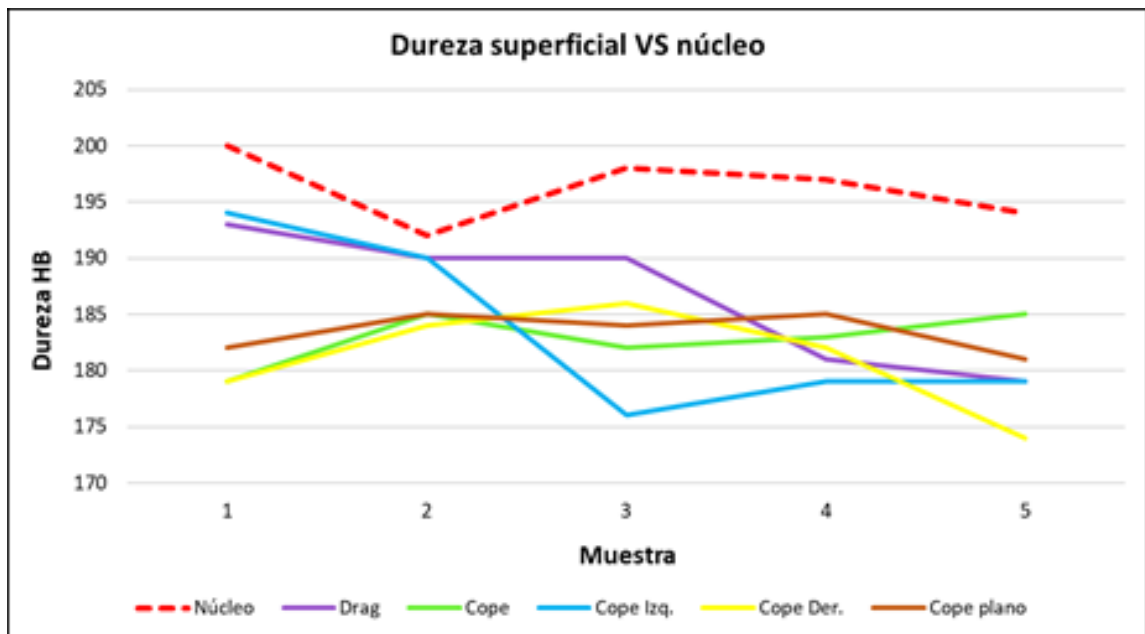


Figura 21. Comparación entre dureza superficial y dureza en núcleo.

Al finalizar esta prueba se encontró que la dureza en el núcleo del diámetro 77 equivale aproximadamente a **1.077** la dureza superficial del diámetro 64 (con el “Cope plano”).

Utilizando este factor de conversión y el mismo método para determinar la dureza, se evaluaron y seleccionaron piezas hasta completar las 45 necesarias para la prueba final en la línea de producción. La figura 22 muestra algunas huellas de dureza de las piezas usadas en la corrida de experimento.

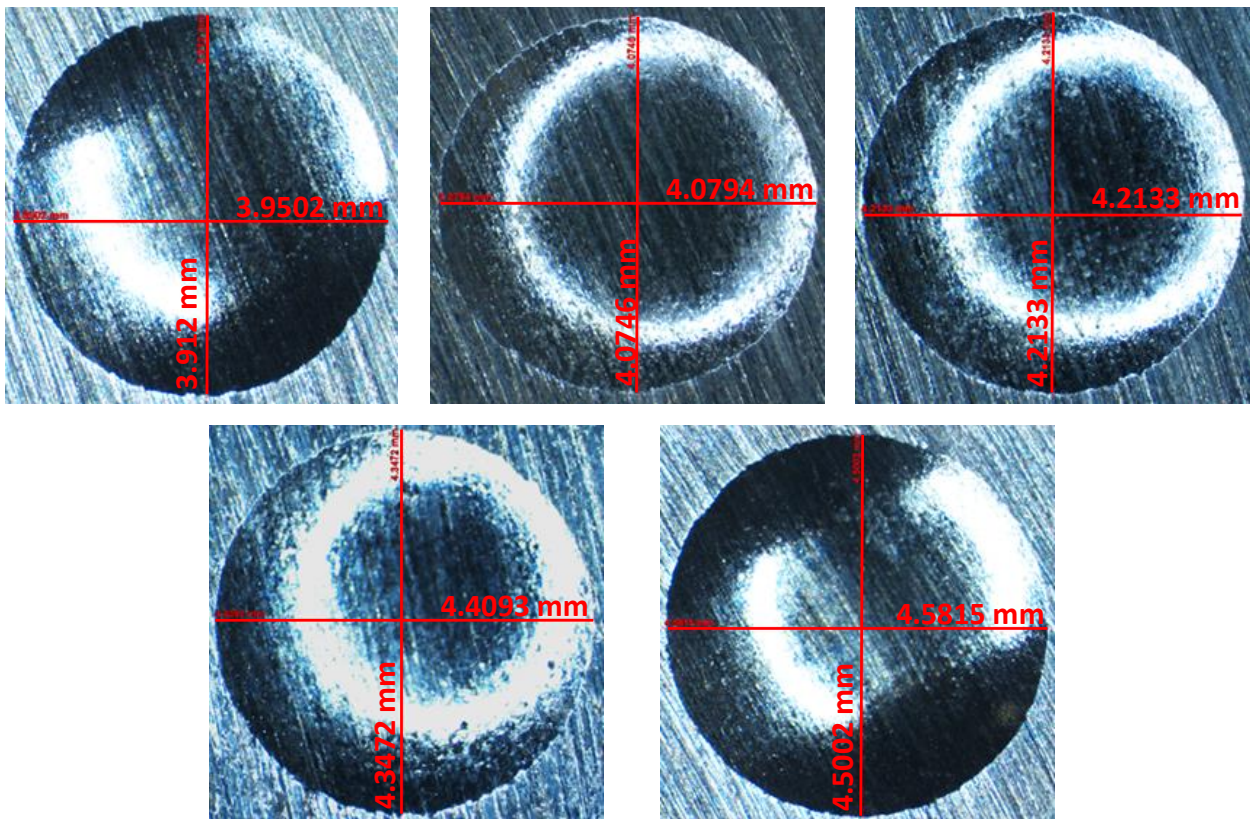


Figura 22. Indentaciones de dureza superficial de algunas piezas usadas en el experimento.

3. Medición de dimensiones iniciales de los diámetros.

Para conocer las dimensiones iniciales de los diámetros “65”, “108”, “77” y “55” (ver figura 16), se usó una máquina de medición de coordenadas marca Zeiss modelo Accura como se muestra en la figura 23.

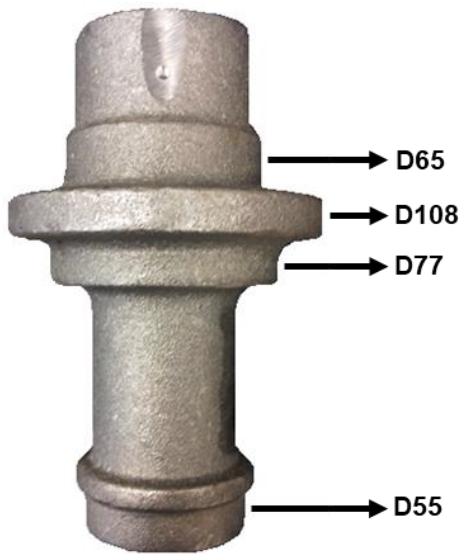


Figura 16. Diámetros evaluados (dimensiones del maquinado)



Figura 23. Máquina CMM usada para medir las dimensiones iniciales de los diámetros.

4. Corrida de experimento (fabricación en línea de producción).

Las 45 piezas usadas en el experimento entraron a la línea de producción en orden de mayor a menor dureza. Antes de entrar a la primera máquina (desbaste y acabado), se midió la temperatura de cada pieza con la ayuda de un termómetro Greisinger GMH3200 como el que se presenta en la figura 24.



Figura 24. Termómetro Greisinger GMH3200.

Para el maquinado de las piezas, se hicieron ajustes de arranque de máquina (10 piezas) y se usaron insertos nuevos cada 15 piezas. Al salir del desbaste y acabado, se midieron los diámetros “65”, “108”, “77” y “55” usando calibradores de presión Mahr Federal Umaxum II como el mostrado en la figura 25. Justo después de esto se volvió a medir la temperatura de la pieza usando el mismo termómetro. También se midió la rugosidad con un rugosímetro Mahr Federal Pocket Surf IV (ver figura 26). La figura 27 muestra la máquina CNC que se utilizó para realizar las operaciones de desbaste y acabado tanto interno como externo.



Figura 25. Calibrador de presión para dimensiones finales de los diámetros.



Figura 26. Rugosímetro Mahr Federal Pocket Surf IV.



Figura 27. CNC usado para el desbaste y acabado.

Posteriormente, las piezas pasaron a la línea de espera de la siguiente máquina, como la mostrada en la figura 28, donde se realizó el estriado. Antes de entrar, se volvió a medir la temperatura de cada pieza. Al salir de esta segunda máquina, se volvieron a medir los cuatro diámetros de interés usando el mismo equipo, y al terminar se midió la temperatura final.



Figura 28. Máquina usada para el estriado.

5. Cálculo de dureza en el núcleo.



Figura 29. Área de corte para evaluación de dureza en núcleo del diámetro 77.

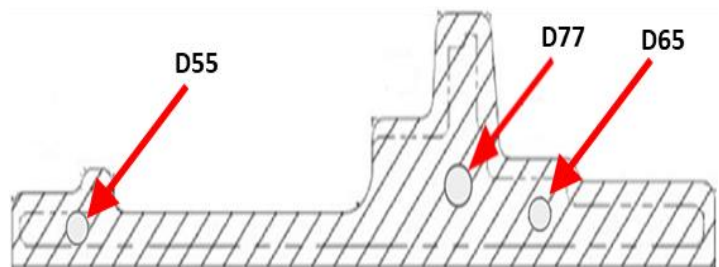


Figura 30. Área para evaluar dureza en el núcleo de cada diámetro.

Para evaluar la dureza en el núcleo de los diámetros “65”, “77” y “55”, se cortó una sección de las piezas y se hizo una indentación con un durómetro LECO modelo LCB3100 (ver figuras 29-32). Para la indentación del diámetro 77 se usó una punta de 10 mm y una carga de 1500 kgf, mientras que para los diámetros 65 y 55 se usó una punta de 2.5 mm y una carga de 187.5 kgf. La huella se midió con un estereoscopio marca Zeiss modelo Discovery V8 (ver figura 33), y se buscó el valor en la norma ASTM “Standard test method for Brinell hardness of metallic materials”

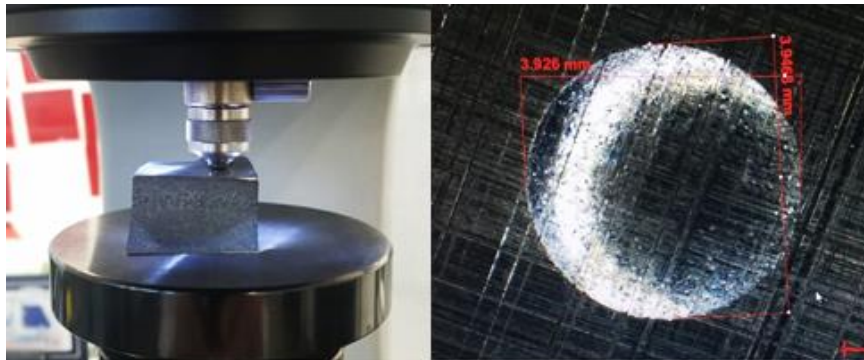


Figura 31. Indentación Brinell de una muestra.



Figura 32. Durómetro LECO LCB3100.



Figura 33. Estereoscopio Zeiss Discovery V8.

6. Medición de composición química.

Para conocer los elementos químicos presentes en el material, se usó el microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM-6010PLUS/LA (ver figura 34). Esta prueba se hizo con las mismas muestras con las que se obtuvo la dureza en el núcleo en 5 piezas diferentes, una de cada grupo de durezas.



Figura 34. Microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM-6010PLUS/LA.

7. Evaluación de microestructura.

Para realizar la metalografía, primero se cortó una parte más pequeña de la muestra donde se evaluó la dureza (D77), de 2 x 2 cm aproximadamente, después se hizo el montaje en baquelita, se lijó en agua con lijas de 180 a 1200 granos y se pulió finamente con alúmina de 0.5 μm para posteriormente observarla en un microscopio Zeiss Axio Vert.A1 (ver figura 35) y obtener el porcentaje de nodularidad y los nódulos/ mm^2 según la tabla de microestructuras de hierro nodular de AFS (Sociedad Americana de Fundición, por sus siglas en inglés) (figura 36). Después se realizó un ataque químico con Nital (4% ácido

nítrico) por alrededor de 5 segundos, se limpió y se volvió a observar en microscopio para determinar el porcentaje de perlita y ferrita usando la misma tabla.



Figura 35. Microscopio Zeiss Axio Vert.A1.

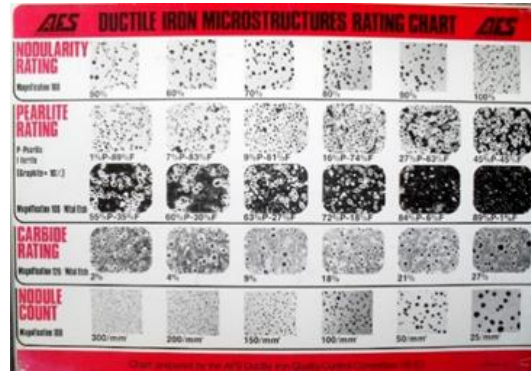


Figura 36. Tabla de microestructuras de hierro nodular AFS.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada variable de interés durante la corrida de experimento.

1. Dimensiones iniciales de los diámetros.

La figura 38 muestra las dimensiones de los cuatro diámetros de interés antes de ser maquinados en donde se observa que el 24.4% de las piezas (11) están dentro de especificación en todos sus diámetros, mientras que el 75.6% (34) cuentan con 1 o más diámetros fuera de tolerancia, y las cavidades 7 y 12 muestran un mejor comportamiento, cumpliendo con los límites de tolerancia establecidos. Una cavidad es el espacio donde se formará la pieza en el molde al vaciar la fundición (ver figura 37).

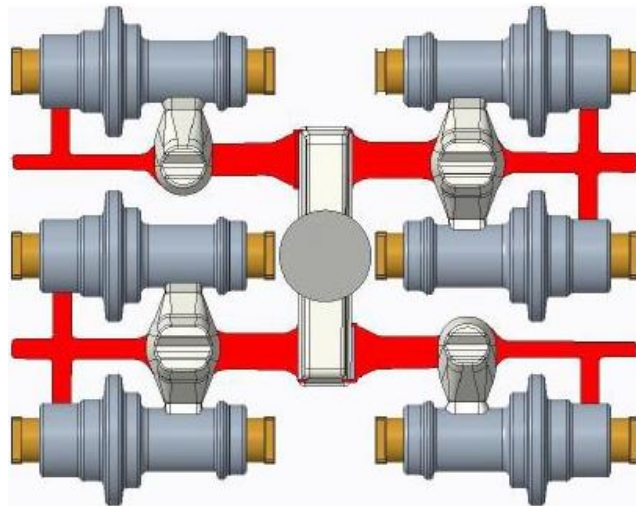


Figura 37. Parte inferior del molde con las 6 cavidades.

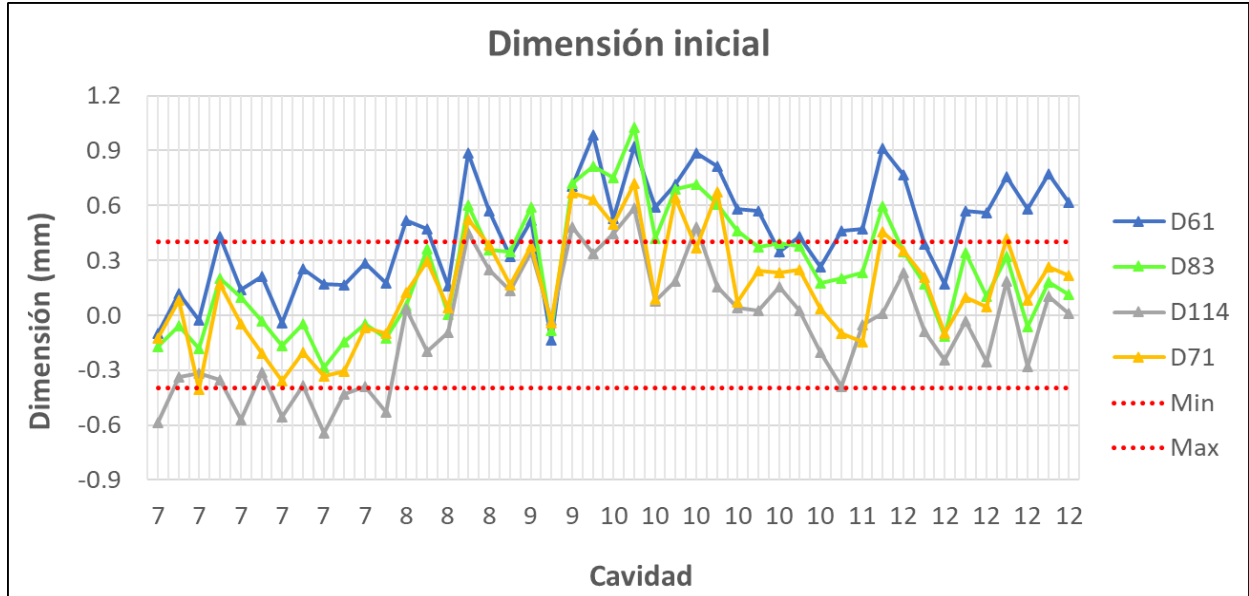


Figura 38. Dimensiones de los diámetros 61 (D55), 83 (D77), 71 (D65) y 114 (D108) de las piezas antes de maquinar (fundición).

La tabla 8 presenta algunos resultados de centralización y dispersión de las dimensiones de estos mismos diámetros.

La dimensión mayor se presentó en el diámetro 83, con un valor de 84.028 mm (1.028 mm), mientras que la dimensión menor la obtuvo el diámetro 114, con un valor de 113.354 mm (-.646 mm). Por otro lado, el diámetro 61 mostró el comportamiento más estable, con una desviación estándar de 0.291 y el diámetro 114 obtuvo la mejor media de todos los diámetros con un valor de 113.944 mm (-0.056 mm).

Tabla 8. Algunos resultados estadísticos de las dimensiones de los diámetros analizados.

	D61	D83	D114	D71
Max	0.985	1.028	0.585	0.720
Min	-0.138	-0.284	-0.646	-0.408
Desv. Est.	0.291	0.319	0.324	0.295
Media	0.455	0.249	-0.056	0.153

2. Dimensiones finales de los diámetros.

La figura 39 muestra la rugosidad de los diámetros 55, 65 y 77, donde se puede observar que la rugosidad aumenta conforme disminuye la dureza (orden en el que se presentan los datos de izquierda a derecha), debido a que un material con menos dureza tiende a desprenderse con mayor facilidad, lo cual provoca irregularidad en el corte (desprendimiento de material), provocando una mayor rugosidad en la superficie, mientras que a una mayor dureza, el resultado final será una superficie más uniforme, por lo tanto, con menor rugosidad.

La figura 40 muestra las dimensiones de los cuatro diámetros de interés después de ser maquinados. El 60% de las piezas (18) están dentro de especificación en todos sus diámetros, mientras que el 40% (12) cuentan con 1 o más diámetros fuera de tolerancia. La tendencia negativa que se observa en cada diámetro se puede explicar por el acomodo de las piezas antes de entrar al maquinado (de mayor a menor dureza).

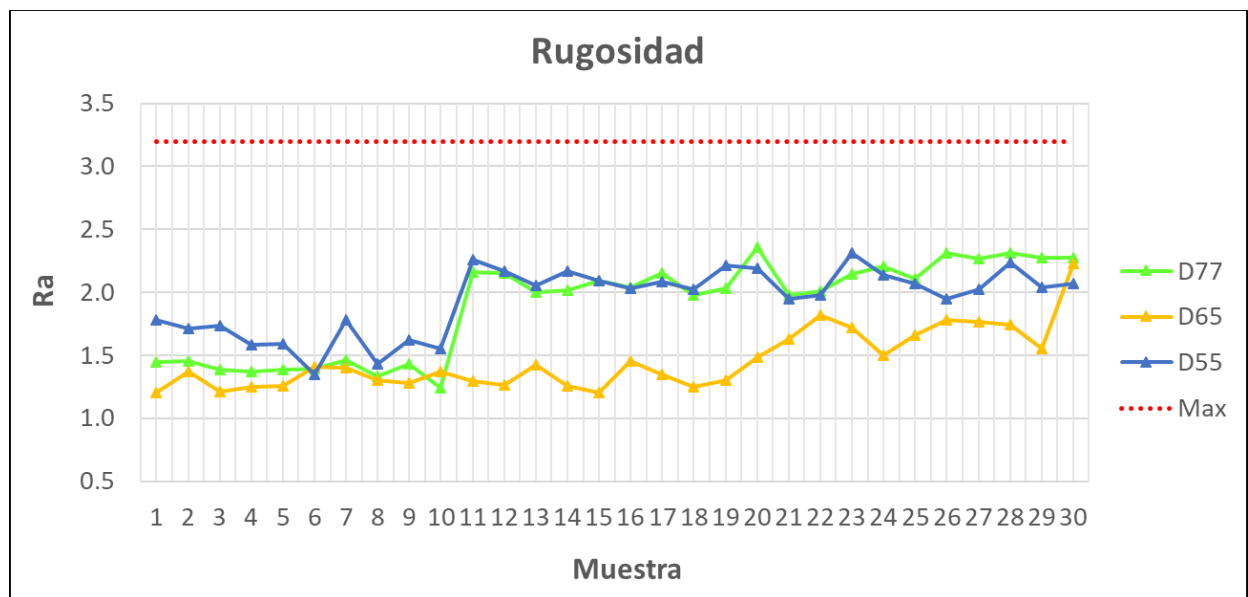


Figura 39. Rugosidad de las piezas después del maquinado (desbaste y acabado).

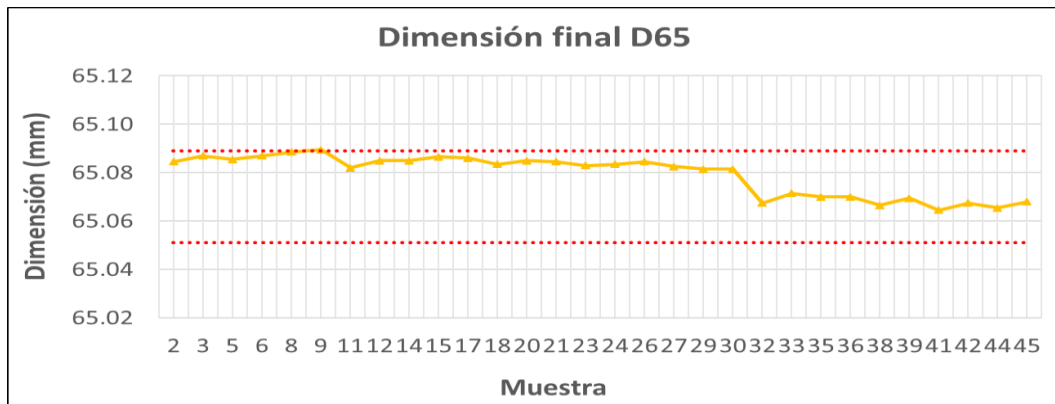
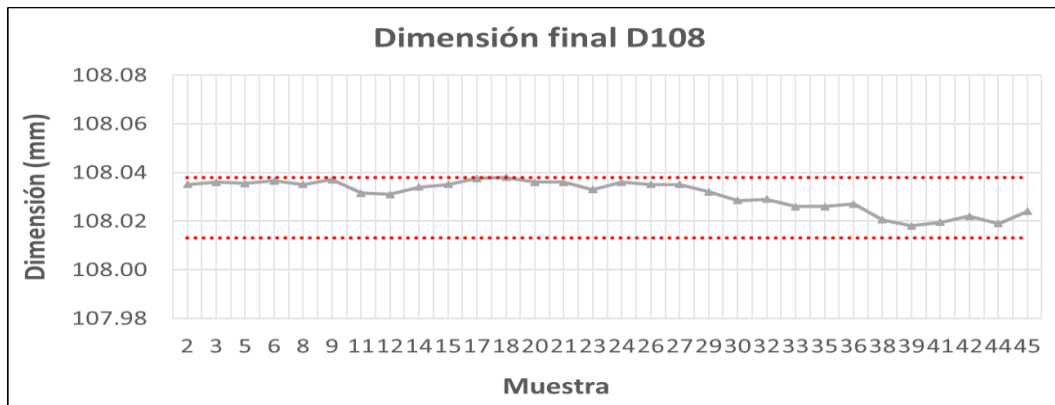
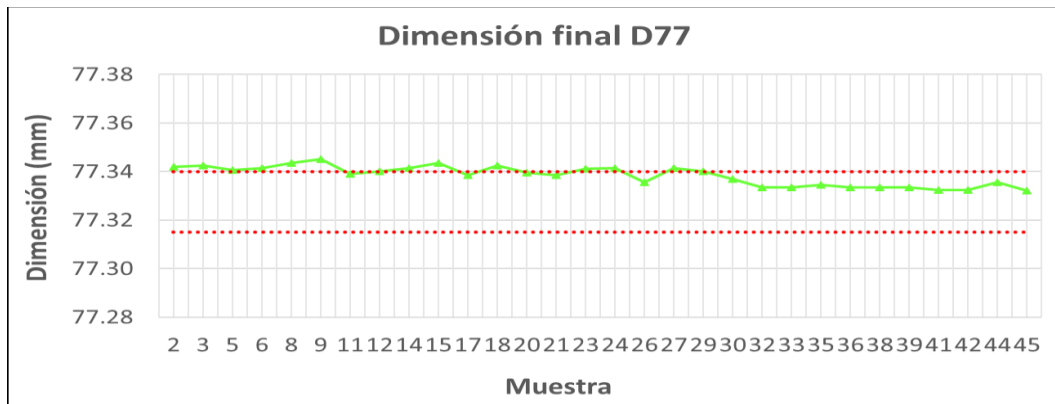
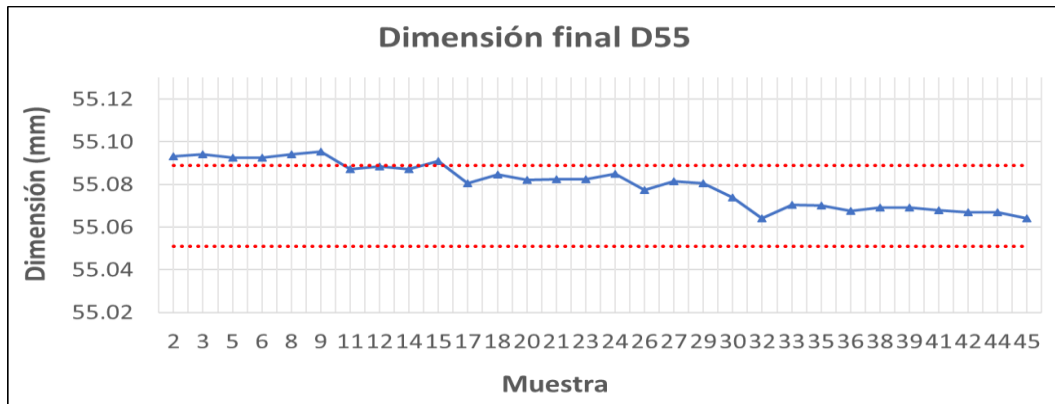


Figura 40. Dimensiones finales de las piezas (después del maquinado).

3. Dureza en el núcleo.

La figura 41 muestra la dureza en el núcleo de los diámetros 65 y 77 donde se puede observar el acomodo de las piezas para la corrida de experimento (de mayor a menor dureza). Se trató de seleccionar piezas que cumplieran con todo el intervalo permitido por la especificación, que va aproximadamente de 185 a 260 HB en el núcleo.

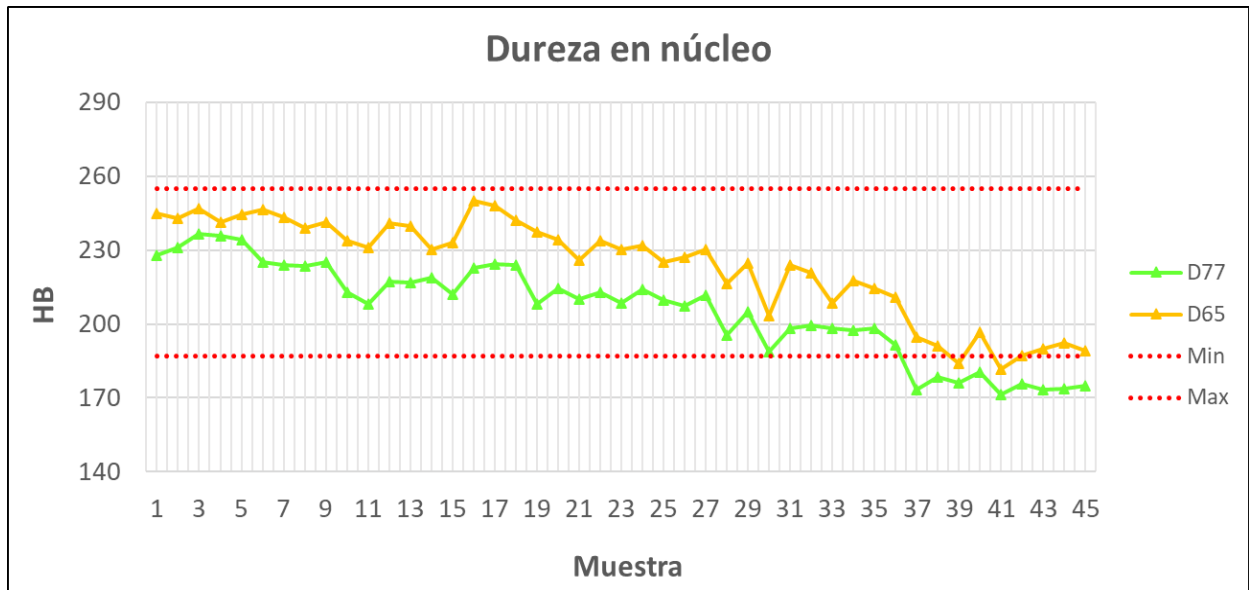


Figura 41. Dureza Brinell en el núcleo de los diámetros 65 y 77.

Los cambios de espesor de pared en toda la pieza son una de las causas de que exista variación en el tiempo de enfriamiento durante la fundición, lo que provoca que la pieza presente diferente dureza en toda su estructura. A mayor tiempo de enfriamiento existe mayor crecimiento de los nódulos, lo que ocasiona una menor cantidad de nódulos por milímetro cuadrado (varios nódulos forman uno solo más grande) y un incremento del contenido de ferrita alrededor del nódulo, y por consecuencia una reducción del contenido de perlita (menor dureza).

4. Temperatura de la pieza.

Tabla 9. Cambio promedio en dimensión y temperatura de los diámetros.

	Estación 1 (Desbaste y acabado)		Estación 2 (Estriado)		Delta (Δ)	
	Dimensión (mm)	Temperatura (°C)	Dimensión (mm)	Temperatura (°C)	Dimensión (mm)	Temperatura (°C)
D55	55.080	29.9	55.083	33.1	0.0029	3.2
D77	77.338		77.339		0.0003	
D108	108.031		108.049		0.0185	
D65	65.079		65.088		0.0091	

La tabla 9 muestra el cambio dimensional y de temperatura en los diámetros de interés. Al aumentar la temperatura 3.2 °C, las dimensiones de los diámetros 55, 65, 77 y 108 aumentan .0029, .0091, .0003 y .0185 milímetros respectivamente.

La figura 42 muestra el comportamiento de las dimensiones finales de los diámetros mientras la temperatura cambia. Se observa que la dimensión de los diámetros aumenta, en mayor o menor cantidad, conforme aumenta la temperatura, lo que es de esperarse, por la dilatación del material.

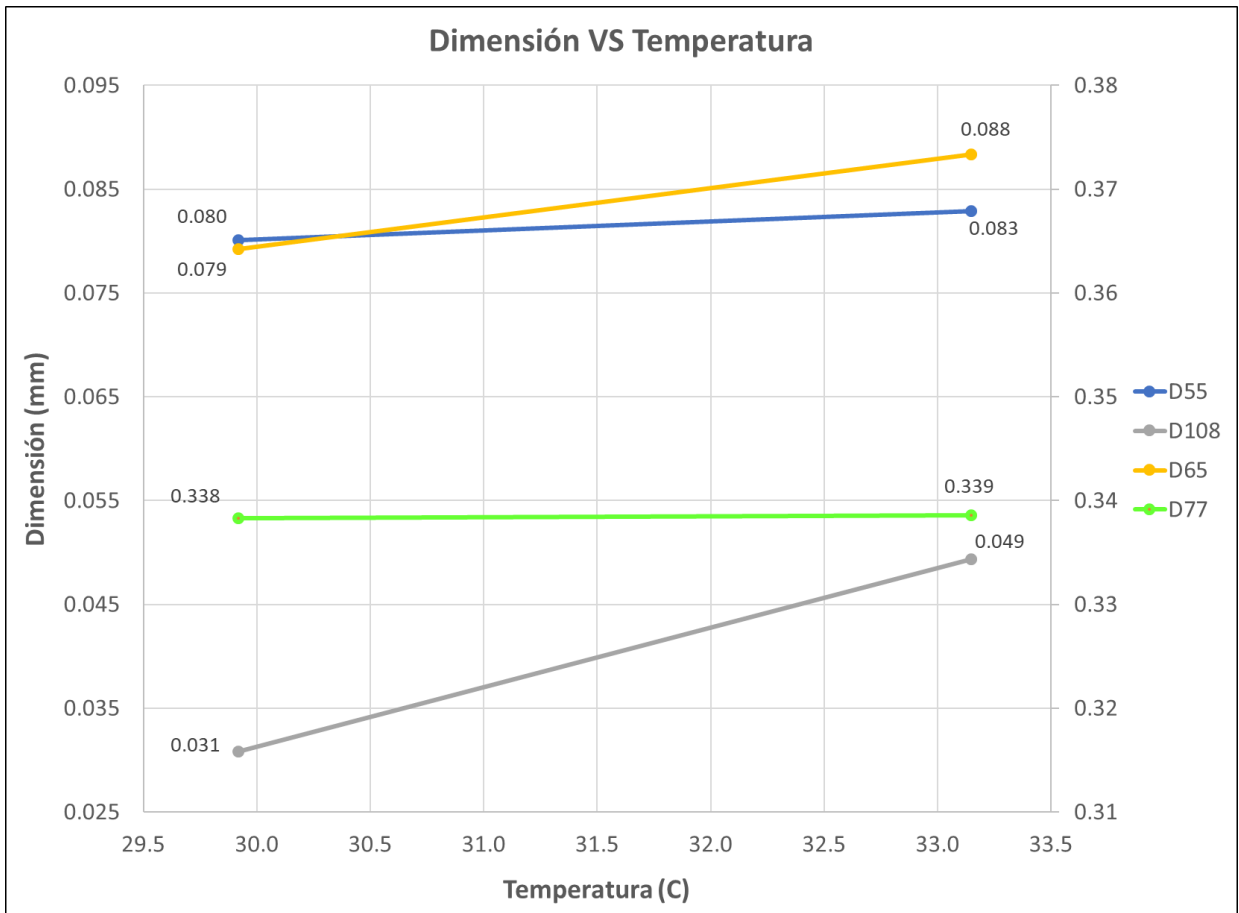


Figura 42. Cambio promedio en dimensión y temperatura de los diámetros.

La figura 43 muestra la relación entre las dimensiones de los diámetros y la temperatura de la pieza. Con el mismo aumento de temperatura ($3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) cada diámetro tiene un comportamiento dimensional diferente debido a la variación del espesor de pared en toda la pieza, es decir, mientras mayor sea el espesor de pared del diámetro, se espera que exista menos dilatación causada por la temperatura por lo que su variación dimensional será menor a comparación de un diámetro con menor espesor de pared.

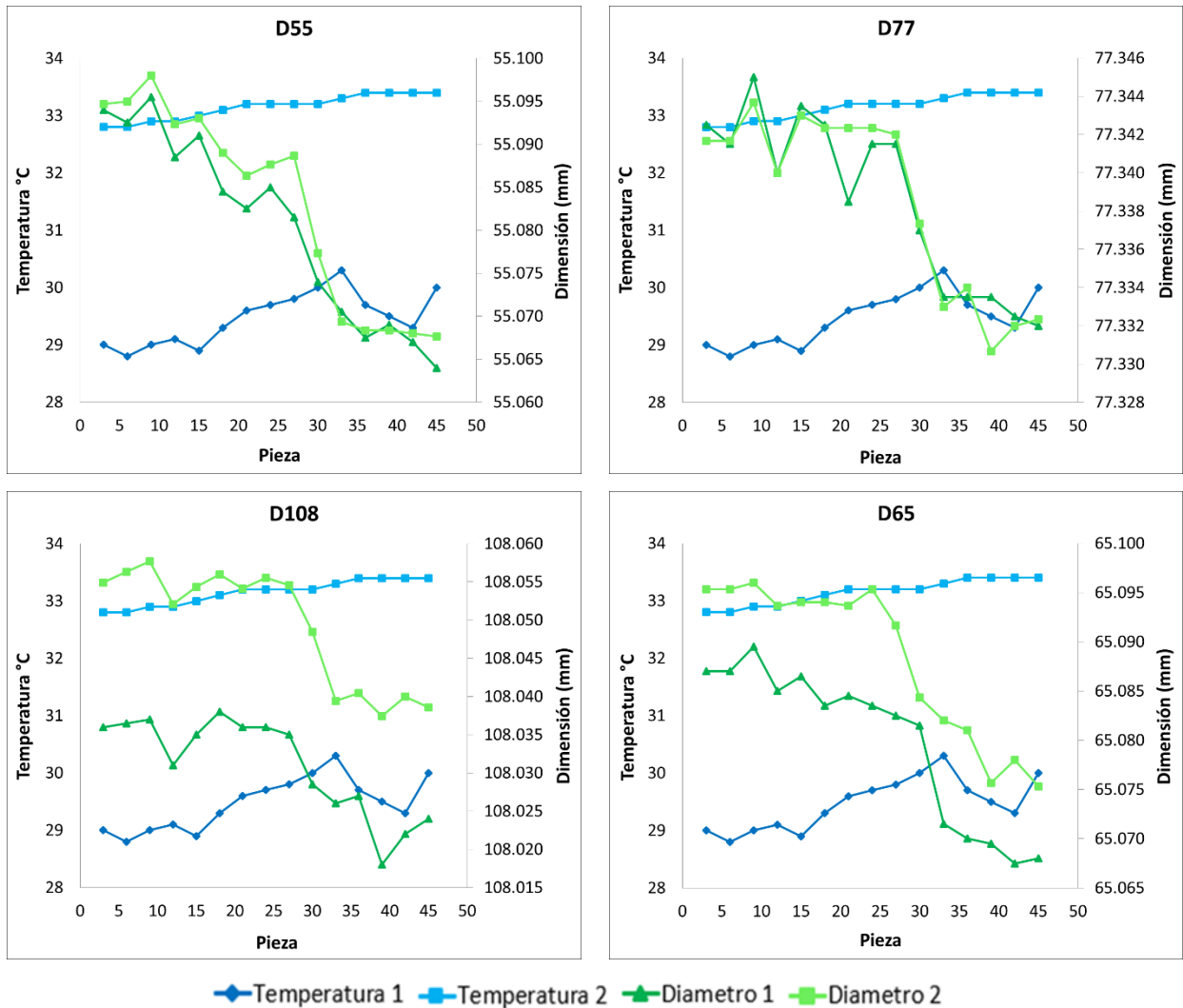


Figura 43. Cambio promedio en dimensión y temperatura de los diámetros.

5. Composición química de las piezas.

La figura 44 muestra la concentración de los principales elementos químicos en las piezas del experimento. Se puede observar que, al disminuir la dureza de 237 a 171 HB, la concentración de P, S, Mn y Cu disminuye en mayor o menor cantidad dependiendo del elemento, mientras que la concentración de Mg y Ni aumenta. Por otro lado, la concentración de C y Si se mantiene estable en el mismo rango de dureza.

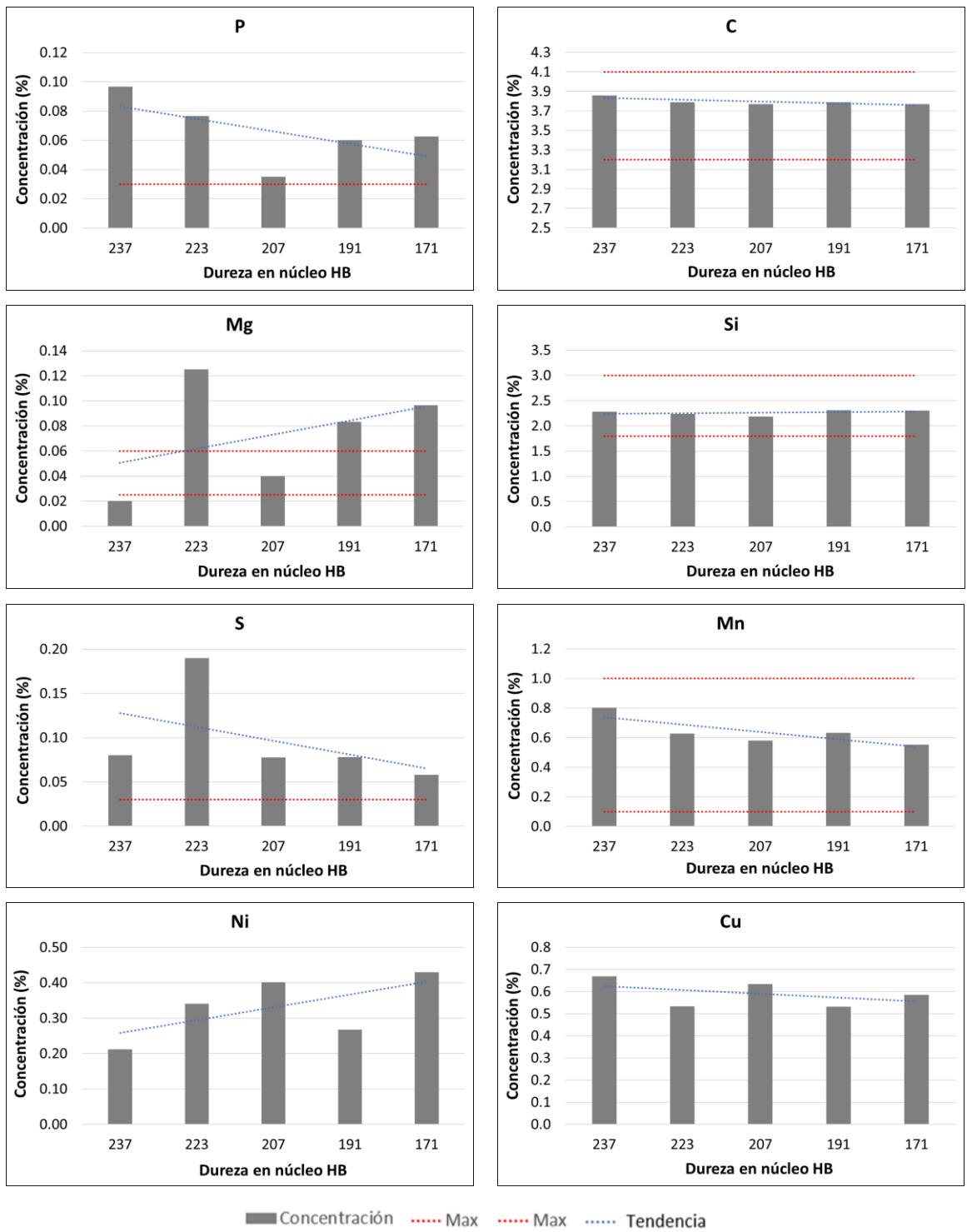


Figura 44. Concentración de los principales elementos químicos.

Considerando las tolerancias de la especificación, los elementos P, Mg y S, muestran concentraciones arriba de los límites permitidos (.03%, .06% y .03% respectivamente), mientras que la concentración de C, Si y Mn se mantienen dentro.

6. Microestructura de las piezas.

En la figura 45 se presentan las características de los nódulos para cada grupo de dureza, como el total de nódulos, su tamaño, y el área que ocupan, siendo este último el que engloba los dos primeros. Por lo tanto, la relación que existe entre dureza y nódulos se puede explicar con el porcentaje de área que ocupan los nódulos, es decir, a mayor porcentaje de área ocupada por nódulos, menor la dureza del material, y a menor porcentaje de área ocupada por nódulos, mayor la dureza del material.

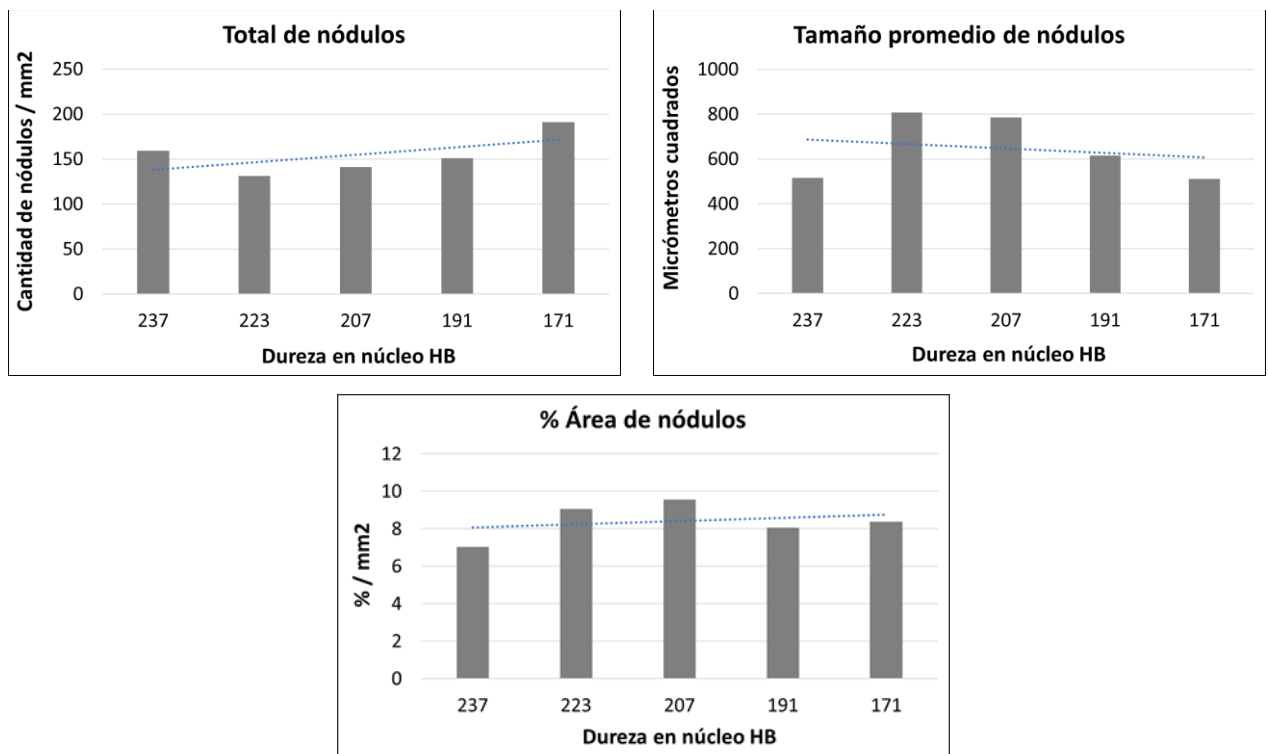


Figura 45. Información de los nódulos por grupo de dureza.

La figura 46 muestra los porcentajes de ferrita y perlita según el grupo de dureza. A menor dureza mayor porcentaje de ferrita, y por consecuencia, a mayor dureza mayor porcentaje de perlita.

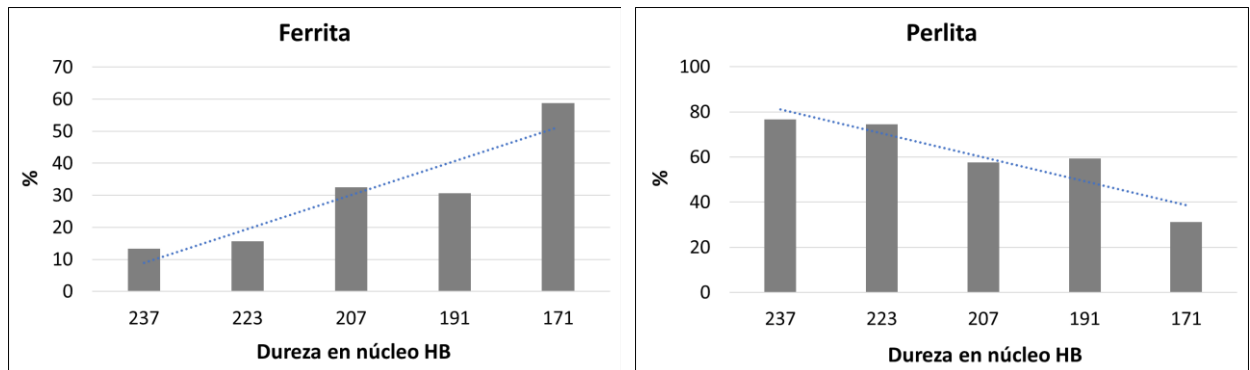


Figura 46. Porcentaje de perlita y ferrita para cada grupo de dureza.

La figura 47 muestra la microestructura de piezas con diferentes durezas que van desde 237 hasta 171 HB en el núcleo (diámetro 77). Debido al contenido de carbono presente en los nódulos, estos se caracterizan por aportar baja dureza al material, por lo que, a mayor cantidad de nódulos la dureza disminuye, y a menor cantidad de nódulos la dureza aumenta.

En resumen, la dureza del hierro nodular, está directamente relacionada con su microestructura, la cual depende de algunas variables como la composición química y la velocidad de enfriamiento durante su fundición. De aquí, se obtendrán en gran parte las características deseadas de los nódulos (porcentaje, tamaño y forma) y la matriz (ferrita y perlita).

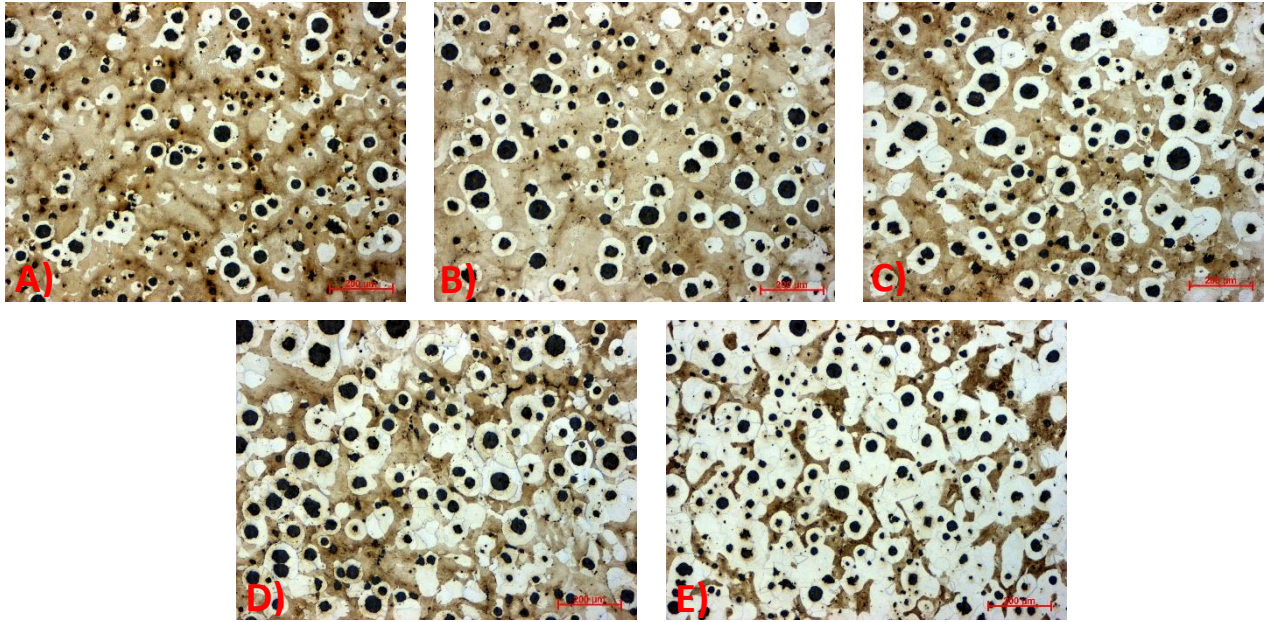


Figura 47. Microestructuras de algunas piezas usadas en el experimento. A) Pieza 3 con 237 HB. B) Pieza 16 con 223 HB. C) Pieza 26 con 207 HB. D) Pieza 36 con 191 HB. E) Pieza 41 con 171 HB.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

1. Las cavidades 7 y 12 muestran el mejor comportamiento dimensional, cumpliendo con los límites de tolerancia establecidos (± 0.4 mm). Los diámetros con menor variación en estas dos cavidades fueron el D114 (± 0.12 mm) y el D71 (± 0.16 mm) respectivamente.
2. Las dimensiones finales de la pieza (después del maquinado) están relacionadas principalmente con la dureza del material y con los cambios de temperatura que esta sufre después del maquinado, aunque también en menor grado a sus dimensiones iniciales (fundición).
3. La pieza presenta diferente dureza en toda su estructura, debido principalmente a la variación en el tiempo de enfriamiento que existe por el cambio en el espesor de pared en toda la pieza. El diámetro con mayor dureza en núcleo es el "65" seguido del "77", con un espesor de pared aproximado de 10 y 16 mm respectivamente.
4. La dureza en el núcleo del diámetro 77 equivale aproximadamente a **1.077** la dureza superficial del diámetro 64 (con el "Cope plano").
5. La dureza del hierro nodular está directamente relacionada con su microestructura, la cual depende de algunas variables como la composición química y la velocidad de enfriamiento durante su fundición. De aquí, se obtienen en gran parte las características deseadas de los nódulos (porcentaje, tamaño y forma) y la matriz (ferrita y perlita). Debido al contenido de carbono presente en los nódulos, estos se caracterizan por aportar baja dureza al material, por lo que, a mayor área ocupada por nódulos, menor

la dureza del material, y viceversa. Mientras que, a mayor porcentaje de ferrita, menor porcentaje de perlita y por consecuencia menor dureza, y viceversa.

6. Las dimensiones finales de los diámetros 55, 65, 77 y 108 aumentan 0.89, 2.83, 0.08 y 5.73 micrómetros respectivamente, al aumentar 1 °C la temperatura de la pieza después del maquinado.
7. La rugosidad aumenta conforme disminuye la dureza debido a que un material con menos dureza tiende a desprenderse con mayor facilidad, lo cual provoca irregularidad en el corte (desprendimiento de material), provocando una mayor rugosidad en la superficie, mientras que, a una mayor dureza, el resultado final será una superficie más uniforme, por lo tanto, con menor rugosidad. En este caso, la rugosidad superficial de la pieza muestra un comportamiento aceptable (dentro de tolerancia) cuando la dureza del material ronda los 158 y 250 HB.

Esta tesis ayudó a comprender de mejor manera el maquinado de una pieza de hierro nodular. Con esto se desarrolla conocimiento que ayuda a mejorar el nivel tecnológico de la industria traduciéndose en mejor calidad tanto del producto como del proceso y obteniendo como resultado mayores ganancias. Por la parte científica, el presente estudio puede servir como referencia a futuras investigaciones que traigan consigo sus propios beneficios y aportes, contribuyendo al final al mismo objetivo, creando un círculo virtuoso de progreso.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nayyar, V., Kaminski, J., Kinnander, A. & Nyborg, L.. (2012). An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations. *SciVerse ScienceDirect*, 1, pp. 1-6.
2. Callister, W.. (2006). *Applications and Processing of Metal Alloys*. Materials Science and Engineering-An Introduction. pp. 358-411. Estados Unidos de América. John Wiley & Sons, Inc.
3. Huerta, L., Hurtado, E., Alvarez, M. & Pérez, P.. (2016, noviembre 23). Forming process using austempered ductile iron (ADI) in an automotive Pitman arm. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-7.
4. Alves, P., Silva, E., Luiz, W. & Rocha, A.. (2013, abril 2). Comparative study of the machinability of austempered and pearlitic ductile irons in drilling process. *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1, pp. 1-8.
5. Costa, N., Machado, N. & Silva, S.. (2008, marzo 7). Influence of graphite nodules geometrical features on fatigue life of high-strength nodular cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17, pp. 1-11.
6. Kruthiventi, S., Basavakumar, K., Nambala, S. & Subramanyacharyulu.. (2014, marzo 8). Influence of heat treatment on microstructural and mechanical properties of nodular cast iron. *The Institution of Engineers*, 1, pp. 1-5.
7. Kumar, K., Hariharan, P., Venkateshwaran, P. & Tamilarasan, S.. (2015, julio 14). Examination of microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron

- (ADI) as per austempering temperature and time. *The Indian Institute of Metals*, 1, pp. 1-5.
8. Suslov, A. & Kats, I.. (2002, agosto 7). Production of hot-worked bars and tubes of nodular cast iron. *Central Scientific Research Institute of Ferrous Metallurgy*, 46, pp. 1-3.
 9. Ozdemir, N. & Ozek, C.. (2005, mayo 18). An investigation on machinability of nodular cast iron by WEDM. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-4.
 10. Martini, L., Lopes, J., Silveira, R., Diniz, A., Moreira, R., Aguiar, P., Mello, H. & Bianchi, E.. (2018, junio 9). Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-13.
 11. Batista, R., Silveira, M., Pereira, M., Souza, B., Ribeiro, L., Bianchi, E. & Rocha, A.. (2018, agosto 28). A surface and sub-surface quality evaluation of three cast iron grades after grinding under various cutting conditions. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-14.
 12. Grzesik, W., Kiszka, P., Kowalczyk, D., Rech, J. & Claudin, Ch.. (2012). Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools. *SciVerse ScienceDirect*, 1, pp. 1-5.
 13. Winiczenko, R., Kaczorowski, M. & Skibicki, A.. (2018, junio 14). The microstructures, mechanical properties, and temperature distributions in nodular cast iron friction-welded joint. *The Author(s)*, 1, pp. 1-15.
 14. Zanardi, F., Bonollo, F., Angella, G., Bonora, N., Iannitti, G. & Ruggiero A.. (2017). A contribution to new material standards for ductile irons and austempered ductile irons. *International journal of metalcasting*, 11, pp. 1-12.

15. Fatahalla, N., Abd, H., Abo, A. & Mohamed, M.. (1996). Effect of the percentage carbon equivalent on the nodule characteristics, density and modulus of elasticity of ductile cast iron. *Journal of materials science*, 31, pp. 1-5.
16. (2019, diciembre). Modern casting. *The American Foundry Society*, pp. 24-25.
17. Sousa, J., Falco, W. & Machado, A.. (2017, septiembre 29). A review on the machining of cast irons. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-20.
18. Sousa, J., Falco, W., Guessier, W. & Machado, A.. (2018, julio 11). Machinability of rectangular bars of nodular cast iron produced by continuous casting. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-13.
19. Seker, U., Ciftci, I. & Hasirci, H.. (2002, septiembre 23). The effect of alloying elements on surface roughness and cutting forces during machining of ductile iron. *SciVerse ScienceDirect*, 24, pp. 1-5.
20. Carazo, F.. (2017, julio 20). Regarding the paper “Stable eutectoid transformation in nodular cast iron: modeling and validation. *Metallurgical and materials transactions*, 48, pp. 1-2.
21. Nan, L., Shu-ming, X. & Pei-wei, B.. (2012, marzo 2). Microstructure and mechanical properties of nodular cast iron produced by melted metal die forging process. *Journal of Iron and Steel Research*, 20, pp. 1-5.
22. Eiken, J. & Böttger, B.. (2018, septiembre 20). A multi-phase-field approach for solidification with nonnegligible volumetric expansion—application to graphite growth in nodular cast iron. *The Indian Institute of Metals*, 1, pp. 1-5.
23. Zheng, J., Zuo, H., Zhang, J. & Li, F.. (2015). Thermal test of nodular cast iron cooling stove. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1, pp. 1-6.

24. Tadesse, A. & Fredriksson, H.. (2018, marzo 6). On the solidification and structure formation during casting of large inserts in ferritic nodular cast iron. *Metallurgical and materials transactions*, 49, pp. 1-13.
25. Carazo, F., Dardati, P., Celentano, D. & Godoy, L.. (2012, agosto 21). Thermo-metallurgical modeling of nodular cast iron cooling process. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 43, pp. 1-17.
26. Campbell, J.. (2009, septiembre 1). A hypothesis for cast iron microstructures. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 40, pp. 1-16.
27. Chaengkham, P. & Srichandr, P.. (2011, marzo 13). Continuously cast ductile iron: processing, structures, and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 1, pp. 1-7.
28. Neri, M. & Carreño, C.. (2003, septiembre 7). Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of a modified nodular iron. *Materials characterization*, 51, pp. 1-6.
29. Rosario, S., Villacorta, H., Falconi, V., Rengifo, W. & Martinez, M.. (2011, diciembre 9). Influencia del cobre en la transformación gamma alfa en la fundición gris y nodular - templabilidad. *UNMSM*, 1, pp. 1-12.
30. Pirs, J. & Zalar, A.. (1985, junio 1). Some results of investigations into relationships between a few elements of nodular graphite cast iron and nodular graphite. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-15.
31. Nadarevic, D. & Sokovic, M.. (2013, abril 3). The influence of the carbon content on the machinability of sintered valve plates. *Metalurgija*, 52, pp. 1-3.

32. Zou, J., Shimizu, K. & Cai, Q.. (2014, junio 30). Effects of Cr content and annealing temperature on microstructure and wear characteristics of cast ausferrite nodular iron. *Journal of iron and steel research*, 22, pp. 1-6.
33. Cemal, M. & Isik, Y.. (2007, abril 30). Investigating the machinability of austempered ductile irons having different austempering temperatures and times. *Materials and Design*, 29, pp. 1-6.
34. Meena, A., Mansori, M. & Ghidossi, P.. (2010). Machinability of austempered ductile iron (ADI) produced by integrated green technology of continuous casting-heat. *American Institute of Physics*, 1, pp. 1-7.
35. Cemal, M., Bayram, A., Isik, Y. & Salar, B.. (2005, julio 1). The effects of austempering temperature and time onto the machinability of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering*, 1, pp. 1-7.
36. Zhao, X., Jing, T., Gao, Y., Qiao, Y., Zhou, J. & Wang, W.. (2004). Morphology of graphite in hot-compressed nodular iron. *Journal of materials science*, 39, pp. 1-4.
37. Gil, A., Fernandez, J., Castillo, E., Arizmendi, M. & Veiga, F.. (2013, junio 16). Monitoring of thread quality when tapping nodular cast iron with TiN-coated HSS cutting taps. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-10.
38. Soshi, M., Fonda, P., Kashihara, M., Yonetani, H. & Yamazaki K.. (2012, junio 23). A study on cubic boron nitride (CBN) milling of hardened cast iron for productive and quality manufacturing of machine tool structural components. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-7.
39. Vasconcelos, M., Melo, D. & Oliveira, J.. (2012, noviembre 10). An analysis of the machinability of ASTM grades 2 and 3 austempered ductile iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, pp. 1-14.

40. Pereira, I., Silva, M., Fernandes, D. & Falco, W.. (2015, junio 28). Analysis of tapping process in three types of cast iron. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-8.
41. Janowak, J.. (1986, julio 3). Cast iron metallurgy for improved machinability. *Journal of applied metalworking*, 4, pp. 1-7.
42. Meena, A. & Mansori, M.. (2011, julio 7). Drilling performance of green austempered ductile iron (ADI) grade produced by novel manufacturing technology. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-11.
43. Sinlah, A., Handayani, D., Voigt, R., Hayrynen, K., Saoubi, R. & Saldana, C.. (2015, agosto 4). Effects of microstructure and strength on wear performance in rough milling of austempered ductile iron. *International journal of cast metals research*, 1, pp. 1-6.
44. Seker, U. & Hasan Hasirci.. (2005, mayo 1). Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surfaces quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 173, pp. 1-9.
45. Arft, M., Klocke, F. & Lung, D.. (2012). Evaluation of the machining aspects of austempered ductile iron. *International journal of metalcasting*, 1, pp. 1-8.
46. Aslantas, K., Uzun, I. & Gök, K.. (2008, septiembre 11). Evaluation of the performance of CBN tools when turning austempered ductile iron material. *Journal of manufacturing science and engineering*, 130, pp. 1-5.
47. Grum, J. & Kisin, M.. (2003, julio 9). Influence of microstructure on surface integrity in turning—part II: the influence of a microstructure of the workpiece material on cutting forces. *International journal of machine tools & manufacture*, 43, pp. 1-7.

48. Liu, J., Yamazaki, K., Ueda, H., Narutaki, N. & Yamane, Y.. (2002, noviembre). Machinability of pearlitic cast iron with cubic boron nitride (CBN) cutting tools. *Journal of manufacturing science and engineering*, 124, pp. 1-13.
49. Grzesik, W., Rech, J., Zak, K. & Claudin, C.. (2008, noviembre 5). Machining performance of pearlitic-ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools. *International journal of machine tools & manufacture*, 49, pp. 1-9.
50. Priarone, P., Robiglio, M. & Settineri, L.. (2015, junio 13). Milling of austempered ductile iron (ADI) with recycled carbide tools. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-7.
51. Sporka, M. & Czanova, T.. (2012). New knowledges at machining of improving highstrength graphite cast iron by drilling. *Acta technica corviniensis-bulletin of engineering*, 1, pp. 1-3.
52. Stets, W., Löblich, H., Gassner, G. & Schumacher, P.. (2014). Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application. *International journal of metalcasting*, 8, pp. 1-6.
53. Akdemir, A., Yazman, S., Saglam, H. & Uyaner, M.. (2012, marzo 30). The effects of cutting speed and depth of cut on machinability characteristics of austempered ductile iron. *Journal of manufacturing science and engineering*, 134, pp. 1-10.
54. Bhople, N., Patil, N. & Mastud, S.. (2018). The experimental investigations into dry turning of austempered ductile iron. *Procedia manufacturing*, 20, pp. 1-6.
55. Avishan, B., Yazdani, S. & Jalali, D.. (2009, mayo 19). The influence of depth of cut on the machinability of an alloyed austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering*, 523, pp. 1-6.

56. Sekulic, M., Jurkovic, Z., Hadzistevic, M. & Gostimirovic, M.. (2009, diciembre 20). The influence of mechanical properties of workpiece material on the main cutting force in face milling. *Metalurgija*, 49, pp. 1-4.
57. Namdev, S. & Pawade, R.. (2018). Effect of machining environment on turning performance of austempered ductile iron. *Journal of manufacturing science and engineering*, 1, pp. 1-17.
58. Shukla, P., Sangal, S. & Basu, B.. (2008, febrero 5). An experimental study on interaction of nodular cast iron with CRT glass. *Indian Institute of Technology*, 61, pp. 1-8.
59. Guillemer, C., Feaugas, X. & Clavel, M.. (2000, diciembre). Mechanical behavior and damage kinetics in nodular cast iron: Part I. Damage mechanisms. *Metallurgical and materials transactions*, 31, pp. 1-12.
60. Wilk, D., Regulski, K. & Gumienny, G.. (2016, marzo 9). Comparative analysis of the properties of the nodular cast iron with carbides and the austempered ductile iron with use of the machine learning and the support vector machine. *Springer Verlag*, 1, pp. 1-17.
61. Kovacs, B.. (2013, octubre). Development of austempered ductile iron (ADI) for automobile crankshafts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, pp. 1-6.
62. Gil, A., Diéguez, P., Arizmendi, M. & Estrems, M.. (2015). Experimental study of tapping wear mechanisms on nodular cast iron. *Procedia engineering*, 132, pp. 1-7.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción anual de automóviles en el mundo (OICA. www.oica.net)	3
Figura 2. Producción anual de automóviles en México (OICA. www.oica.net)	3
Figura 3. Índice de costo de manufactura en autopartes de KPMG (www.kpmg.com)	4
Figura 4. Algunos componentes de una transmisión	5
Figura 5. Microestructura del hierro nodular [1]	6
Figura 6. Microestructura según el tratamiento térmico [2]	7
Figura 7. Comparación de capacidad de amortiguamiento [17]	11
Figura 8. Ejemplo de formación del "BUE"	12
Figura 9. Comparación de fuerza y velocidad de corte en el maquinado de hierro nodular con diferentes herramientas cerámicas [17]	13
Figura 10. Comportamiento de la rugosidad a lo largo de la longitud de corte durante el maquinado de un hierro nodular (246 HB) usando diferentes herramientas cerámicas [17]	15
Figura 11. Desgaste del flanco de la herramienta vs la velocidad de corte en el torneado de un hierro nodular (246 HB) con herramientas cerámicas [17]	19
Figura 12. Muestra de hierro nodular usada en la investigación. a) Dimensiones y b) regiones evaluadas [18]	20
Figura 13. Microestructura de las 3 regiones de la pieza evaluada [18]	21
Figura 14. Microestructuras de las muestras de hierro nodular [19]	23
Figura 15. a) Variación de la fuerza de corte en cada muestra de hierro nodular, b) Variación de la rugosidad superficial en cada muestra de hierro nodular [19]	24
Figura 16. Diámetros evaluados (dimensiones del maquinado)	25
Figura 17. Etapas del proceso donde se midieron las variables de interés	27
Figura 18. Método para evaluar dureza en el diámetro de 64 mm	28

Figura 19. Zonas y diámetros para evaluación de dureza	28
Figura 20. Preparación de superficie plana para evaluar dureza	30
Figura 21. Comparación entre dureza superficial y dureza en núcleo	30
Figura 22. Indentaciones de dureza superficial de algunas piezas usadas en el experimento	31
Figura 23. Máquina CMM usada para medir las dimensiones iniciales de los diámetros	32
Figura 24. Termómetro Greisinger GMH3200	32
Figura 25. Calibrador de presión para dimensiones finales de los diámetros	33
Figura 26. Rugosímetro Mahr Federal Pocket Surf IV	33
Figura 27. CNC usado para el desbaste y acabado	33
Figura 28. Máquina usada para el estriado	34
Figura 29. Área de corte para evaluación de dureza en núcleo del diámetro 77	34
Figura 30. Área para evaluar dureza en el núcleo de cada diámetro	34
Figura 31. Indentación Brinell de una muestra	35
Figura 32. Durómetro LECO LCB3100	35
Figura 33. Estereomicroscopio Zeiss Discovery V8	35
Figura 34. Microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM-6010PLUS/LA	36
Figura 35. Microscopio Zeiss Axio Vert.A1	37
Figura 36. Tabla de microestructuras de hierro nodular AFS	37
Figura 37. Parte inferior del molde con las 6 cavidades	38
Figura 38. Dimensiones de los diámetros 61 (D55), 83 (D77), 71 (D65) y 114 (D108) de las piezas antes de maquinar (fundición)	39
Figura 39. Rugosidad de las piezas después del maquinado (desbaste y acabado)	40
Figura 40. Dimensiones finales de las piezas (después del maquinado)	41

Figura 41. Dureza Brinell en el núcleo de los diámetros 65 y 77	42
Figura 42. Cambio promedio en dimensión y temperatura de los diámetros	44
Figura 43. Cambio promedio en dimensión y temperatura de los diámetros	45
Figura 44. Concentración de los principales elementos químicos	46
Figura 45. Información de los nódulos por grupo de dureza	47
Figura 46. Porcentaje de perlita y ferrita para cada grupo de dureza	48
Figura 47. Microestructuras de algunas piezas usadas en el experimento. A) Pieza 3 con 237 HB. B) Pieza 16 con 223 HB. C) Pieza 26 con 207 HB. D) Pieza 36 con 191 HB. E) Pieza 41 con 171 HB	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición elemental del hierro nodular	6
Tabla 2. Propiedades mecánicas del hierro nodular [2]	7
Tabla 3. Efectos de algunos elementos en las fundiciones de hierro [17]	10
Tabla 4. Propiedades de algunas fundiciones de hierro [17]	11
Tabla 5. Información relevante de las 3 regiones de la muestra de hierro nodular usada para la investigación [18]	20
Tabla 6. Composición química de las muestras de hierro nodular [19]	22
Tabla 7. Propiedades mecánicas, fuerzas de corte y rugosidad superficial de las muestras de hierro nodular [19]	23
Tabla 8. Algunos resultados estadísticos de las dimensiones de los diámetros analizados	39
Tabla 9. Cambio promedio en dimensión y temperatura de los diámetros	43