

Universidad de Moa

Dr. "Antonio Núñez Jiménez"

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia

Especialidad: Metalurgia y Materiales

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

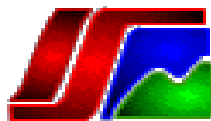
INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

Selección de aleación para tamboras de freno de ómnibus Yutong

Martín Pupo Pupo

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"



Universidad de Moa
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia
Especialidad: Metalurgia y Materiales

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

Título: Selección de aleación para tambores de freno de
ómnibus Yutong

Autor: Martín Pupo Pupo

Tutores: Ing. Salder Sánchez Hechevarría

Dr. C. Isnel Rodríguez Fernández

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Martín Pupo Pupo autor de este trabajo de Diploma y los tutores Dr.C Isnel Rodríguez Fernández y Ing. Salder Sánchez Hechevarría declaramos la propiedad intelectual de este servicio a la Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue seleccionar la aleación para la fabricación de tambores de freno de ómnibus Yutong en la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”. Se realizó ensayos de desgaste, dureza y microdureza, así como, análisis de la composición química del material y análisis fractográfico. Se pudo observar que la aleación Fe 21 Ni según la norma cubana aporta mejor resistencia, dureza y durabilidad de la pieza. A esta aleación se le aplicó un tratamiento térmico donde se obtuvo una matriz ferrítica mejorando su rendimiento mecánico. La aleación Fe 21 Ni, según los estudios realizados se empleará para la fabricación de tambores de freno para ómnibus Yutong. La valoración económica revela que es económicamente recomendable la fabricación de dichos tambores de freno, con la tecnología perteneciente a dicha empresa.

ABSTRACT

The purpose of this research was to select the alloy, for Yutong bus brake drums, with the Empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche" technology. Tests on wear, hardness and micro hardness, as well as analysis of the chemical composition and fractographic analysis were carried out. It was noted that the Fe 21 Ni alloy, according to the Cuban standard, provides better strength, hardness and durability of the piece. To this alloy a heat treatment was applied, where a ferritic matrix was obtained which improving its mechanical performance. The Fe 21 Ni alloy mentioned above, according to the studies carried out, will be used for manufacture the brake drums for Yutong buses. The economical valuation reveals that the aforementioned brake drums is economically commendable, using the manufacture technology of the mentioned enterprise.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
1.1 Introducción	4
1.2 Marco conceptual sobre tambores de freno	4
1.2.1 Sistema de freno	4
1.2.2 Tipos de frenos más utilizados	5
1.2.3 Materiales usados para la elaboración de sistema de frenado	7
1.2.4 Procesos de fabricación de tambores de freno	11
1.3 Procesos de obtención de piezas fundidas	12
1.4 Proceso de obtención de piezas fundidas en la Empresa Mecánica del Níquel	14
1.5 Ensayos mecánicos, análisis químico y fractográfico	19
1.5.1 Análisis químico del material	19
1.5.2 Dureza y microdureza	20
1.5.3 Desgaste en elementos de ingeniería	20
1.5.4 Análisis fractográfico	21
1.6 Tratamiento térmico de aleaciones	21
1.6.1 Principales tipos de tratamiento térmico	22
1.7 Antecedentes de tambores de freno	23
1.8 Conclusiones del capítulo 1	26
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	27
2.1 Introducción	27
2.2 Descripción de los materiales empleados	27
2.3 Características generales de los frenos de tambora	29
2.4 Selección y preparación de las muestras	29
2.5 Métodos y equipos empleados	31
2.5.1 Análisis químicos de los materiales empleados	31
2.5.2 Dureza y microdureza	32
2.5.3 Desgaste gravimétrico	33
2.5.4 Análisis fractográfico	34
2.6 Cálculo del carbono equivalente	34
2.6.1 Contenido de carbono y silicio en la fundición	35

2.6.2 Control del índice de saturación.....	37
2.6.3 Composición en las interfases	38
2.7 Aplicación de tratamiento térmico.....	40
2.7.1 Tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones	41
2.8 Conclusiones del capítulo 2.....	42
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	43
3.1 Introducción	43
3.2 Resultados de los análisis de las muestras	43
3.2.1 Composición química del material	43
3.2.2 Ensayo de dureza y microdureza.....	44
3.2.3 Ensayo de desgaste gravimétrico	45
3.2.4 Análisis fractográfico	46
3.3 Selección de la fundición aleada	47
3.4 Susceptibilidad al agrietamiento del hierro fundido	47
3.5 Determinación del contenido de carbono y silicio en la fundición	48
3.6 Tratamiento térmico.....	52
3.7 Análisis económico.....	53
3.8 Conclusiones del capítulo 3.....	54
CONCLUSIONES GUENERALES	55
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El transporte público urbano es parte esencial de una ciudad, disminuye la contaminación; ya que se usan menos automóviles para el transporte de personas. Además de permitir el desplazamiento de gran número de personas, constituye una opción económica y de uso práctico y eficiente en rutas de corta y mediana distancia.

Es de vital importancia mejorar los resultados económico-productivos al disminuir el costo de producción o servicios de las empresas, para así poder sustituir las producciones importadas por las nacionales al fabricar las piezas de repuesto necesarias en los equipos de transporte de pasajeros como es el caso de las tamboras de freno del ómnibus Yutong procedente de China, el cual constituye en gran medida el desarrollo del transporte público en nuestro país (Labañino, 2017).

La Empresa Mecánica del Níquel (EMNI) “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” perteneciente al MINBAS y adscripta al Grupo Empresarial Cubaníquel, la cual lleva a cabo la fabricación y reparaciones de piezas y equipos con alcance para los servicios de Reparaciones Capitales Eléctricas, Maquinado, Proceso de apoyo, Construcciones Metálicas y Fundición, ha implementado el estudio de la fabricación de tamboras de freno, aunque cabe resaltar que la mayor parte de las investigaciones se ha centralizado en la tecnología de fundición. En este caso se han desarrollado piezas exclusivamente en dos únicos tipos de materiales Hierro 21 (con Ni) e Hierro 24. Producto que es obtenido en hornos de inducción, utilizando como método el moldeo químico empleando resinas furánicas autofraguantes, con el fin de garantizar las propiedades mecánicas y la composición química, empleada en la norma de las tamboras de los ómnibus (Leyva, 2017).

Estos estudios se derivan de la **situación problemática** que vive la empresa de transporte de ómnibus provincial. La misma dispone de varios equipos para la

prestación de los servicios de la población, en su mayoría, ómnibus marca Yutong. En los últimos tiempos el tren de rodaje y el sistema de freno de dichos ómnibus, se han visto afectados por la fractura de las tambores; particularmente en los orificios de ventilación y los agujeros por donde se conectan los espárragos. Esta rotura tiene dos direcciones predominantes, una transversal que atraviesa la tambora partiendo desde los orificios ubicados en el extremo superior hasta el inferior y otra que se distribuye por todo el borde superior longitudinalmente uniendo un orificio con el otro; lo que conduce a la paralización del tren de rodaje dejando a los ómnibus fuera de servicio. Las tambores desechadas, por lo general, son enviadas a las cunetas de las carreteras, al desarrollar cambios de una de ellas por parte del conductor o pasan a formar parte material no utilizables en los patios de los talleres de mantenimiento y reparación, hecho que afecta el medioambiente de dichos talleres.

Problema de investigación: las tambores de freno, empleadas en los ómnibus Yutong, sufren rápido deterioro durante su funcionamiento, por lo que se hace necesario seleccionar una aleación fundida, que pueda ser sometida a tratamiento térmico y permita incrementar la resistencia y durabilidad de las mismas.

Objeto de estudio: aleaciones fundiciones empleadas en tambores de freno de ómnibus Yutong.

Objetivo General: determinar la fundición y la posible tecnología de tratamiento térmico que permita incrementar la resistencia y durabilidad de las tambores de freno para ómnibus Yutong, teniendo en cuenta las condiciones de fabricación de la Empresa Mecánica de Níquel.

Campo de acción: selección de aleación fundida y propuesta de tratamiento térmico.

Hipótesis: Si se selecciona una aleación, para las tambores de freno de ómnibus Yutong, se podrá sugerir un tratamiento térmico, bajo las características de fabricación de la Empresa Mecánica de Níquel y criterios técnico-económicos, que

permita incrementar la resistencia y durabilidad y con ello reducir la frecuencia de rotura que se produce en esos elementos.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar la aleación empleada para tamboras de freno Yutong, con el fin de determinar las causas de la rotura que sufren.
2. Determinar, mediante criterios técnico-económicos, una aleación que podrá ser empleada en la fabricación de tamboras de frenos para ómnibus Yutong.
3. Establecer la tecnología de tratamiento térmico, que permita incrementar la resistencia y durabilidad de las tamboras de freno.

CAPÍTULO 1

MARCO

TEÓRICO

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

Para desarrollar un estudio competente en todos los sentidos, se necesita puntualizar los aspectos teóricos que permitirán llevar a cabo la investigación propuesta, además de dominar el estado del arte de la temática analizada, realizando una revisión bibliográfica que permita la orientación de los objetivos del trabajo. Para de esta manera nutrirnos de ideas anteriores y poder llegar a conclusiones claras y verídicas, salvándonos así de posibles errores a causa de falta de experiencia.

Objetivo de este capítulo

Establecer el estado del arte sobre la selección de aleación para tambores de freno.

1.2 Marco conceptual sobre tambores de freno

La fabricación de piezas aplicando las técnicas de fundición comienza primeramente con análisis detallado del plano de la pieza para determinar su factibilidad, en la cual el tecnólogo de fundición determina los parámetros técnicos para la elaboración de la plantilla y las demás secuencias de operaciones hasta obtener la pieza, para lograr este objetivo se tiene en cuenta el material a emplear, el tipo de moldeo que se debe de aplicar, el tipo de horno a utilizar, los materiales de carga que se van a emplear, se determina la pintura, la temperatura de vertido, el tiempo de reposo del molde antes de fundir y después de fundida la pieza (Labañino, 2017).

1.2.1 Sistema de freno

Se denomina freno, a todo dispositivo capaz de modificar el estado de movimiento de un sistema mecánico mediante fricción, pudiendo incluso detenerlo completamente absorbiendo la energía cinética de sus componentes y transformándolo en energía térmica. Son sistemas mecánicos que mediante rozamiento permite regular la velocidad de movimiento de los árboles y otros

elementos, bien disminuyendo o bien manteniéndola. Además absorben la energía cinética o potencial en el proceso de detener una pieza que se mueve o reducir la velocidad de esta. La energía absorbida se disipa en forma de calor. La capacidad de un freno depende de la presión unitaria entre las superficies de energía que están siendo absorbidas. El comportamiento de un freno es análogo al de un embrague, con la diferencia que un embrague conecta una parte móvil con otra parte móvil, mientras que el freno conecta una parte móvil con una estructura.

Es utilizado en numerosos tipos de máquinas. Su aplicación es especialmente importante en los vehículos, como automóviles, trenes, aviones, motocicletas o bicicletas (Leyva, 2017).

1.2.2 Tipos de frenos más utilizados

Existen dos tipos de freno de preferencia para los automóviles, el de tambor o tambora y el de disco.

Frenos de tambor: el freno de tambor fue durante muchos años el único empleado en los automóviles, y aunque todavía quedan coches que funcionan con este sistema, en la actualidad se utilizan sólo en las ruedas traseras, montando en las delanteras, y con frecuencia también en las traseras, frenos de disco. El mecanismo consta de un tambor, que es el elemento móvil, por lo general realizado en hierro fundido, solidaria al cubo de la rueda, en cuyo interior, al pisar los frenos, se expande unas zapatas de fricción en forma de “C” que presionan contra la superficie interna del tambor (ver figura 1.1). Este tipo de frenos se utiliza en las ruedas traseras de algunos vehículos. Presenta la ventaja de poseer una gran superficie de fricción; sin embargo, disipa muy mal el calor generado por la frenada (Leyva, 2017).

Frenos de disco: el freno de disco se monta en la casi totalidad de las ruedas delanteras y también en muchas traseras, sobre todo en vehículos de grandes prestaciones. El sistema de frenos está compuesto por un disco metálico que gira solidario con la rueda y que es presionado axialmente por dos pastillas de material sintético que son empujadas por una pinza.

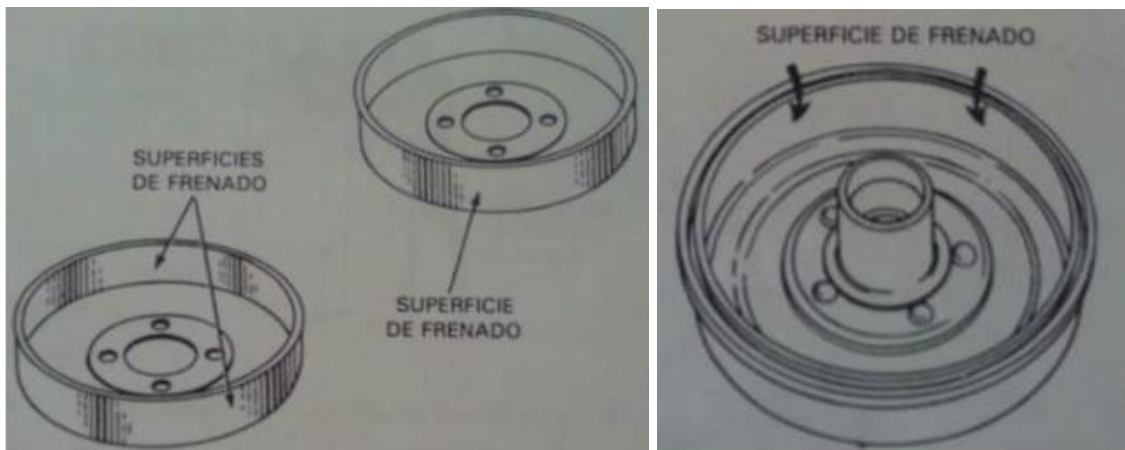


Figura 1.1 Vista del tambor de freno (fuente: Leyva, 2017)

El sistema transforma la energía cinética del giro de la rueda en energía calorífica que es disipada a la atmósfera. Para ello las pastillas son empujadas por la pinza cuando el conductor presiona el pedal del freno (Leyva, 2017).

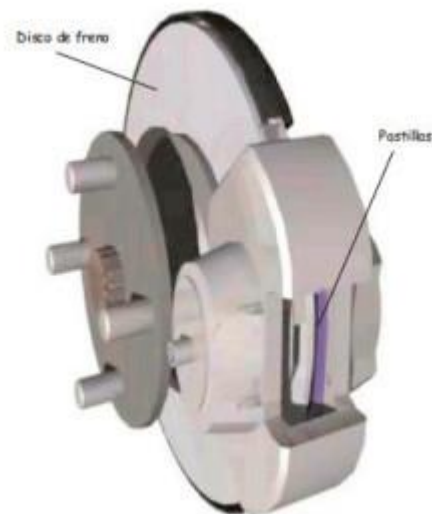


Figura 1.2 Freno de disco (fuente: Leyva, 2017)

El rozamiento de la pastilla contra el disco es el encargado de realizar la transformación de la energía. Las pinzas pueden ser de varios tipos dependiendo de su anclaje y del número de pistones con que empujan a las pinzas, las más usadas son las de pistón y de anclaje flotante, pero también existen fijas con dos pistones opuestos. En competición se utilizan pinzas de freno con pinzas muy largas que necesitan cuatro, seis y hasta ocho pistones opuestos.

Otro tipo de pinzas son las oscilantes y las deslizantes, pero no suelen emplearse en los vehículos (Leyva, 2017).

1.2.3 Materiales usados para la elaboración de sistema de frenado

En la tabla 1.1 se muestran los principales materiales que se emplean para elaborar una tambora de freno y algunas de sus características (UEB Fundición, 2018)

Tabla 1.1 Características de las materias primas fundamentales

No	Materia prima	Características	Especificación
1	Arena sílice	temperatura de fusión, °C densidad, g/cm ³ % de expansión térmica a 100, °C refractariedad, °C	1 713,00 2,65 1,80 1 800,00
2	Arena de cromita	temperatura de fusión, °C densidad, g/cm ³ % de expansión térmica a 100, °C refractariedad, °C	1 800,00 4,45 1,30-1,40 1 750,00
3	Bentonita	temperatura de fusión, °C perdidas por calcinación, %	1 330,00 5,80
4	Melaza	densidad, g/cm ³ temperatura de secado, °C	1,40-1.42 220,00
5	Silicato de sodio	módulo densidad, g/cm ³ viscosidad a 25, °C	2,00-3,00 1,30-1,50 18,00
6	Chatarra de acero	dimensiones máximas, mm contenido máx. de carbono, % contenido máx. de azufre y fósforo, %	200,00 x 200,00 0,40 0,05
7	Ferromanganeso	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³	1 100,00-1 220,00 7,10-7,50

		tamaño del grano, mm	10,00-25,00
8	Manganeso metálico	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 225,00-1 245,00 7,10-7,30 2,00-10,00
9	Silicomanganeso	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 100,00-1 310,00 6,20-6,40 0,00-25,00
10	Ferrosilicio	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 210,00-1 360,00 2,80-3,20 0,00-10,00
11	Silicio metálico	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 350,00-1 420,00 2,20-2,40 1,00-10,00
12	Calciosilicio	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano mm	1 000,00-1 100,00 2,30-2,60 2,00-10,00
13	Ferrocromo	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 430,00-1 600,00 7,00-7,40 5,00-20,00
14	Cromo metálico	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 800,00-1 880,00 7,00-7,40 0,00-2,00
15	Níquel metálico	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ pureza, %	1 400,00-1 420,00 8,70-8,90 99,90
No	Materia prima	Características	Especificación
16	Sinter de níquel	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño de las briquetas, mm	1 400,00-1 450,00 8,70-8,90 3,00-10,00
17	Ferromolibdeno	temperatura de fusión, °C	1 650,00-2 000,00

		tasa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	9,20-9,50 10,00-25,00
18	Ferrotitanio	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 335,00-1 500,00 6,00-6,30 5,00-25,00
19	Ferrovandio	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ tamaño del grano, mm	1 480,00-1 580,00 6,60-7,00 10,00-25,00
20	Lingote de aluminio	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ dimensiones, mm	658,00 2,70 200,00 x 400,00
21	Lingote de zinc	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ dimensiones, mm	419,40 7,00 200,00 x 400,00
22	Lingote de estaño	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ dimensiones, mm	231,80 7,30 200,00 x 400,00
23	Lingote de plomo	temperatura de fusión, °C masa unitaria, kg/dm ³ dimensiones, mm	327,40 11,30 200,00 x 400,00
24	Cátodo de cobre	temperatura de fusión, °C pureza, % dimensiones, mm	1 083,00 99,90 200,00 x 200,00
25	Silumin	contenido de Silicio, % dimensiones, mm	12,00 150,00 x 400,00
26	Arrabio	contenido de Carbono, % contenido de Silicio, % contenido de Manganeso, %	3,50-4,50 0,60-1,00 0,40-0,80
27	Chatarra de cobre	dimensiones de las pacas, mm contenido de grasa, %	250,00 x 250,00 0,00

		impureza, %	Menor de 1,00
28	Chatarra de aluminio	dimensiones de las pacas, mm contenido de grasa, % impureza, %	250,00 x 250,00 0,00 Menor de 1,00
29	Resina Furánica	% de Nitrógeno viscosidad PH	Bajo 120,00-130,00 7,50-8,00
30	Catalizador	% de acidez velocidad y curado	50,00-80,00 Media y alta

En la tabla 1.2 se presentan algunas de las características de los materiales auxiliares que pueden ser utilizados para la elaboración de una tambora de freno.

Tabla 1.2 Características de los materiales auxiliares.

No	Materia prima	Características	Especificación
1	Grafito cristalino	humedad, % contenido de ceniza, %	Menor de 1,00 Menor de 25,00
2	Grafito negro	humedad, % contenido de ceniza, %	Menor de 1,00 Menor de 22,00
3	Alcohol etílico	duración de la vaporización 1cm x min grados	71,00 90,00-95,00
4	Espatofluor	CaO contenido, % MgO contenido, % perdidas de calcinación, %,	85,00 2,00 10,00
5	Mineral de hierro	contenido de óxido de hierro, % tamaño del grano, mm	85,00-90,00 1,00-10,00
6	Muela abrasiva	diámetro exterior, mm diámetro interior, mm espesor, mm	600,00 305,00 40,00
7	Disco abrasivo	diámetro exterior, mm	180,00

		diámetro, interior mm	22,50
		espesor, mm	6,00
8	Electrodo de grafito	diámetro, mm	200,00
		longitud, mm	1 550,00
9	Carbón antracita	contenido de Carbono, %	95,80
		contenido de Silicio, %	1,40
		contenido de Azufre, %	Menor de 0,09
		humedad, %	5,80
10	Coagulante de escorias	contenido de SiO ₂ , %	70,00
		contenido de Al ₂ O ₃ , %	15,00
		densidad, g/cm ³	1,15
		humedad, %	5,00-6,00
11	Desmoldeante	densidad, g/cm ³	0,72
		viscosidad	fluido
		contenido de sólido, %	75,00
		sólido base	aluminio
12	Pintura refractaria	densidad, g/cm ³	2,43
		medio de disolución	Alcohol
		contenido de sólido, %	isopropilico
		sólido base	80,00
			Circón

1.2.4 Procesos de fabricación de tambores de freno

La fabricación de piezas aplicando las técnicas de fundición comienza primeramente con análisis detallado del plano de la pieza para determinar su factibilidad, en la cual el tecnólogo de fundición determina los parámetros técnicos para la elaboración de la plantilla y las demás secuencias de operaciones hasta obtener la pieza, para lograr este objetivo se tiene en cuenta el material a emplear, el tipo de moldeo que se debe de aplicar, el tipo de horno a utilizar, los materiales

de carga que se van a emplear, se determina la pintura, la temperatura de vertido, el tiempo de reposo del molde antes de fundir y después de fundida la pieza.

Las tambores de freno se obtienen mediante el proceso de fundición gris, lo cual provoca un mecanizado fácil, resistente al desgaste, el calor, etc. Para evitar que la tambora de freno debido a su trabajo producido presente una deformación, se toma de 13-18 mm el espesor de la pared en este caso que es el de autos pesados, además nos sirve para mejorar la rigidez y aumentar el efecto de enfriamiento. La calidad de los tambores y discos es de suma importancia para el desempeño de todo el sistema de freno. Los tambores necesitan tener buena resistencia al desgaste, al choque térmico y buena capacidad de amortiguación y compresión para resistir a esfuerzos mecánicos en altas temperaturas.

El gran enemigo del sistema de freno es el calor generado en el momento de frenado. Los tambores de freno favorecen la disipación del calor generado por la fricción de los forros o pastillas en los tambores de freno, reduciendo su dilatación. Lo ideal es utilizar materiales de buena calidad y buenos procesos de fabricación es esencial para que cuando sean sometidos a altas temperaturas, los materiales recuperen rápidamente el coeficiente de fricción (Leyva, 2017).

1.3 Procesos de obtención de piezas fundidas

Para la obtención de piezas fundidas existen varios procesos de fundición en dependencia del estado en que se encuentra el carbono, en los cuales se distinguen:

La **fundición blanca**, llamada así por el aspecto de su fractura, que tiene un color blanco mate. La estructura de ella se encuentra que todo el carbono se halla en forma de cementita y el grado de grafitización es nulo. La fundición blanca es dura y frágil y prácticamente no puede trabajarse con herramientas de corte.

Se forma al enfriar rápidamente la fundición de hierro desde el estado líquido, siguiendo el diagrama hierro-cementita metaestable; 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. Este eutéctico aparece en su mayor parte como cementita blanca que rodea las dendritas de forma de helecho (Guliáev, 1997).

La **fundición gris** es donde el carbono se encuentra en alto grado o en su totalidad en estado libre en forma de grafito laminar. Conocida también como hierro fundido o hierro colado, la fundición gris es un tipo de aleación; es la más utilizada en la industria. Los elementos fundamentales del hierro gris son: carbono, silicio, fósforo, manganeso y azufre; la base metálica de los mismos pueden ser: ferrítica, ferrítica - perlítica, perlítica y atruchados o intermedios. Si la composición del hierro líquido y su velocidad de enfriamiento son apropiadas, el carbono en el hierro se separa durante la solidificación y forma flóculos de grafito, esta crece con sus contornos a filados dentro del líquido y forma las hojuelas. Cuando el hierro gris se fractura la mayor parte de ella ocurre a lo largo del grafito, así se relaciona con el característico color gris de la superficie fracturada. Las bondades del hierro gris son influenciadas por el tamaño, cantidad y distribución de los flóculos de grafito y por la relativa dureza de la matriz alrededor del grafito. Estas propiedades son controladas principalmente por la cantidad de carbono y silicio del metal y la velocidad de enfriamiento en la solidificación. Un enfriamiento muy lento y contenidos de carbono y silicio altos tienden a producir gran cantidad de flóculos de grafito de gran tamaño y una matriz suave de baja resistencia. Los mencionados flóculos proveen al hierro gris propiedades excelentes como altos niveles de dureza, lo que provoca buenas características de resistencia a la abrasión, resistencia al desgaste y excelente absorción de vibraciones, resultado de una relación no lineal esfuerzo-deformación a esfuerzos relativamente bajos (Labañino, 2017).

La **fundición de alta resistencia**, en la cual el carbono, en grado considerable o en su totalidad, se halla en estado libre formando grafito esferoidal. A este grupo pertenecen ciertas fundiciones al Níquel, fundiciones al Cromo, al Cromo – Níquel y al Cobre. También es importante señalar que la presencia de esos elementos reduce la susceptibilidad de las fundiciones a las variaciones de sección. Es decir,

se consiguen que las propiedades sean más constantes en piezas de diferentes espesores. Además, la matriz de las fundiciones aleadas tienen más resistencia y dureza que la matriz de las fundiciones ordinarias (Castro, 2009).

La **fundición maleable** se obtiene por recocido (maleabilización) de la fundición blanca. En esta fundición todo el carbono o una gran parte de él se encuentran en estado libre en forma de nódulos.

La microestructura final resultante del tratamiento será grafito, del tipo compacto, en una matriz de ferrita, ferrita y perlita o perlita, dependiendo de la velocidad del enfriamiento posterior a la austenización. Las propiedades mecánicas de esta familia de fundiciones van a depender principalmente de la microestructura de la fase matriz. Una fundición maleable de matriz perlítica puede tener una resistencia de 400-600 MPa con alargamientos entre 10 y 2 %. Estas fundiciones reciben el nombre de fundiciones maleables de corazón negro o americanas para diferenciarlas de otras fundiciones maleables que se producen en Europa, denominadas de corazón blanco, y que resultan de la descarburación superficial de la fundición blanca de partida (Castro, 2009).

1.4 Proceso de obtención de piezas fundidas en la Empresa Mecánica del Níquel

El proceso de obtención de piezas fundidas, en la UEB “Fundición” de la Empresa Mecánica del Níquel, comienza con la preparación de los materiales de carga para la fundición y obtención de la aleación deseada en los hornos instalados y la preparación de los materiales de moldeo y mezclas para la elaboración de moldes y machos. Para ello la UEB cuenta con las siguientes operaciones tecnológicas.

Fabricación del juego de modelos (PLANTILLARÍA): esta área está destinada a la fabricación de plantillas y cajas de machos (juego de modelo) necesarios para la obtención de los moldes de fundición. Para la elaboración de las plantillas el área se encuentra equipada con dos sierras circulares, dos sierras sinfín, una plana, un cepillo reguesador, dos tornos y una fresadora universal (UEB Fundición, 2018).

Preparación de carga: operación mediante la cual se prepara la carga metálica que se va a fundir. Los materiales de carga preparados y clasificados, así como, el retorno de la propia producción del taller se almacena en los fosos y las ferro aleaciones y otros materiales que entran en el área se conservan en contenedores. La carga metálica se realiza teniendo en cuenta el cálculo de carga, donde se refleja la cantidad necesaria de cada uno de los materiales a cargar para garantizar la composición química de la aleación deseada. Para la confección de la carga se prevé cestos metálicos, los cuales se colocan en la plataforma de la báscula digital donde se depositan y pesan los materiales que la componen. Las ferro aleaciones y refractarios necesarios para la fusión se transportan igualmente en estos.

En esta área se prevé la trituración y molienda de las ferro aleaciones y materiales refractarios a las dimensiones adecuadas para realizar la fundición, para ello cuenta con un molino triturador de mandíbula y un molino de rodillo, así como también se efectúa el revestimiento refractario de hornos y cazuelas (UEB Fundición, 2018).

Preparación de materiales de moldeo: el área de preparación de las arenas forma parte del proceso de moldeo y machería, aquí se reciben las arenas y son secadas en el tambor secador rotatorio con enfriador. Después de este proceso con ayuda de un elevador de cangilones se traslada hasta el tamiz poligonal donde la arena es tamizada y por medio de un transportador de banda se traslada a las tolvas de almacenamiento de arena seca, la cual mediante los dosificadores y el sistema de transporte neumático la traslada hacia el área de preparación de mezcla para el moldeo mecanizado en verde y hacia la tolva de recepción del sistema de Moldeo Químico Autofraguante.

Preparación de mezclas: operación que forma parte del proceso de moldeo y machería a través de la cual se elaboran las mezclas para la elaboración de moldes y machos para todo tipo de fundición, las cuales son:

- Mezcla de macho para proceso Autofraguante.

- Mezcla de moldeo para proceso Autofraguante.
- Mezcla de moldeo para proceso convencional.

Las mezclas para el moldeo en verde son suministradas a través de transportadores de banda a las tolvas de alimentación para el moldeo mecanizado y en contenedores para el moldeo manual. La mezcla autofraguante se suministra directamente desde el mezclador continuo a los moldes.

Machería: por medio de esta operación se fabrican los machos para obtener las cavidades, orificios y superficies externas de las piezas cuya configuración no permita obtenerla mediante la plantilla. Los machos se elaboran a partir de mezcla autofraguante en los bancos de macheros con ayuda de pisones manuales. La mezcla de machos se transporta desde el área de preparación de mezcla con ayuda de la grúa eléctrica de puente en contenedores. Después de este proceso los machos se recubren con pintura anti costra base alcohol. En esta área se prevé la preparación de los herrajes de moldeo y machería, la cual se encuentra equipada con una guillotina.

Moldeo: proceso mediante el cual se elaboran los moldes de fundición, es decir, se realizan las operaciones de moldeo. Teniendo en cuenta el análisis de posibilidad de fabricación de las piezas fundidas se determina el método de elaboración del molde que puede ser mediante el proceso convencional o el proceso Autofraguante (UEB Fundición, 2018).

La elaboración de moldes por el método conocido como moldeo en verde de forma mecanizada se prevé mediante dos pares de máquinas moldeadoras modelo 233M y 271BM. El suministro de mezcla de moldeo se efectúa a través de la tolva de alimentación de cada máquina respectivamente y la alimentación de cajas de moldeo se realiza con ayuda de la grúa eléctrica de puente desde la zona de recepción de estas.

La elaboración de los moldes por el proceso Autofraguante se realiza por medio de la instalación de mezclado y moldeo que cuenta para ello con un mezclador

continuo y mesa compactadora donde se lleva a cabo la preparación de la mezcla y el moldeo como operaciones continuas.

Fusión: en el área de fusión se realizan todas las marcas de las aleaciones de hierro, en un horno de inducción con crisol de frecuencia industrial; para la fusión de todas las marcas de acero se realiza en dos hornos de inducción con crisol de alta frecuencia y un horno de arco eléctrico; para la fusión de las aleaciones no ferrosos se prevé un horno con crisol de alta frecuencia destinado a la fusión de las aleaciones base cobre, para la fusión de las aleaciones base aluminio se utiliza una fragua y además, cuenta con un horno de alta frecuencia destinado básicamente a la investigación y desarrollo de nuevas aleaciones.

La carga metálica para realizar la fusión de las diferentes aleaciones en los hornos de inducción se transporta con ayuda de la grúa eléctrica de puente en los cestos hasta la plataforma de los mismos, donde de forma manual se suministran los materiales componentes de la carga, de igual forma la carga se traslada hasta los hornos de fusión de metales no ferrosos. Para la realización del proceso de fusión en el arco eléctrico, la carga se traslada en cestos con descarga por el fondo, con ayuda de la grúa eléctrica de puente, hasta la solera del horno donde se efectúa la descarga del cesto. Las ferro aleaciones, carburantes y formadores de escoria se trasladan en pequeños recipientes hasta la zona de trabajo. Para la fusión de las aleaciones de metales ferrosos se prevé la realización del análisis de la composición química de los elementos del metal líquido, para ello se cuenta con un laboratorio de análisis químico, equipado con lo último de la técnica moderna, computarizado, capaz de analizar hasta 21 elementos a la vez. El metal líquido obtenido se vierte en cazuelas precalentadas en el banco de secado para ser trasladado al área de vertido (UEB Fundición, 2018).

Ensamble y vertido: los moldes elaborados son recepcionados en área de fusión para la colocación de los machos y el pintado de los moldes preparados, los cuales son ensamblados con ayuda de las guías de moldeo y la grúa eléctrica de puente. Durante la realización de estas operaciones los moldes son controlados.

Desmoldeo: los moldes fundidos se trasladan usando grúas eléctricas de puentes para el área de desmoldeo donde se sacuden en una zaranda vibratoria para eliminar la arena, la pieza fundida se transporta en contenedores usando una carretilla eléctrica sobre rieles al área de desbarbado y limpieza y la arena se reincorpora al sistema de preparación de mezcla de acuerdo al tipo de proceso utilizado durante el moldeo. Al efectuar el desmoldeo de los moldes sobre la base del proceso convencional la arena se traslada mediante un transportador de banda, en el cual se realiza la separación de las partículas magnéticas y otro de cangilones hacia la instalación de recuperación, la cual mediante transportadores de banda la envía al área de preparación de mezclas de moldeo en verde.

Los moldes sobre la base del proceso Autofraguante son recepcionados en la instalación de desmoldeo Autofraguante, donde la arena se recupera por método mecánico y se traslada hacia el silo de almacenamiento mediante transportadores neumáticos de donde se alimenta la tolva de recepción de arena recuperada del mezclador continuo, este proceso se efectúa todo de forma automática, este es el equipo más moderno que existe en nuestro país (UEB Fundición, 2018).

Limpieza y acabado: en esta área se efectúa el desmoldeo de machos de las piezas fundidas, el rebabado, el tratamiento térmico, la limpieza final y la recuperación de los defectos de las piezas fundidas, las cuales se trasladan para la zona de corte del sistema de alimentación y mazarotas con ayuda de los equipos dispuestos en el área. La extracción de los machos, así como la limpieza de las piezas fundidas se prevé en dos tambores de acción periódica y en una cámara de granallado, los tambores rebabadores se encuentran situados en un local aislado, el cual se equipa con una grúa monorraíl y una carretilla eléctrica y la cámara de granallado se equipa con una grúa monorraíl, la cual se introduce hasta el interior de la cámara.

El tratamiento térmico de las piezas fundidas: se realizarán en un horno de tratamiento térmico con solera móvil, calentado por Mazut logrando alcanzar hasta 1200°C de temperatura en las zonas de trabajo. Para el rebabeo, el esmerilado y la limpieza de la fundición se realizará con martillos neumáticos, una piedra

colgante y dos esmeriladoras estacionarias. La corrección de los defectos de las piezas fundidas se efectúa en un local especial con ayuda de las máquinas de soldadura eléctrica.

Finalmente las piezas fundidas rechazadas, sistema de alimentación y mazarotas se colocan en contenedores de acuerdo a la marca por aleación y se trasladan con ayuda de la grúa eléctrica de puente y la carretilla eléctrica sobre rieles al almacén de materiales de carga o al área de preparación de chatarra para reincorporarla a la fundición. El proceso de fundición concluye cuando las piezas fundidas son inspeccionadas por el control final, las cuales son certificadas en concordancia con los requisitos reglamentarios y complementarios de la documentación del proceso de fabricación. En caso contrario las piezas fundidas serán rechazadas, las cuales podrán ser recuperables o desechables (UEB Fundición, 2018).

1.5 Ensayos mecánicos, análisis químico y fractográfico

Para un mejor entendimiento de las propiedades de la aleación que se seleccionara se harán los ensayos de dureza, microdureza y de desgaste, así como, el análisis químico del material y el análisis de fractográfico.

1.5.1 Análisis químico del material

El análisis químico es un procedimiento para estudiar la composición, la concentración o cualquier otra propiedad química de una sustancia o material. La consolidación de la concepción moderna de composición química a finales del siglo XVIII, junto con la mayor importancia de los estudios cuantitativos de los procesos químicos propició la aparición de un conjunto de conocimientos para la mejora y el desarrollo de esta rama. Además, el desarrollo de los métodos instrumentales de análisis químico se produjo en el último cuarto del siglo XIX, gracias al establecimiento de una serie de correlaciones entre las propiedades físicas y la composición química. Estos estudios hicieron posible el descubrimiento de numerosos elementos, nuevos instrumentos ópticos y simplificaron e hicieron

mucho más rápidos una gran cantidad de análisis de importancia industrial (Cueva, 2018).

1.5.2 Dureza y microdureza

La dureza es la capacidad de un material sólido para resistir la deformación o abrasión de su superficie. La dureza de un material usualmente es considerada como la resistencia a la deformación. Se aplican varias interpretaciones en función de su uso, en la industria de metales se define como la resistencia a la deformación permanente. La dureza se manifiesta como: resistencia a la abrasión, resistencia a la deformación plástica, carencia de ductibilidad y maleabilidad, altas temperaturas de fusión; en metalurgia, ésta representa resistencia a la penetración. Las pruebas de dureza se dividen en tres categorías:

- a) Pruebas de macrodureza. Referidas a pruebas con cargas aplicadas en el indentador de más de 1 kg.
- b) Pruebas de microdureza. Se llevan a cabo con cargas en el intervalo de decenas a centenas de gramos.
- c) Pruebas de nanodureza. Referidas a pruebas con cargas muy inferiores a 1 g.

Las pruebas de microdureza se usan para evaluar la dureza superficial en metales, aleaciones o superficies modificadas. El principio de la prueba de microdureza Vickers o Knoop, consiste en que un indentador (un cuerpo puntiagudo) es presionado en la superficie de la muestra bajo una carga específica en un intervalo de tiempo definido, y la medición se hace en base al tamaño o profundidad de la indentación (Castro, 2008).

1.5.3 Desgaste en elementos de ingeniería

Se entiende por desgaste la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie que se mueven a lo largo de ella, provocando daños superficiales intensos y con ello la destrucción total o parcial de la pieza.

Para verificar el desgaste en elementos de ingeniería se emplea el ensayo de resistencia al desgaste este procedimiento permite obtener resultados sobre el

comportamiento cuantitativo y cualitativo de un material con respecto a otros, donde la pérdida de masa es el parámetro principal (Palacios, y otros, 2016).

1.5.4 Análisis fractográfico

Es el método por el cual se realiza el análisis de las características de la fractura en un material para conocer sus causas y mecanismos y así conocer los motivos que provocan la falla de materiales, además se encarga de diseñar y evaluar componentes agrietados con el fin de aumentar la resistencia a la propagación de grietas que producen la fractura, la fractografía se interesa por la forma de las superficies creadas al propagarse una grieta; ya que, esta morfología de la grieta contiene la información necesaria para determinar y reproducir las condiciones bajo las cuales ocurrió la falla (López, y otros, 2017).

1.6 Tratamiento térmico de aleaciones

El tratamiento térmico es muy importante en la técnica mecánica moderna, basada en la utilización de los metales, la variación que experimentan las propiedades de los metales al ser tratados térmicamente es muy grande. El objeto de todo tratamiento térmico consiste en conseguir que, calentando el metal hasta una temperatura determinada y enfriándolo después se produzca el cambio deseado en su estructura para esto hay que tener en cuenta dos factores muy importantes, la temperatura y el tiempo que influyen en el tratamiento térmico directamente.

Para que cambien las propiedades de una aleación es necesario que como resultado del tratamiento térmico se produzca en ella variaciones estables, debidas a las transformaciones de fase. Si el metal se encuentra en un estado estructural que no es de equilibrio (a consecuencia del tratamiento precedente), al calentarlo, debido a que aumenta la movilidad de los átomos, es posible que el metal se aproxime al estado de equilibrio. En este caso el tratamiento térmico es posible, aunque en la aleación no tengan lugar transformaciones de fases (Guliáev, 1997).

1.6.1 Principales tipos de tratamiento térmico

El recocido (de primer género) es una operación térmica que consiste en calentar el metal, cuyo estado es inestable como resultado del tratamiento anterior, y que hace que éste tome un estado más estable. Al calentarlo aumenta la movilidad térmica de los átomos haciendo que los procesos que conducen al metal al estado estable alcance velocidades apreciables eliminando las tensiones y disminuyendo las deformaciones de la red cristalina, la recristalización y difusión (Guliáev, 1997).

El recocido (de segundo género) es una operación térmica que consiste en calentar el metal hasta una temperatura superior a la de transformación y en enfriarlo después con suficiente lentitud para obtener un estado estructural estable de la aleación. En las aleaciones se produce una transformación de fase, el calentamiento por encima de cierta temperatura crítica provoca un cambio de la estructura de la aleación. Durante el enfriamiento siguiente ocurre la transformación inversa. Si el enfriamiento es suficientemente lento la transformación será total y la composición fásica corresponderá al estado de equilibrio (Guliáev, 1997).

El temple es una operación térmica que consiste en un calentamiento hasta una temperatura superior a la de transformación, seguido de un enfriamiento suficientemente rápido, para obtener un estado estructural inestable de la aleación. En la aleación al producirse cambio de fase, la integridad de la transformación inversa (durante el enfriamiento) depende de la velocidad de éste. Teóricamente podemos figurarnos unas condiciones tales de enfriamiento, con las cuales no se produzca la transformación inversa y a la temperatura ambiente, como resultado del enfriamiento rápido, se fije el estado de la aleación característico de las altas temperaturas.

En muchos casos el temple no fija (o fija solo parcialmente) el estado de la aleación, estable a elevadas temperaturas. Por esto el caso límite de temple, en

que se fija el estado de la aleación característico de las temperaturas altas, se llama **temple verdadero** (Guliáev, 1997).

El revenido es una operación térmica en la cual se calienta la aleación templada hasta una temperatura inferior a la de transformación, para obtener un estado estructural más estable de la aleación. El estado de una aleación templada se caracteriza por su inestabilidad, incluso sin intervención térmica alguna, en la aleación pueden ocurrir procesos que la aproximen al estado de equilibrio. Al elevarse la temperatura la aleación templada se aproxima cada vez más al estado de equilibrio.

El revenido si se efectúa la temperatura ambiente (es decir, si el tratamiento térmico se sustituye por un mantenimiento a la temperatura ambiente) o con un calentamiento poco elevado se llama **envejecimiento** (Guliáev, 1997).

1.7 Antecedentes de tambores de freno

(Carrillo, 2015) analiza tres tipos de pastillas de frenos producidas de diferentes materiales mediante la eficacia de frenado. Para ello realiza una prueba en el banco de tornillo donde arroja los siguientes datos, que la mayor fuerza de frenado es de la pastilla semimetálica, con 2,00 kN, las pastillas de carbono y cerámica con una fuerza de frenado de 1,64 y 1,32 kN respectivamente, dando como resultado que la mayor eficacia de frenado se logra con la pastilla de freno semimetálica. En el trabajo solamente se realiza una prueba y debería de realizarse otras pruebas como resistencia al desgaste, dureza, microdureza y resistencia a la rotura para lograr un mejor análisis y obtener mejores resultados.

(Cantillo, 2018) realiza la tecnología de fundición de bolas con 60 mm de diámetro, de hierro blanco, en moldes desechables, para ello realiza el moldeo en mezcla furánica autofraguante. Obtuvo que la tecnología se encuentra dentro de los rangos establecidos por la norma cubana y otras empresas con un tiempo de moldeo de 8 minutos, una vida de banco de 3,50 minutos y una resistencia de 0,25 MPa/h

(Guevara, y otros, 2015) obtención de tambores de frenos para automóvil mediante la fundición gris, para ello se realizó ensayos de resistencia a la tracción y de dureza. Obtuvo que la resistencia a la tracción es de 34,50 Ksi y que la dureza es de 95 HRB. En el trabajo no se tiene en cuenta la selección de una aleación para la elaboración de la pieza, se aborda sobre la tecnología utilizada y el proceso, pero sin embargo no se hace alusión a los posibles materiales que se pueden utilizar para la elaboración de la misma.

(Rosario, 2016) selecciona a escala de laboratorio una aleación para fabricar tambores de ómnibus Yutong y la tecnología de fundición de las mismas según el equipamiento disponible en la Empresa Mecánica del Níquel “Gustavo Machín Hoed de Beche”, para ello se seleccionó dos muestras, aleaciones Fe-24 y Fe-21 Ni basándose en el análisis químico, fractográfico, metalográfico y ensayos de dureza, microdureza y de tracción. Obtuvo que la aleación a emplear en la fundición de los tambores de freno es el Fe-21 Ni pues, aunque de acuerdo con la microestructura y las propiedades mecánicas no cumple con las exigencias de la norma, es la que más se asemeja a esta. En el trabajo no se realizó tratamiento térmico ni antes ni después de haber seleccionado la aleación.

(Cortina, 2018) realizó la caracterización metalográfica y la dureza en base a las composiciones de equilibrio de las distintas fases en las zonas de una fundición aleada del tipo HF Fe 21 Ni, para ser empleada en la fabricación de tambora de automóvil, para ello se realiza un análisis de la composición química en un espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. Obtuvo que el comportamiento microestructural de la fundición aleada, en bruto de colada está constituida por una matriz de ferrita dendrítica y perlita y luego del tratamiento térmico, la matriz es ferrita con grafito, lo cual, por sus propiedades mecánicas, puede ser empleada en tambores de frenos de equipos automotrices. En el trabajo no se profundiza en la tecnología de fundición y en el tratamiento térmico para una mejor selección de la aleación.

(Labañino, 2017) propone el diseño y la tecnología de fundición de las tambores de freno del tren delantero para ómnibus Yutong, para ello realiza un ensayo de desgaste, un análisis fractográfico y una modelación de la tambora de freno. Obtuvo que la probeta de menor variación de peso es de 0,23 g perteneciente al Fe 21Ni. Así que como es el material más resistente al desgaste, en el análisis visual se evidencia, que ocurre la aparición de grietas en los orificios de ventilación (colocados para disminuir las temperaturas por fricción) las cuales se propagan por todo el borde superior. En el trabajo no se realiza el análisis de la composición química para una mejor comprensión de las muestras utilizadas

(Leyva, 2017) propone el rediseño y la tecnología de fundición de las tambores traseras de freno, para ello hizo un análisis metalográfico y uno de composición del material, además de un ensayo de desgaste gravimétrico. Obtuvo que el rediseño propuesto mejora la geometría con una reducción de la concentración de tensiones de un 51,71 % con respecto a la actual.

(Molina, 2018) analiza la factibilidad del proyecto nuevo a conocer depurando todas las falencias que impidieran a esta salir a flote, donde utiliza el análisis físico y químico. Obtuvo que el material presenta alta resistencia a la fricción a temperaturas mayores a 800 °C y que el producto empleado se encuentra en los parámetros de la ley de la composición, ya que se encuentran de 16 a 18 componentes. En el trabajo no se realiza los suficientes análisis y ensayos para determinar la factibilidad del proyecto.

(Álvarez, 2013) recopila toda la información posible relacionada con los frenos automotrices y el proceso de frenado del automóvil, para ello realiza un análisis de fuerzas desarrolladas en el frenado de vehículos. Obtuvo que las fuerzas más importantes que toman parte en el proceso de frenado son la fuerza de impulsión, fuerza de frenado y la fuerza de rozamiento. En el trabajo no se analizan las propiedades mecánicas, la estructura y tampoco la durabilidad de los frenos automotrices para un mejor entendimiento del proceso.

(Ighaddouran, 2013) modifica la microestructura de la aleación de aluminio A357 mediante la aplicación de ultrasonidos, para ello realiza un análisis fractográfico y uno microestructural. Obtuvo una estructura con dos tipos de tamaños de granos, un grano grueso el cual es el dominante de la microestructura, y un grano de un tamaño menor que no se extiende tanto como el anterior, pero que también es notable, además se muestra una superficie de fractura irregular, con la presencia de microcavidades de deformación. En el trabajo no se realiza el análisis químico, el ensayo de desgaste y no se hace un tratamiento térmico para una mejor modificación de la estructura de la aleación.

1.8 Conclusiones del capítulo 1

- Los elementos teóricos analizados permiten asegurar que es posible la fabricación de las tambores de freno de los ómnibus Yutong por el método de fundición.
- Se definieron aspectos teóricos que permitirán llevar a cabo la investigación propuesta.
- En la temática analizada se reportan importantes contribuciones, en el desarrollo de técnicas de fundición.
- En los trabajos consultados existe poca referencia sobre las tambores fabricadas por fundición.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

En este capítulo se determinará los materiales y métodos que se van a utilizar con el propósito de lograr los objetivos específicos que se plantearon, mediante el empleo de la técnica en la obtención de piezas por el método de fundición, se define la secuencia de operaciones a desarrollar para la obtención de la aleación para la fabricación de tambores de freno de ómnibus Yutong.

2.2 Descripción de los materiales empleados

El chequeo del proceso de fundición resulta vital para la calidad de las muestras a ensayar, ya que no debería ser un punto de giro en la investigación por lo que debe resultar fiable. Las probetas fueron obtenidas de una colada donde se controló la composición química y relación de temperatura de vertido tanto en cazuelas como en los moldes, el metal fue escoriado tres veces para obtener un mínimo de impurezas y defectos de fundición. La mezcla de moldeo empleada para la obtención de las probetas fue examinada y tomada en las mismas condiciones en que se fundiría el prototipo, de esta forma el escenario para la obtención de la probeta sería lo más parecido al de obtención del prototipo.

La selección de los materiales de carga se realizó de acuerdo a la composición química de la aleación objeto de estudio. El cálculo de la carga para obtener la aleación se realizó con el empleo del programa ORCAC disponible en la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, la carga del horno se calculó para obtener el volumen de una tambora de freno. Se comprobó que el material de carga estuviese limpio de grasa y suciedad, con tamaño regular para no dañar el revestimiento del horno. En calidad de elementos de aleación para la fundición se utiliza el níquel, el cromo, molibdeno, manganeso, cobre, aluminio y titanio. Los que mayor aceptación han tenido en la construcción son las fundiciones de baja aleación.

Para el tratamiento térmico se empleó un horno de mufla, en este horno se puede generar elevadas temperaturas y sirve para calentar materiales que son sometidos

a distintos procesos de tratamiento térmico, el mismo se encuentra ubicado en el laboratorio de química del Instituto Superior Minero Metalúrgico. Es un horno eléctrico con aplicaciones de procesos de incineración, secado, disgregación, recocido, tratamientos térmicos con temperatura máxima de $+1\ 100\ ^\circ\text{C}$. Los hornos muflas calientan las probetas por acción directa o indirecta del flujo eléctrico, para el calentamiento se debe tomar en cuenta el tamaño, la forma y la temperatura de la probeta a ser tratada térmicamente. En la figura 2.1 se muestra dicho horno (Cortina, 2018).



Figura 2.1 Horno de mufla para el TT de recocido (fuente: Cortina, 2018)

Las características fundamentales del mismo es que tiene un recinto interior compuesto por placas de refractario ligero de alta calidad, de gran contenido en alúmina y exentas de amianto y óxido de hierro. Elementos calefactores distribuidos uniformemente con hilo especial de elevado punto de fusión y recocido por alta frecuencia asegurando una duración excepcionalmente larga. Excelente aislamiento térmico de fibrocerámica de baja densidad y conductividad térmica. Consumo reducido a máximo rendimiento.

En este tipo de hornos la energía se intercambia en forma de calor entre distintos cuerpos o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta

temperatura. Los hornos mufla transfieren su calor mediante convección, radiación o conducción. El calor se transmite a través de la pared del horno fundamentalmente por conducción, la radiación existirá cuando el horno se encuentre en temperaturas altas como es los 900 °C hasta los 1 000 °C y si la temperatura del horno es baja aquí la convección sería mayor (Cortina, 2018).

2.3 Características generales de los frenos de tambora

Los materiales de los frenos de tambora deben de tener las características siguientes:

- Presentar un coeficiente de fricción adecuado y estable a cualquier rango de temperatura y presión.
- Mantener un equilibrio entre abrasión y resistencia al desgaste.
- Presentar una cierta comprensibilidad, tanto en frío como en caliente, que haga que el material absorba vibraciones e irregularidades de la otra superficie con la que entra en contacto.
- Tener una buena resistencia al choque y al desgaste.

Para conseguir estas características, cada fabricante implementa sus propias formulaciones, las cuales ensaya una y otra vez hasta conseguir los resultados necesarios para la buena calidad del producto.

2.4 Selección y preparación de las muestras

En el taller 08 de la Empresas Mecánica del Níquel Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche, donde se fabrican tamboras de freno en dos únicas aleaciones Fe 24 y Fe 21 Ni. Se pudieron obtener dos probetas metálicas representativas de cada aleación, mediante el vertido del metal líquido en un molde previamente confeccionado, de cada una se cogió un ejemplar y se le aplicó el tratamiento térmico que llevan las tamboras (normalizado). En conjunto con estas muestras usamos un ejemplar de las tamboras fabricada por China Zhengzhou Yutong Group Lts., Co, de HT 250 como patrón, de igual forma se compararan las tres aleaciones con la norma ASTM A 159-83 la cual plantea que para las piezas de tamboras de frenos, se exige que se fabriquen de hierro gris con un material grado

G3500b, con una dureza HB= 207 - 255, Φ impresión Brinel= 4.2 – 3,8 mm (bola Φ 10 mm, carga de 3000 kg), grafito Tipo VII, dimensiones clases 3 - 5, distribución A con matriz de perlita laminar según ASTM A 247 - 67. Se realizaron operaciones de preparación y pulido en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, para lo que se siguió la siguiente secuencia:

1. Fresado: las secciones de corte se maquinaron en una fresadora vertical 6P-125 con refrigeración constante.
2. Rectificado: se rectificaron dos caras en una rectificadora horizontal 6T-82-1 con refrigeración continua y los análisis se realizaron en dichas caras.
3. Pulido: se utilizó una pulidora metalográfica modelo Rathenow-43 con el uso de papeles abrasivos de diferente granulometría (350; 500; 600 y 800), paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de óxido de cromo con granulometría de 3 μ m.
4. Ataque: se sumergió en ácido nítrico (peso específico 1,42) + 100 ml alcohol–Rectif (Nital), en una cantidad de 1 - 5 ml durante 15 segundos a un minuto a temperatura de 20°C.
5. Limpieza: se sumergieron en acetona para eliminar restos no deseados. Finalmente se introducen en un recipiente con etanol absoluto, lo que elimina impurezas y humedad.
6. Secado: se secaron con aire caliente a presión para eliminar cualquier vestigio de humedad.
7. Ensayo de tracción: se efectuó a partir de la fundición de dos tarugos, de acuerdo con las dimensiones que requiere la norma E-8. Una vez obtenido el producto se le aplicó un proceso de maquinado en un torno 16K20 donde finalmente se obtuvieron las probetas según las dimensiones que exige la norma para el desarrollo del estudio de tracción.

2.5 Métodos y equipos empleados

Las fallas en las tambores de freno son de constante preocupación debido a las considerables pérdidas económicas y efectos secundarios que implican; por lo que se hace necesario definir las regularidades del comportamiento de las mismas. Dichas regularidades se caracterizan por rasgos peculiares de las aleaciones a investigar, su estructura y propiedades conjuntamente con factores de construcción, pueden influir sobre las mismas.

Lo planteado implica la aplicación de técnicas de ensayos para identificar el carácter de las roturas que se presentan en las tambores de freno. Se deduce entonces la necesidad de considerar si las fallas están asociadas a dificultades de los materiales empleados para su fabricación o a problemas relacionados con la construcción, geometría o insuficiente resistencia mecánica.

Se planificaron los experimentos siguientes para la mejor selección de la aleación para tambores de freno de Ómnibus Yutong:

1. Análisis químico.
2. Ensayo de dureza y microdureza.
3. Ensayo de desgaste gravimétrico.
4. Análisis fractográfico.

2.5.1 Análisis químicos de los materiales empleados

La composición química de las probetas, se desarrolló con el empleo de un espectrómetro cuántico de masa (Espectrolab-230) perteneciente a la Empresa Mecánica del Níquel, para lo cual se limpiaron las superficies, con el empleo de papeles abrasivos, tomando tres muestras para cada probeta, separadas las mismas por una distancia de 1 cm. El material que se usó como patrón A 278M Clase 275 (comparable al HT 250), según las Normas ASTM A 278M-93 y NC 16-33:80, al igual que la composición química exigida por la norma internacional que se muestra en la tabla 2.1 y 2.2 donde se reflejan los valores de ambos materiales.

Tabla 2.1 Composición química de la probeta de fundición gris HT 250

Fundición gris HT 250						
C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni
3,40	1,80	0,90	0,02	0,01	0,36	0,03

Tabla 2.2 Requerimientos de la norma ASTM-A158-93

Grado G 3 500 b											
Carbono		Silicio		Manganeso		Azufre		Fósforo		Aleaciones	
Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
3,40	-	1,30	1,80	0,60	0,90	-	0,12	-	0,15	Como requiera	

Estas variables controlan la fundición, o sea la condición del carbono y también su forma física. El carbono puede estar combinado en forma de carburo de hierro (F_3C) o existir como carbono libre en forma de grafito. La forma y distribución de las partículas de carbono sin combinar influye en forma determinante sobre las propiedades mecánicas del hierro fundido. Estas aleaciones se clasifican, por lo tanto, según el estado en que se encuentra el carbono en la microestructura, así como por la microestructura de la matriz.

Los principales elementos de aleación son carbono y silicio. El alto contenido de carbono incrementa la cantidad de grafito o de F_3C e incrementa el potencial de grafitización y fluidez del hierro fundido, sin embargo, su resistencia se ve afectada, ya que se promueve la formación de ferrita y el engrosamiento de la perlita aumentando la fragilidad de la aleación.

2.5.2 Dureza y microdureza

El ensayo de microdureza se aplicó para la determinación de la dureza de los volúmenes microscópicamente pequeños de la aleación. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168, Berkovich (1952), del laboratorio de

microscopia de minas del ISMM Moa. La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido).

El número de dureza HV se determinó por el tamaño de las huellas. Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de las huellas de la punta del diamante con 136° , con una penetración en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para los puntos de prueba seleccionados a una distancia de 1 cm la superficie de las probetas.

2.5.3 Desgaste gravimétrico

El ensayo típico para el desgaste gravimétrico es el llamado “roll paper”, donde un cilindro con papel de lija en la superficie con el que conociendo las condiciones y parámetros del ensayo tales como velocidad en min^{-1} , tipo de abrasivo y peso de la carga, se podrá conocer el comportamiento posterior del material controlando la pérdida de masa.

Este ensayo realizado según la norma ASTM G65-81 también tiene una variante en la que se utiliza un cilindro o rodillo de goma y se va depositando un mineral abrasivo, habitualmente sílice, y controlando igualmente la pérdida de masa en la probeta. El ensayo de desgaste gravimétrico se realizó en una pulidora automática (*PM 52 D. Automatic Metallographic Sample Grinding and Polishing Machine*) marca echoLAB, perteneciente a la Empresa Mecánica del Níquel de Moa. Para esto, primeramente se pesaron las probetas. Luego se colocó en el disco rotatorio de la pulidora metalográfica el cual gira a 1000 min^{-1} , un papel abrasivo con granos de óxido de silicio de grado 180 como sustancia abrasiva. Se fijaron las probetas en el portaprobetas del equipo girando a 50 rev min^{-1} . Luego de encender la máquina de ensayos se aplica una carga de 0,1 N y se activó el cronómetro para un tiempo de 20 minutos. Culminado el tiempo de 20 minutos se retiraron las probetas y se realizó el segundo proceso de pesaje de las mismas. Antes de pesar cada una de las probetas se limpiaron con agua y luego con

alcohol absoluto para retirar los residuos y el abrasivo seguido de un secado por aproximadamente 4 minutos.

La pérdida de peso se determinó utilizando la expresión:

$$\Delta P = G_i - G_f \quad (2.1)$$

Donde:

ΔP - pérdida de peso por desgaste abrasivo gravimétrico; g

G_i - peso inicial de la pieza; g

G_f — peso final; g

2.5.4 Análisis fractográfico

Las superficies de fractura, se observaron mediante un análisis visual, este se realizó en las tambores de freno que se encontraban fracturada después de la explotación. Donde se observaron los radios de curvaturas de la pieza en esa zona y el espesor de la misma mediante la microscopía con aumentos de 20X en un microscopio óptico de la marca OLYMPUS BX51M, el que posee magnificación de hasta 1000X.

Nota: Para una mejor selección de la aleación a emplear en la fabricación de tambores de freno, se fundamentará con los cálculos siguientes.

2.6 Cálculo del carbono equivalente

El contenido de carbono recomendado para producir una solidificación adecuada de la fundición nodular esta alrededor de 3,50 %. Esa cantidad puede variar de acuerdo con el contenido de silicio de la fundición, procurando mantener el carbón equivalente en un valor cercano a la composición eutéctica, aproximadamente 4,30 % C. El carbono equivalente está relacionado con la composición según la ecuación siguiente (Cortina, 2018).

$$C_{eqv} = C + \frac{(Si+P)}{3} \quad (2.2)$$

donde:

C_{eqv} – carbono equivalente, %

C – carbono, %

Si – silicio, %

P – fósforo, %

Adicionalmente, la cantidad de carbono afecta las propiedades mecánicas debido a que la fracción volumétrica de grafito está directamente relacionada con el contenido de C; el aumento de la fracción de esa fase genera una disminución de la resistencia a la tracción del material austemperado.

La influencia combinada del carbono y el silicio normalmente se evalúa como:

$$C_{eqv} = C + 0,30(Si) + 0,33(P) - 0,27(Mn) + 0,40(S) \quad (2.3)$$

donde:

C_{eqv} – carbono equivalente, %

C – carbono, %

Si – silicio, %

P – fósforo, %

Mn – manganeso, %

S – azufre, %

El cálculo del Carbono equivalente permite evaluar el efecto de la composición de los elementos en las fundiciones no aleadas. Permite estimar si una determinada fundición será hipo o hipereutética durante la solidificación.

2.6.1 Contenido de carbono y silicio en la fundición

A efectos de determinar el contenido de C y Si del metal base se utilizan las curvas de enfriamiento ya que los hierros fundidos son considerados aleaciones ternarias de hierro, carbono y silicio. El contenido de C y Si de una fundición solidificada metaestablemente puede calcularse en función de los valores de temperatura de transformación eutética (C_{eqvT}) y temperatura de arresto de líquidos (T_{AL}), en base a las fórmulas siguientes (Cortina, 2018).

$$Si = \frac{2085,40 - C_{eqvT}}{22,70} \quad (2.4)$$

$$\%C = \frac{2994 - T_{AL} - 53,07 \cdot Si}{212,30} \quad (2.5)$$

$$T_{AL} = 1569 - 97,30(C + \frac{1}{4}Si) \quad (2.6)$$

donde:

C_{eqvT} – carbón equivalente total, %

Si – silicio, %

T_{AL} – temperatura de líquidos de la austenita, °C

C – carbono, %

La presencia de silicio en el sistema Fe-C produce una disminución de la solubilidad del carbono en la austenita inicial. El contenido de carbono en la austenita, como una función de la temperatura de austenización y del contenido de silicio puede ser determinado por la ecuación siguiente (Cortina, 2018).

$$C_r = \frac{T_r}{420} - 1,70(Si) - 0,95 \quad (2.7)$$

En la cual, C_r es el contenido de carbono y T_r es la temperatura de austenización.

Para una determinada temperatura de austenización, el aumento del contenido de silicio genera una mayor velocidad de la reacción durante la primera etapa como consecuencia de la disminución del contenido de carbono en la austenita inicial. El Si promueve la nucleación y el crecimiento de la ferrita bainítica en la matriz de austenita e inhibe la formación de carburos durante la reacción de austemperado de la fundición nodular.

El contenido de manganeso varía en función de la matriz deseada, típicamente, puede ser tan baja como 0,10 % para hierros ferríticos y tan alta como 1,20 % para hierros perlíticos, ya que el manganeso es un fuerte promotor de la perlita.

$$Mn = 1,70(Si) + 0,15 \quad (2.8)$$

Se determina la cantidad de manganeso en la fundición, este puede modificar la microestructura del grafito ya que incide sobre su proceso de crecimiento. Cuando hay presencia de manganeso, promueve la resistencia a la grafitización; por lo

tanto, el contenido de manganeso necesario para reaccionar con azufre, sirve para retener microestructuras perlíticas, generando así las matrices perlíticas en las fundiciones de hierro.

La influencia de este elemento en la reacción de austemperado contempla dos aspectos. Su efecto sobre la solubilidad del carbono en la austenita y la manera como su segregación afecta la cinética del proceso. La solubilidad del carbono en la austenita inicial (C_r) es aumentada con el incremento de Mn.

2.6.2 Control del índice de saturación

Según el diagrama $Fe - Fe_3C$ generalmente, una aleación de hierro, con un $C_{eqv} = 4,30 \%$ solidifica de manera eutéctica (directamente de líquido a sólido). Las fundiciones de hierro hipereutécticas tienen un valor de $C_{eqv} > 4,30 \%$, mientras que en las hipoeutécticas es $< 4,30 \%$.

Se han estudiado muchas ecuaciones para representar la proporción más ventajosa de carbono en la fundición. La más aceptada es la de tomar como base la relación entre la cantidad de carbono que debe existir para obtener una concentración eutéctica y la que efectivamente hay, teniendo en cuenta una corrección debida a la influencia del porcentaje de los otros elementos presentes. Esta relación toma el nombre de grado de saturación y se expresa por:

$$Sc = \frac{C_{eqvT}}{4,30 \cdot 0,31(Si) \cdot 0,33(P) \cdot 0,66(Mn)} \quad (2.9)$$

Donde Sc es el grado de saturación en %.

En el intervalo de un grado de saturación entre 0,75 y 0,95 la estructura de la base será casi totalmente perlítica. Pero no sólo el porcentaje de los elementos químicos influye en la formación de la perlita. Hay otras muchas causas que actúan sobre las estructuras de la matriz, como son: la naturaleza de las materias empleadas, la conducción de la fusión, la presencia de centros de cristalización, la velocidad de enfriamiento. En este rango de valor del grado de saturación es el que se debe alcanzar para obtener la mayor resistencia mecánica.

El índice de saturación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$IS = \frac{C}{4,30 - \frac{(Si+P)}{3}} \quad (2.10)$$

Donde IS es el índice de saturación dado en %.

De acuerdo con estos métodos de control, si se conoce el valor de algunos de estos índices, se puede determinar con bastante aproximación el posible comportamiento de las fundiciones en piezas de diferentes espesores. El carbono eutéctico y el carbono eutectoide de la fundición se determina como:

$$C_{eut} = 4,30 - \frac{Si}{3} \quad (2.11)$$

$$C_{eutect} = 0,90 - \frac{Si}{9} \quad (2.12)$$

Los contenidos en carbono de las aleaciones eutécticas y eutectoides del diagrama estable varían con el contenido en silicio de las fundiciones y son inferiores a los que corresponden al diagrama metaestable.

2.6.3 Composición en las interfases

Para la determinación de las composiciones de equilibrio de las distintas fases en las zonas de interfase se tiene en cuenta la influencia del silicio a partir del diagrama de equilibrio ternario Fe - C - Si. Esto se logra con el uso de este diagrama en dos dimensiones, pero cuyas líneas de líquidos, sólidos y temperatura de equilibrio eutéctica están definidas por funciones que dependen de los contenidos de silicio (Si) y de carbono (C) en la fundición que solidifica. La composición en las interfases se determina por las ecuaciones siguientes:

$$T_{AS} = 1528 - 177,90(C + 0,18 \cdot Si) \quad (2.13)$$

$$T_E = 1154,60 + 6,50 \cdot Si \quad (2.14)$$

$$T_{GL} = 389,10 \cdot (C + \frac{1}{3} \cdot Si) + 503,20 \quad (2.15)$$

donde:

T_{AS} – temperatura de sólidos de la austenita, °C

T_E – temperatura eutéctica, °C

T_{GL} – temperatura de líquidos del grafito, °C

El significado de las temperaturas T_{AS} , T_E , T_{GL} puede observarse en la figura 2.2 que se corresponde con un sector del diagrama de equilibrio Fe - C - Si para un determinado porcentaje de Si.

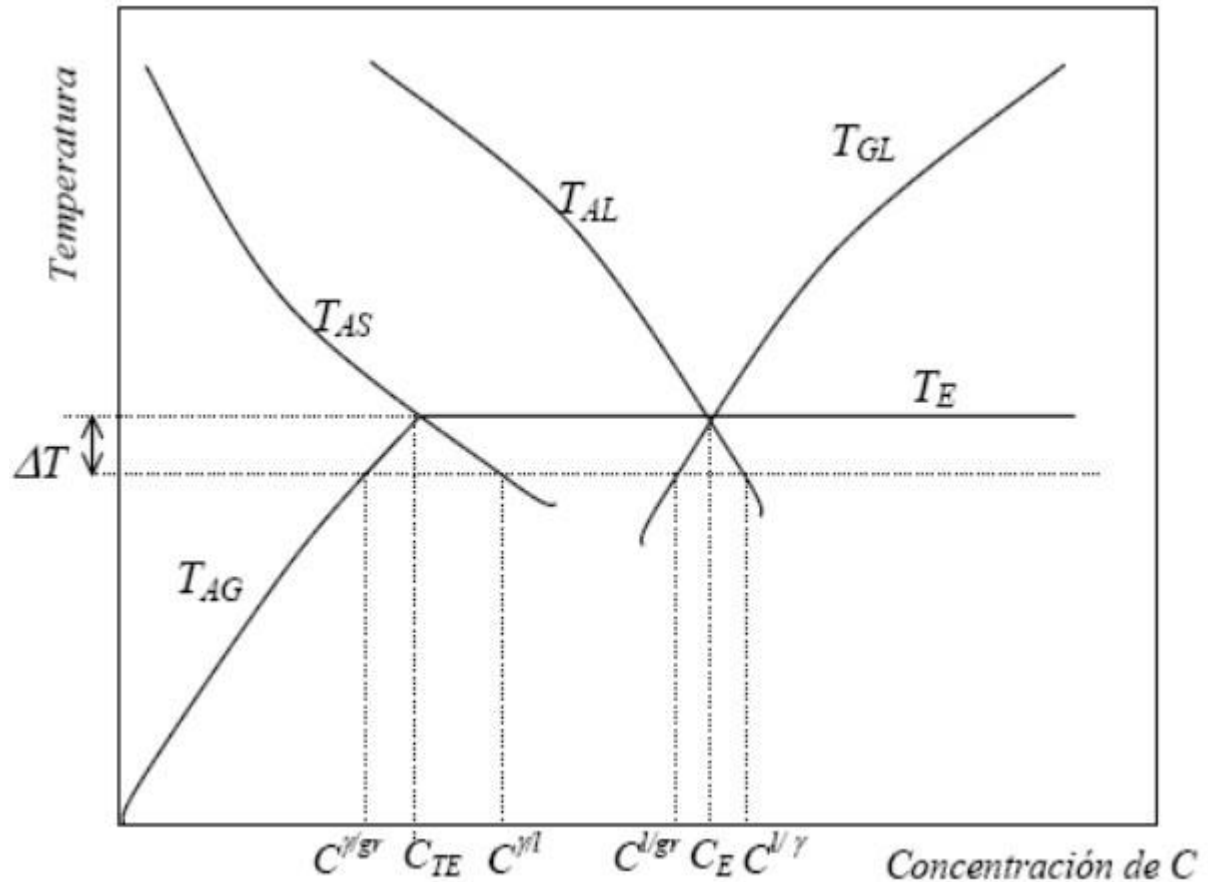


Figura 2.2 Región eutéctica del diagrama en Fe – C – Si para un determinado porcentaje de Si (fuente: Guliáev, 1997)

Por intersección entre T_{AS} y T_E se obtiene el punto de máxima solubilidad de carbono en la austenita a temperatura eutéctica.

$$C_{eqvT} = 0,80 - 0,22 \cdot Si \quad (2.16)$$

De las ecuaciones anteriores se pueden despejar los porcentajes de carbono en la zona de la interfase correspondientes a cada fase y cada temperatura. En todos los cálculos las concentraciones de equilibrio de carbono en las interfases se obtienen mediante las ecuaciones establecidas por Heine (1986) y Boeri (1989).

$$C_{\bar{r}}^l = \frac{1}{97,30} (1569 - T - 24,32 \cdot Si) \quad (2.17)$$

$$C_{\bar{l}}^r = \frac{1}{177,90} (1528,40 - T - 32 \cdot Si) \quad (2.18)$$

$$C_{\bar{gr}}^l = \frac{1}{3891} (T - 129,70 \cdot Si + 503,20) \quad (2.19)$$

donde:

T – temperatura, °C

$C_{\bar{r}}^l$ – concentración de carbono del líquido en contacto con la austenita

$C_{\bar{l}}^r$ – concentración de carbono de la austenita en contacto con el líquido

$C_{\bar{gr}}^l$ – concentración de carbono del líquido en contacto con el grafito

2.7 Aplicación de tratamiento térmico

Una vez seleccionada la aleación Fe 21 Ni, esta debe ser sometida a procesos de tratamientos térmicos con el fin de transformar su estructura y obtener de esta un mejor rendimiento mecánico según su uso posterior y este se realiza después de seleccionada la aleación para mejorar la resistencia y la dureza, aplicarla antes no cumple objetivo ya que, esos estudios fueron realizados anteriormente en estos trabajos (Cortina, 2018), (Leyva, 2017) y (Labañino, 2017)

Los hierros aleados en estado bruto de colada poseen la característica de presentar tensiones internas, debido a un desproporcional crecimiento de los granos durante el proceso de enfriamiento en los moldes. En el caso particular de la investigación, se toma como objetivo modificar las propiedades metalúrgicas y mecánicas del material empleando métodos de tratamiento térmico.

Para lograr la transformación de la fundición aleada y obtener estructura que se corresponda con una dureza y resistencia al desgaste, las muestras fueron previamente tratadas con un recocido bajo de alivio de tensiones, este tratamiento facilitaría una preparación de la estructura en cuanto a tamaño de los granos y estabilidad ante cualquier otro tratamiento.

2.7.1 Tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones

El recocido es orientado a garantizar un alivio de tensiones residuales en el material por el proceso de fundición, lograr una homogeneización de la microestructura y garantizar una pequeña cantidad de ferrita en la microestructura. De esta forma quedará preparada la microestructura de la aleación que será sometida a temple, donde ocurrirán nuevas transformaciones que darán lugar a nuevas estructuras en el metal. El recocido se aplicó a tres probetas. En la figura 2.3 se muestran las probetas para el tratamiento térmico.



Figura 2.3 Muestra para el tratamiento térmico (fuente: UEB Fundición, 2018)

El recocido debe alcanzar una temperatura de 700 °C aproximadamente. De esta forma, si después de sobrepasar la temperatura crítica y llegar a los 700 °C, se mantiene a esta temperatura durante un cierto tiempo, se consigue que la perlita se transforme en austenita. En esas condiciones, temperatura ligeramente superior a la eutectoide y mantenimiento prolongado, la austenita va cediendo carbono que se deposita en forma de grafito, obteniéndose al final ferrita y grafito.

En los tratamientos térmicos de las aleaciones ferrosas la temperatura crítica es la temperatura a la cual la fase austenítica es completamente estable. A diferencia de los aceros que tiene una temperatura crítica constante (temperatura eutectoide), las fundiciones de hierro son aleaciones ternarias hierro - carbono - silicio en las cuales la temperatura crítica varía con el contenido de carbono y de silicio.

El propósito principal del mismo es generar una estructura ferrítica y remover perlita y carburos, lográndose así la máxima ductilidad y tenacidad. El recocido

puede ser usado para lograr propiedades específicas, como un 15% o más de elongación. El tratamiento puede tener variantes, pero los más comunes son el enfriamiento interrumpido, enfriamiento lento controlado y tratamiento en una sola etapa.

En nuestro trabajo se empleó el tratamiento de una sola etapa, este tratamiento consistió en calentar la fundición desde la temperatura ambiente desde los 680 °C hasta los 700 °C, sin una austenización previa, se mantuvo a esta temperatura por 2 hs para que grafitizara la perlita.

Durante este tratamiento el tiempo aumenta con la disminución de la pureza del metal y generalmente es mayor que para los otros métodos debido a la falta de una homogenización previa. El enfriamiento se realizó a temperatura ambiente (aire). Este tratamiento se aplicó solo para eliminar la perlita en hierros con carburo no eutéctico. Si el hierro contiene carburos debe usarse el método del enfriamiento interrumpido o el del enfriamiento lento controlado.

2.8 Conclusiones del capítulo 2

- Se desarrolló el procedimiento experimental para la obtención de la resistencia al desgaste por el método gravimétrico, así como, la dureza, microdureza, el análisis químico y el fractográfico.
- La metodología de cálculo propuesta permite una mejor fundamentación en la selección de la aleación Fe 21 Ni.
- Después de seleccionada la aleación fue sometida a un tratamiento térmico por recocido.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En todos los materiales, la elección se basa en las propiedades que puedan conseguirse en cada caso. En las fundiciones de alta resistencia se buscan los mejores valores en sus propiedades mecánicas y estas derivan de la estructura constitutiva de las mismas. La ingeniería de materiales estudia los caminos para conseguir la estructura más adecuada, para lograr esas propiedades utilizando los medios de técnicas de aleaciones y de procedimientos de fabricación adecuados. Se hace énfasis en este último aspecto porque las propiedades mecánicas no son el producto de formulaciones de composición química más o menos sofisticada. La técnica de fabricación es tan importante y más que la adición de los elementos de aleación o, mejor dicho, la combinación de ambos aspectos es el camino para lograr los mejores resultados.

3.2 Resultados de los análisis de las muestras

Una vez preparada las muestras del Fe21Ni y del Fe24 en la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, se le realizaron varios análisis y ensayos, de los cuales se muestran los resultados en los siguientes epígrafes:

- Composición química del material
- Dureza y microdureza
- Ensayo de desgaste gravimétrico
- Análisis fractográfico

3.2.1 Composición química del material

Para la composición química de las probetas estudiadas se tomaron los resultados de tres análisis de chispas, realizados a ambos materiales, para sacar el promedio de los diferentes porcentajes de cada componente. Los valores de la media sacada se expresan en las tablas 3.1 para las probetas de Fe21 Ni y 3.2 para las probetas de Fe24.

Tabla 3.1 Composición química de Fe21 Ni

Grado G 3 500 b Fe21 Ni							
Material	C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
ASTM A 159	≤ 3,40	1,30 – 1,80	0,60 – 0,90	≥ 0,12	≥ 0,15	≥ 2,10	Resto
Probeta	3,48	1,68	0,76	0,07	0,05	0,59	Resto

Tabla 3.2 Composición química de Fe24

Grado G 3 500 b Fe24							
Material	C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
ASTM A 159	≤ 3,40	1,30 – 1,80	0,60 – 0,90	≥ 0,12	≥ 0,15	≥ 2,40	Resto
Probeta	3,27	1,61	0,81	0,06	0,04	0,12	Resto

Al comparar la composición química, establecida por las normas, se observa que la aleación de Fe 24 difiere un poco de la norma, la que presenta un menor contenido de carbono, sin embargo, en la aleación de Fe 21 Ni puede decirse que los elementos se ajustan a las mismas, aunque se destaca una pequeña diferencia entre ambas aleaciones.

3.2.2 Ensayo de dureza y microdureza

En la tabla 3.3 se reportan los resultados de dureza obtenidos de acuerdo al material empleado. Se muestra un esquema de la secuencia de mediciones de durezas realizados en correspondencia con las distintas aleaciones.

Tabla 3.3 resultado de las mediciones de dureza

Materiales	HT 250	Fe 21 Ni	Fe 24
Dureza (HB)	209	253	295
Dureza (HV)	220	280	310

Como se puede observar en la tabla, los valores de dureza varían con respecto a las muestras donde se puede deducir que la aleación más recomendable a utilizar

para la fabricación de tambores de freno de ómnibus Yutong es Fe 21 Ni con dureza de 253 HB y 280 HV. La aleación Fe 24 con dureza 295 HB y 310 HV está cerca de la fragilidad, ya que, a mayor dureza más frágil es el material.

3.2.3 Ensayo de desgaste gravimétrico

Se ha demostrado, experimental y teóricamente, que la dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión y, que además ha quedado manifestada la dependencia de la resistencia a la abrasión, de la composición química, dureza y microestructura de un material (Labañino, 2017).

El desgaste abrasivo de los cuerpos que trabajan a impacto repetido y por fricción, se caracteriza por la adherencia molecular, de cuyo resultado se presentan múltiples rasguños y cortes del metal, ocasionado por los procesos de fatiga y acritud de los materiales. Por lo tanto, deben estar contruidos con un material de gran resistencia a la abrasión que garantice una elevada resistencia al desgaste durante un período de explotación razonable.

En la tabla 3.4 se muestran los valores de los pesajes realizados a las probetas de Fe 24 y de Fe 21 Ni correspondiente a las tambores de Yutong.

Tabla 3.4 Valores de los pesos de la probeta

Material	Probeta	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)
Fe 24	1	76,91	76,47
	2	92,41	91,94
Fe 21 Ni	3	104,65	104,42
	4	81,95	81,72

La tabla refleja la cantidad de material desgastado en función de la masa en gramos, calculado a partir de los datos expuestos en la tabla anterior.

Tabla 3.5 Material desgastado

Material	Probeta	ΔP (g)
Fe 24	1	0,44
	2	0,47
Fe 21 Ni	3	0,25
	4	0,23

La variación de masa (ΔP) correspondiente a estos materiales se calculó a partir de la expresión (2.1) que relaciona la masa inicial y la masa final como la substracción de la mayor menos la menor. Como se puede observar en la tabla 3.4 la probeta de menor variación de peso es de 0,23 g perteneciente al Fe 21 Ni. Así que como es el material más resistente al desgaste, será el que se utilizará para la tambora de freno.

3.2.4 Análisis fractográfico

El análisis fractográfico evidencia la aparición de grietas en los orificios de ventilación (colocados para disminuir las temperaturas por fricción), las cuales se propagan por todo el borde superior (ver figuras 3.1 y 3.2) y a través de la superficie interior de forma transversal, fenómeno que toma lugar debido a la fragilidad del material y a la concentración de tensiones, el frente de la fractura comienza por la parte interior y se propaga por toda la pieza (Rosario, 2016).



Figura 3.1 Zonas colapsadas de las tamboras de freno (fuente: UEB Fundición, 2018)

La figura 3.2 representa una vista general de la rotura catastrófica en las tambores, donde se muestra más detalladamente la fractura y su consecuencia. Las flechas indican los puntos concentradores de tensiones por donde presumiblemente se inició la fractura.



Figura 3.2 Concentración de tensiones en las tambores de freno

3.3 Selección de la fundición aleada

Después de realizar los análisis, los ensayos y cálculos pertinentes, teniendo en cuenta los resultados arrojados se puede plantear que la aleación de Fe21 Ni, cumple con los requisitos para la elaboración de tambores de freno de Ómnibus Yutong, ya que la aleación seleccionada posee una mejor resistencia al desgaste, dureza y la composición química cumple con los requisitos de la norma para la elaboración de tambores de freno, sin embargo, la aleación Fe24 difiere un poco con las normas, tanto en la composición química, como en la resistencia al desgaste, dureza y otras propiedades las propiedades.

3.4 Susceptibilidad al agrietamiento del hierro fundido

En las fundiciones, las propiedades mecánicas dependen de la cantidad y forma del grafito en la matriz ferrosa y como el carbono puede estar combinado en forma de carburo de hierro (Fe_3C) o existir como carbono libre en forma de grafito, se hace necesario determinar el carbono equivalente el cual predice en qué tipo de solidificación se encuentra la fundición analizada. Por la ecuación (2.2) se determinó el carbono equivalente de la fundición gris, donde para un contenido de

carbono de 3,40 %, contenidos de fósforo y silicio de 0,02 y 1,62 % respectivamente este parámetro es de 3,90 %.

El carbono calculado en función del fósforo y el silicio clasifica a la fundición objeto de estudio del tipo hipoeutéctico según el diagrama hierro-carbono, valor por debajo del punto eutéctico (valores hipoeutécticos) donde la transformación austenítica da como resultado la matriz perlítica o ferrítica de la aleación.

Se determinó el carbono equivalente total por la ecuación (2.3) donde se consideran los elementos químicos que intervienen en la fundición, el resultado es de 3,80 % de carbono total, este resultado justifica que la solidificación del hierro gris objeto de estudio es hipoeutectoide. En la fundición, los altos contenidos de carbono equivalente C_{eqv} y de C, son indicios de fragilidad en el material, porque la tenacidad de la aleación disminuye con el aumento en el contenido de carbono, pues el carbono libre en forma de grafito se comporta como un material cerámico que fragiliza la matriz.

3.5 Determinación del contenido de carbono y silicio en la fundición

Las fundiciones de hierro se encuentran en una composición de carbono equivalente por debajo del 4,30 %, es decir, son de carácter hipoeutéctico. Para determinar la influencia que ejerce el silicio y el carbono en la fundición, por las ecuaciones (2.4) y (2.5) se calcularon estos parámetros, resultando que el silicio es de 0,91; para determinar el contenido de carbono se consideró la ecuación (2.5) que tiene en cuenta la temperatura de líquidos de la austenita donde la misma es de 1 196 °C, por lo que el carbono presente sería de 0,08 %.

El contenido de silicio en las fundiciones es de 2,00 a 5,00 %, un contenido aún mayor podría evitar la formación de las zonas con carburos de hierro que fragilizan la pieza producida, dado que el silicio aumenta la fluidez del líquido y afecta el proceso de solidificación promoviendo la grafitización; sin embargo, cuando el contenido es menor al 1,00 % no es suficiente para ello. Por cada 1,00 % de silicio, la composición eutéctica se desplaza hacia la izquierda del diagrama

aproximadamente 0,30 % de carbono, lo cual abate la temperatura a la cual la aleación empieza a solidificar.

El contenido de carbono en la austenita, como función de la temperatura de austenización y del contenido de silicio se determinó por la ecuación (2.7), se establece que, durante el proceso de solidificación, el contenido del carbono es de 1,00 %. La solubilidad del carbono en la austenita (eutecticidad), incrementa la precipitación del grafito y eleva la temperatura de transición dúctil/frágil. Un contenido más elevado de Si en la composición aumenta la resistencia de la ferrita y reduce la resistencia al impacto, promueve una alta resistencia a la oxidación en alta temperatura de la fundición.

El contenido de manganeso en la fundición se calculó por la ecuación (2.8) en correspondencia con el azufre presente; para un resultado de 0,33 %. Según el resultado del manganeso, el efecto del azufre puede ser balanceado con este elemento, sin manganeso en el hierro el indeseable compuesto sulfuro de hierro (FeS) se formará en el límite de grano, pero si el azufre se balancea con manganeso, se formará sulfuro de manganeso (MnS), el cual es menos dañino puesto que se distribuye dentro del grano, así tendrá una relación óptima entre el manganeso y el azufre para una estructura libre de sulfuro de azufre y máxima cantidad de ferrita.

Normalmente las composiciones empleadas en la producción son cercanas a la eutéctica, de manera que, durante el enfriamiento del material, desde la temperatura de colada hasta la temperatura ambiente, se producen dos cambios de fase fundamentales: la solidificación del eutéctico y la transformación eutectoide (sólido - sólido).

El grado de saturación calculado por la ecuación (2.9) es de 0,90 %; con lo cual se puede plantear que la estructura perlítica estará presente en la fundición aleada. El grado de saturación permite la determinación de las propiedades tecnológicas de la fundición, teniendo su incidencia en el porcentaje de carbono eutéctico y por lo tanto sobre las características finales del material.

El índice de saturación determinado por la ecuación (2.10) es de 0,90 %; lo cual solidifica como fundición hipoeutéctica. Serán hipoeutéticas cuando el valor es inferior a 1,00 %, eutéticas con el índice de saturación igual a 1,00 % e hipereutéticas cuando es superior a 1,00 %.

La cantidad de grafito es mayor al aumentar la velocidad de solidificación, ya que son capaces de crecer por la difusión del grafito en el hierro aún en estado líquido, seguido de su precipitación empieza el crecimiento de la austenita lo que impide que el grafito continúe su crecimiento y por lo tanto en la última zona en solidificar la cantidad tenderá a disminuir.

Las propiedades mecánicas del material se relacionan directamente con la microestructura final del mismo, que se obtiene después de la última transformación de fase, cuando la pieza ya alcanzó la temperatura ambiente. Por las ecuaciones (2.11) y (2.12) se determinó el carbono eutético y el carbono eutectoide de la fundición aleada. En las figuras 3.3 a) y b) se muestran los resultados obtenidos para el carbono eutético y el carbono eutectoide, los que corresponden con (Cortina, 2018).

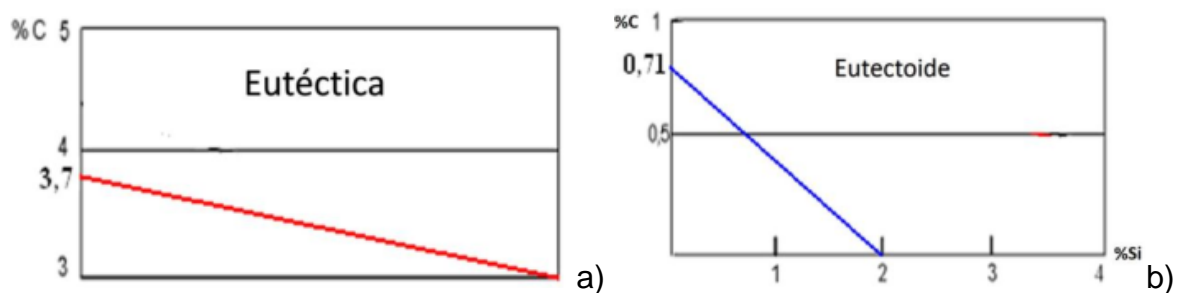


Figura 3.3 Contenido de carbono, a) Carbono eutético, b) Carbono eutectoide (fuente: Cortina, 2018)

Los contenidos en carbono de las aleaciones eutéticas y eutectoides del diagrama estable varían con el contenido en silicio de las fundiciones y son inferiores a los que corresponden al diagrama metaestable. En las transformaciones del diagrama estable, para una temperatura determinada, la austenita es capaz de disolver menor cantidad de carbono que el que disuelve, a la misma temperatura, cuando las transformaciones se hacen de acuerdo con el

diagrama metaestable. Sin embargo, el proceso de solidificación también tiene una gran importancia en las características físicas de la fundición, pues condiciona la transformación eutectoide posterior a través de factores tales como las microsegregaciones, el tamaño y la morfología de los granos.

El análisis de la composición en las fases para la fundición aleada Fe 21 Ni, se calculó por la ecuación (2.13) y (2.14); la temperatura del líquido de la austenita (T_{AL}) es de 1 196 °C; la temperatura de sólidos de la austenita (T_{AS}) es de 866,90 °C; la temperatura del líquido en el grafito (T_{GL}) es de 1 040, 20 °C y la temperatura eutéctica (T_E) es de 1 165 °C.

La máxima solubilidad de carbono en la austenita a temperatura eutéctica en correspondencia con el carbono total en la eutéctica se determinó por la ecuación (2.15), donde para un contenido de silicio de 1,40 %; este contenido es de 0,44 %.

Para la determinación de los porcentajes de carbono se consideró una temperatura de fusión de 1 380 °C. Según la ecuación (2.15) la concentración de carbono del líquido en contacto con la austenita (C_r^l) es de 2,40 %; la concentración de carbono de la austenita en contacto con el líquido (C_l^r) calculado por la ecuación (2.17); es de 1,10 %.

En los cálculos se considera que en las fases se cumplen las condiciones de equilibrio determinadas por el diagrama ternario, es decir, que las curvas definidas determinan la composición que deben tener las fases en la zona de contacto entre ellas para una determinada temperatura. Esto no ocurre en el resto del volumen de la fundición en donde la composición depende de la difusión del soluto.

Para facilitar la interpretación de los resultados del análisis del contenido de carbono, fósforo y silicio en la fundición, se muestra en la figura 3.4 la representación de los resultados obtenidos, donde la microsegregación y la concentración del silicio en la fundición determina el porcentaje de soluto en el líquido e influye en las concentraciones de carbono correspondientes al equilibrio de las fases.

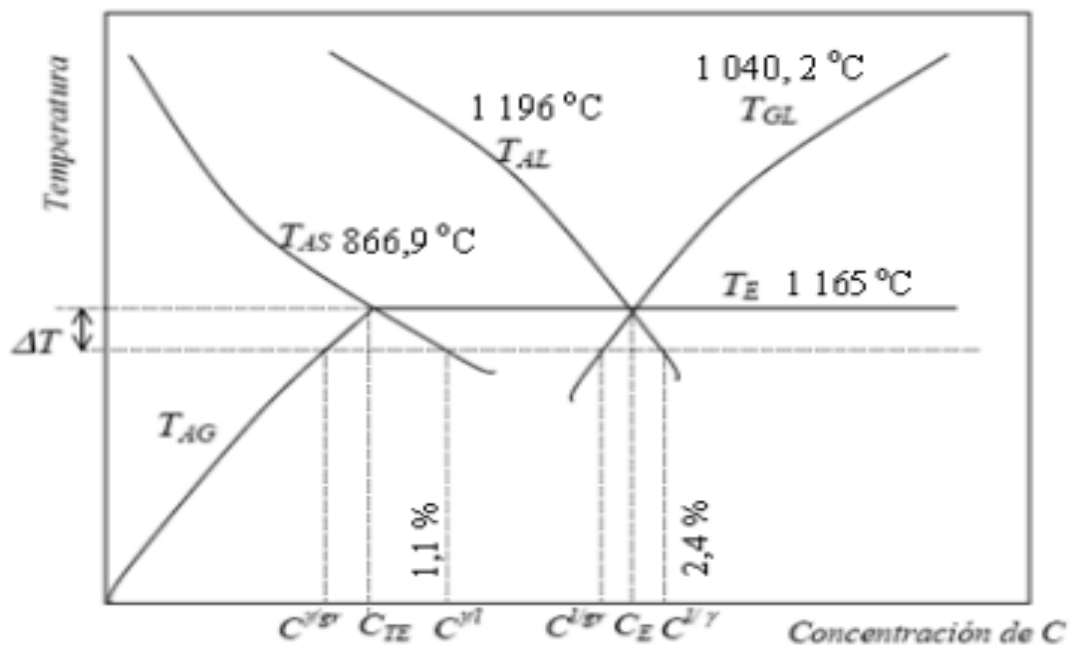


Figura 3.4 Resultados del contenido de carbono, fósforo y silicio en la fundición

En la figura, las curvas se hacen continuar por debajo de la temperatura eutéctica, de manera que la temperatura al descender por debajo de dicha temperatura continúa la solidificación, lo cual, con estas prolongaciones, fueron calculadas las concentraciones de carbono de las distintas fases. Es importante destacar que en los cálculos se considera que en las fases se cumplen las condiciones de equilibrio determinadas por el diagrama ternario, es decir que las curvas definidas determinan la composición que deben tener las fases en la zona de contacto entre ellas para una determinada temperatura. Esto no ocurre en el resto del volumen de la fundición en donde la composición depende de la difusión del soluto.

3.6 Tratamiento térmico

Se estableció el ciclo de tratamiento térmico de la fundición Fe21 Ni. En la figura 3.3 se muestra el ciclo aplicado.

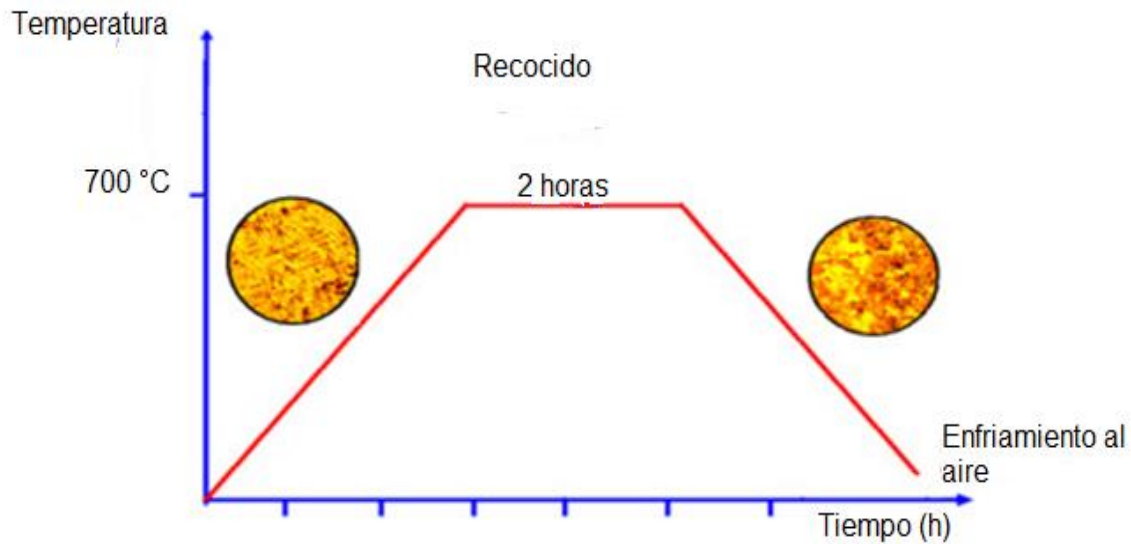


Figura 3.5 Ciclo del tratamiento térmico de la fundición Fe21 Ni

El tratamiento térmico se aplicó desde la temperatura ambiente hasta los 700 °C. La etapa del recocido consistió en un enfriamiento muy lento al atravesar la zona crítica en que tiene lugar la reacción eutectoide. Esto permite a la austenita descomponerse en las fases estables de ferrita y grafito. Una vez realizada la grafitización, la estructura no sufre ninguna nueva modificación durante el enfriamiento a temperatura ambiente, quedando constituida por el grafito en una matriz ferrítica, de esta manera se obtiene una matriz ferrítica más carbono recocido, conociéndose como hierro ferrítico.

3.7 Análisis económico

Para la realización de la valoración económica de las tamboras de freno para ómnibus Yutong, se tomaron los datos de la ficha de costo, realizada por la Unidad Empresarial de Base (UEB) de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, teniendo presente los procesos tecnológicos que participan en la elaboración de estas tamboras.

El precio de las mismas, en el proceso de fundición, basado en los elementos de gastos que se reflejan en la ficha de precio, tales como los gastos de materia

prima y materiales, gastos de fuerza de trabajo, gastos indirectos de producción, gastos generales, de administración y otros es de 343,96 CUP y 149,04 CUC, cuando se hacen la comparación con los precios de importación, que para las tambores de freno es de € 200.00, este precio se incrementa con la trasportación que dependen de la situación geográfica del suministrador, por este análisis se considera que económicamente es recomendable lograr potenciar la asimilación de esta producción, en el taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel y, de esta forma contribuir a una de las indicaciones de la dirección máxima del País: la sustitución de importaciones.

3.8 Conclusiones del capítulo 3

- Los ensayos de resistencia al desgaste, de dureza y microdureza, así como el análisis químico y fractográfico realizados, evidenció que la fundición aleada Fe 21 Ni presenta mejores propiedades para la fabricación de tambores de freno.
- Los cálculos realizados, reflejan que el carbono, el silicio, el fósforo y por último el manganeso, en este orden, son los que mayor incidencia tienen en la solidificación de la fundición aleada.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GUENERALES

- De acuerdo con los criterios técnicos-económicos analizados, se determinó que la aleación Fe 21 Ni es la más adecuada para la fabricación de tambores de freno para ómnibus Yutong, según la tecnología de la Empresa Mecánica del Níquel.
- Se propone un tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones, a la fundición gris del tipo Fe 21 Ni, el que permitirá aumentar la resistencia y durabilidad de las tambores de freno.
- La aleación Fe 21 Ni con dureza de 253 HB y 280 HV es la más recomendada a emplear para la elaboración de tambores de freno y se evidencio que la causa de rotura está dada por los orificios de ventilación, producto a su fragilidad.
- La valoración económica demostró que la aleación Fe 21 Ni es la más factible para la elaboración de tambores de freno de ómnibus Yutong con € 200.00 de importación.

RECOMENDACIONES

- Realizar una producción prototipo que permita calcular el tiempo de durabilidad de las tambores de freno.
- Garantizar el control adecuado de la dureza, en la aleación, al realizar el tratamiento térmico para evitar incremento de la fragilidad de la misma.
- Elaborar una tecnología de fundición, considerando la aleación seleccionada, para garantizar la fabricación de tambores de freno a gran escala en la Empresa Mecánica del Níquel.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Luque, Andres Salasar. 2005.** *Sistema dinámico del sistema de freno de un automóvil.* Madrid : s.n., 2005.
2. **Álvarez, Freddy Manuel Miranda. 2013.** *Peritaje del frenado en automóviles.* Santa Clara : s.n., 2013.
3. **Cantillo, Leandro Mora. 2018.** *Tecnología de fundición para la fabricación de bolas de molino en moldes desechables.* Moa : s.n., 2018.
4. **Carrillo, Andrés Josué Velasteguí. 2015.** *Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado.* Quito : s.n., 2015.
5. **Castro, Arturo Eduardo Muñoz. 2008.** *Implantación iónica por plasma en Titanio y aceros inoxidable usados en prótesis e instrumental médico.* Toluca : s.n., 2008.
6. **Castro, Guillermo. 2009.** *Fundiciones.* 2009.
7. **Cortina, Roberto Méndez. 2018.** *Caracterización metalográfica y mecánica de una fundición aleada para ser empleada en la industria del transporte .* Moa : s.n., 2018.
8. **Cueva, Diego Emiliano Carpio. 2018.** *Diseño y construcción del sistema de frenos de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico.* Cuenca : s.n., 2018.
9. **Guevara, Edwin Hernan Guevara y Bautista, Jose Andres Llor. 2015.** *Fabricación en fundición gris del tambor de freno para un automóvil ensamblado en Ecuador.* Quito : s.n., 2015.
10. **Gulíáev, A. P. 1997.** *Metalografía.* Moscú : Mir, Moscú, 1997.
11. **Ighaddouran, Mohammed. 2013.** *Estudio del efecto de los ultrasonidos en la microestructura y propiedades mecánicas de componentes de automoción de conformados en estado semisólido .* Moa : s.n., 2013.
12. **Labañino, Jorleydis Perdomo. 2017.** *Rediseño de tamboras de freno del tren delantero para ómnibus Yutong.* Moa : s.n., 2017.

13. **Leyva, Ernesto Galano. 2017.** *Rediseño de tamboras de freno para el tren trasero de ómnibus Yutong.* Moa : s.n., 2017.
14. **López, Jefferson Andres y García, Juan Pablo Galeano. 2017.** *Caracterización y análisis fractografico mediante las técnicas SEM y DRX en acero SAE 5160, tratado termicamente mediante temple y revenido a diferentes temperaturas.* Bogotá : s.n., 2017.
15. **Molina, Javier Galvin Peñafiel. 2018.** *Estudio técnico económico para fabricar pastillas de freno en cerámica para autos.* Guayaquil : s.n., 2018.
16. **Morales, Laura Camila Casallas y Martínez, Oscar Sebastian Abril. 2014.** *Evaluación de las propiedades mecánicas, microestructurales y resistencia a la corrosión del acero ASTM A53 grado B sometidos a fluidos corrosivos para aplicaciones geotérmicas.* Bogotá : s.n., 2014.
17. **Palacios, Founy Khalleth Trellez y Acuña, Nelson Daniel Ortiz. 2016.** *Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en tres materiales utilizados en la industria minera.* Bogotá : s.n., 2016.
18. **Rosario, Enedys Hernández Del. 2016.** *Selección de la aleación y tecnología de fundición de tamboras de ómnibus Yutong .* Moa : s.n., 2016.
19. **UEB Fundición. 2018.** *Manual de operaciones.* Moa : s.n., 2018.

