



UNIVERSIDAD DE MOA  
Dr. Antonio Núñez Jiménez  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

## **DISEÑO DE TAMBORAS DE FRENO PARA ÓMNIBUS YUTONG**

Tesis en Opción al Título de Máster en Electromecánica

**Autor:** Ing. Yariel Peña Leyva

**Tutores:** Dr. C. Mayda Ulloa Carcassés  
Dr. C. Isnel Rodríguez González

**Moa, 2019**



**UNIVERSIDAD DE MOA  
Dr. Antonio Núñez Jiménez  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

## **DISEÑO DE TAMBORAS DE FRENO PARA ÓMNIBUS YUTONG**

Tesis en Opción al Título de Máster en Electromecánica

**Autor:** Ing. Yariel Peña Leyva

**Moa, 2019**

## Contenido

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Conceptos generales sobre el transporte .....	4
1.2.1. Clasificación de transporte público .....	6
1.3. El autobús como medio de transporte.....	7
1.3.1. Averías en los equipos de transporte de pasajeros .....	7
1.4. Generalidades sobre el freno.....	7
1.4.1. Tipos de frenos .....	8
1.4.2. Características del sistema de freno usado en vehículos .....	9
1.4.3. Características de los frenos de fricción .....	10
1.4.4. Tipos de frenos de fricción.....	11
1.4.5. El freno de tambora .....	11
1.4.6. Ventajas del freno de tambor .....	15
1.4.7. Desventajas del freno de tambor .....	15
1.4.8. Clasificación de los frenos de tambora .....	15
1.4.9. Principales daños y deformaciones en las tamboras de freno.....	17
1.5. Método de elaboración de las tamboras .....	19
1.6. Material usado para la elaboración de las tamboras de freno.....	19
1.7. El tratamiento térmico en los hierros fundidos .....	21
1.8. Fundamentos de la rotura .....	21
1.9. Concentración de tensiones.....	21
1.10. Fundamentos de la fractura .....	23
1.11. Uso del método de elementos finitos para el análisis de piezas .....	23
1.12. Estado actual de los procesos de fabricación de tamboras .....	24
1.13. Conclusiones del capítulo .....	25
CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1. Introducción .....	26

2.1. Determinación de la disponibilidad técnica .....	26
2.2. Caracterización de las tamboras.....	27
2.3. Cálculo de los esfuerzos de frenado en las tamboras.....	28
2.3.1. Cálculo del radio dinámico.....	30
2.4. Selección del material para la fabricación de las tamboras .....	33
2.5. Métodos, procedimientos y condiciones experimentales .....	34
2.5.1. Selección y preparación de las muestras .....	35
2.5.2. Determinación de la composición química del material .....	36
2.5.3. Análisis fractográfico de las muestras.....	36
2.5.4. Determinación de la dureza superficial .....	36
2.5.5. Análisis metalográfico .....	37
2.5.6. Ensayos de desgaste gravimétrico .....	37
2.5.7. Determinación de las propiedades mecánicas .....	38
2.6. Cálculo del carbono equivalente .....	39
2.7. Cálculo del contenido de carbono y silicio en la fundición .....	39
2.8. Modelación y simulación .....	40
2.8.1. Modelación de las tamboras .....	40
2.8.2. Cargas y restricciones .....	41
2.9. Análisis estadístico y prueba de significancia .....	41
2.9.1. Formulación de la hipótesis estadística .....	42
2.10. Tecnología para el tratamiento térmico de las tamboras .....	43
2.11. Conclusiones del capítulo .....	44
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
3.1. Introducción.....	45
3.2. Determinación de la disponibilidad técnica .....	45
3.3. Resultado de la experimentación .....	46
3.3.1. Composición química del material .....	46
3.3.2. Resultados del análisis fractográfico.....	47
3.3.3. Resultados del análisis de la dureza.....	49
3.3.4. Resultados del análisis metalográfico.....	51
3.2.5. Resultados del ensayo de desgaste gravimétrico .....	54
3.2.6. Resultados del análisis de tracción .....	55

3.4. Susceptibilidad al agrietamiento de las aleaciones de hierro fundido .....	56
3.5. Contenido de carbono y silicio y magnesio en la fundición .....	57
3.6. Determinación de los esfuerzo del proceso de frenado .....	59
3.7. Resultado del cálculo del radio dinámico .....	60
3.8. Resultado del momento de frenado .....	60
3.9. Selección del material para la fabricación de las tamboras .....	60
3.10. Simulación de las tamboras .....	61
3.10.1. Comportamiento de las tamboras actuales.....	61
3.10.2. Evaluación del diseño propuesto .....	63
3.10. Prueba de hipótesis y análisis estadístico .....	65
3.11. Evaluación económica.....	66
3.12. Evaluación ecológica .....	67
3.13. Conclusiones del capítulo.....	68
CONCLUSIONES GENERALES .....	69
RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

*Yo: Yariel Peña Leyva, autor del presente trabajo de diploma y el tutor Dr.C. Isnel Rodríguez González, declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que esta entidad disponga de su uso cuando estime conveniente.*

---

*Dra.C. Mayda Ulloa Carcasés*

---

*Ing. Yariel Peña Leyva*

---

*Dr.C. Isnel Rodríguez González*

## **PENSAMIENTO**

*“No habrá dificultad que no seamos capaces de vencer, ni error que no pueda evitarse si puede preverse, ni deje de rectificarse rápidamente, si llega a cometerse”.*

*“Y siempre mediremos, por encima de todo un Técnico y un Científico no por sus conocimientos, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus conocimientos”.*

*“Fidel Castro Ruz”*

## **DEDICATORIA**

*A mis tutores Dra.C. Mayda Ulloa Carcasés y Dr.C. Isnel Rodríguez González, por la confianza depositada, por su constante preocupación y por la ayuda prestada para la realización de mi tesis.*

*A mis padres, por darme el apoyo necesario para poder continuar y terminar mi carrera.*

*A mis amigos por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles y ayudarme a alcanzar este éxito.*

*A toda mi familia por la preocupación y los ánimos de seguir adelante y buscar un mejor futuro.*

*A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica por servirme de ejemplo y contribuir en mis deseos de seguir el camino de la superación profesional.*

*A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.*

*A la revolución por darme la oportunidad de cumplir mi sueño profesional*

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se propone la solución al problema de rotura prematura, que se manifiesta en las tamboras de freno de los ómnibus Yutong. Con el objetivo de evaluar y modificar las características geométricas de las tamboras; así como definir el tipo de aleación para su fabricación, se consideraron dos posibilidades de aleación de acero a utilizar para la fabricación, a los que les efectuaron ensayos de laboratorio que posibilitaron su caracterización. A partir de la simulación, con el empleo del método de elementos finitos, se establecieron las características tenso deformaciones, permitió identificar que la forma constructiva de los agujeros de ventilación no responde a una adecuada distribución de tensiones, por lo que se realizó una propuesta de diseño, el garantiza una mejor configuración geométrica y características técnicas, de acuerdo con las normas establecidas. Se pudo observar que el Fe21Ni posee mejores propiedades y resistencia para su fabricación. La evaluación económica, teniendo en cuenta los procesos tecnológicos que participan en la elaboración de las tamboras, se pudo determinar que el impacto económico que asciende a 12300 (CUC+CUP)/año.

## **SUMMARY**

In this work, a solution to the problem of premature breaking that Yutong bus manifests in the brake's drum was presented. It were considered two possibilities of alloy steel to use for manufacture, the ones that made tests of laboratory in order to his characterization, which were evaluated and modified the mentioned above brake's drum geometric and characteristics, as well as circumscribing the kind of alloy for its manufacturing. The simulation, with the finite-element method, permitted to establish the tense characteristics, it allowed identifying than the constructive way of the holes of ventilation, do not answer to an adequate distribution of stresses, because of that a proposal of design, which guarantee a better geometric configuration and technical characteristics, according to the established standards. It could be observe the Fe21Ni, possess better properties and resistance for its manufacture. Economic appraisal, taking into account the technological processes that take part in the brake's drum elaboration reflect that the cost-reducing impact was 12 300,00 (CUC +CUP)/year.

## **INTRODUCCIÓN**

Una de las alternativas para garantizar la transportación terrestre de pasajeros en nuestro país se logró en el año 2005 la contratación de los primeros ómnibus marca Yutong procedentes de China, ya en la actualidad contamos en nuestro país con un parque de más de 8800 unidades de esta marca ocupando el 70 por ciento del mercado nacional de vehículos de este tipo (Revista Juventud Rebelde, 2018) lo cual ha desarrollado considerablemente la transportación terrestre del país.

Para lograr el mantenimiento de esta técnica es necesaria la importación sistemática de piezas de repuesto tales como las tamboras de freno, las cuales han presentado un elevado índice de rotura.

La rotura de estos elementos influye de manera negativa en la transportación nacional de pasajeros reduciendo su capacidad, ya que disminuye la disponibilidad técnica del equipamiento y aumenta el tiempo empleado en intervenciones de mantenimiento, lo que se traduce en afectaciones de los horarios de viaje y pérdidas económicas.

Las tamboras desechadas, por lo general pasan a formar parte del material no utilizable en los patios de los talleres de mantenimiento y reparación o a orillas de las carreteras, hecho que provoca afectaciones medioambientales.

Con las condiciones económicas que presenta actualmente el país se dificulta mucho el suministro de piezas de repuesto y acceso a fuentes de financiamiento, dificultando la importación de recursos, por lo cual se hace necesario asumir en la industria de fabricación nacional determinados elementos que permitan sustituir importaciones.

Con este objetivo la Empresa de Ómnibus Nacionales y la Industria Militar solicitaron a la Empresa Mecánica del níquel, “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa el desarrollo de la tecnología para la fabricación de las tamboras de los ómnibus Yutong, teniendo en cuenta que en años anteriores se logró la fabricación de tamboras para otros modelos de ómnibus (Reinosa, 2012).

Esta empresa, cuya misión es mantener la disponibilidad técnica y operacional de la industria Cubana del Níquel así como de terceros clientes, asumió la tarea de fabricar dichas tamboras.

### **Situación problemática:**

En los últimos tiempos el sistema de frenos de los ómnibus Yutong ha sido uno de los elementos que más se ha visto afectado ya que las tamboras de freno han presentado rotura prematura por fractura, 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, lo que afecta a la transportación de pasajeros y considerables pérdidas económicas por recaudación y adquisición de piezas, otras afectaciones ambientales se producen debido a que cuando se retiran la tamboras averiadas, en carretera, son enviadas a la cuneta, afectando las mismas y al medio circundante.

Tomando en consideración la anterior situación problemática planteada, definimos el siguiente **problema:**

Inadecuada configuración geométrica que no garantiza una distribución uniforme de las tensiones que actúan y por consiguiente la rotura prematura por fractura de las tamboras de ómnibus Yutong.

Como **objeto de estudio** se define: tamboras de freno de los ómnibus Yutong.

**Objetivo general:** obtener un diseño que garantice una distribución uniforme, de las tensiones que actúan y, por consiguiente la reducción de las averías en tamboras de ómnibus Yutong.

### **Objetivos específicos:**

1. Analizar el diseño y las condiciones de explotación para las tamboras actuales de los ómnibus Yutong.
2. Determinar la configuración geométrica de las tamboras de ómnibus Yutong que ofrezca mejor distribución de tensiones.
3. Proponer un material para la fabricación de las tamboras según el diseño propuesto

**Campo de acción** será: diseño de tamboras de freno para ómnibus Yutong.

A partir del objetivo general declarado se establece la siguiente **hipótesis**:

Si se realiza un análisis de las cargas que actúan para el instante de frenado, la distribución de tensiones, así como los materiales empleados en la fabricación de las tamboras de freno de los ómnibus Yutong y su configuración geométrica, entonces se podrá proponer un diseño que optimice la configuración geométrica y permita reducir las frecuentes averías que se producen en estos elementos.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las siguientes tareas de trabajo:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con proceso de frenado en automóviles; así como la fabricación de tamboras de freno.
2. Determinación de las causas que intervienen en la rotura prematura, por fractura, de las tamboras de freno.
3. Determinación de la composición química de los materiales que intervienen en la fabricación de las tamboras.
4. Realizar ensayos al material de las tamboras para determinar su resistencia mecánica y al desgaste; así como su microestructura.
5. Análisis de los resultados y determinación de los efectos técnicos, económicos y ambientales.

# CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

## 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 nutrirnos de ideas anteriores y poder llegar a conclusiones claras y verídicas, salvándonos así de posibles errores a causa de falta de experiencia.

Objetivo del capítulo:

Puntualizar los aspectos teóricos que permitan actualizar el conocimiento sobre el transporte de pasajeros, así como los materiales, tecnología y métodos utilizados para la fabricación de tambores de freno y las causas de sus roturas.

## 1.2. Conceptos generales sobre el transporte

El transporte es una actividad del sector terciario, entendida como el desplazamiento de objetos o personas (contenido) de un lugar (punto de origen) a otro (punto de destino) en un vehículo (medio o sistema de transporte) que utiliza una determinada infraestructura (red de transporte). Esta ha sido una de las actividades terciarias que mayor expansión ha experimentado a lo largo de los últimos dos siglos, debido a la industrialización y al aumento del comercio y de los desplazamientos humanos tanto a escala nacional como internacional; y los avances técnicos que se han producido y que han repercutido en una mayor rapidez, capacidad, seguridad y menor coste de los transportes (Aparicio *et al*, 1995).

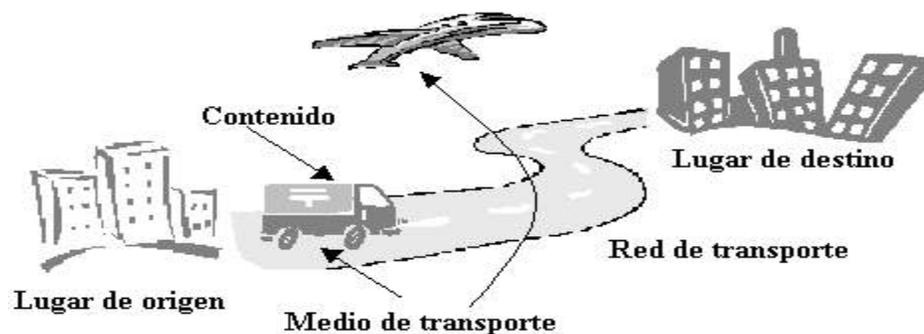


Figura 1.1 Elementos que intervienen en el transporte (Fuente: Aparicio *et al*, 1995)

Los medios de transporte son los diferentes sistemas o maneras de desplazar un determinado contenido de un lugar a otro. Estos se clasifican en medios terrestres (ferrocarril, automóvil), aéreos (avión) o acuáticos (fluviales o marítimos), cada uno de los cuales necesitará infraestructuras diferentes para su funcionamiento: Vías férreas y estaciones para el tren, carreteras para los automóviles, aeropuertos para los aviones, y puertos náuticos para los barcos. (Alonso, 1990).

La red de transporte es la infraestructura necesaria para la circulación de los vehículos que transportan las mercancías o las personas. Suelen estar dispuestas en el territorio conectando los núcleos de población de tal manera que se genere una red o malla de diferente densidad dependiendo del tráfico generado en la zona, normalmente las redes más densas se sitúan en torno a los nudos o lugares en los que se conectan varios ejes o sirven de intercambiador entre medios de transporte diferentes (carretera-aeropuerto; carretera-puerto; ferrocarril-carretera) (Gonzales, 2005).

La existencia de unas u otras redes de transporte, o de la mayor o menor densidad de las mismas viene determinada por una serie de factores condicionantes, históricos, naturales o espaciales

El transporte puede ser clasificado de varias maneras de forma simultánea, referente al tipo de viaje, al tipo de elemento transportado o al acceso.

- Transporte de pasajeros, transporte de carga

El transporte de carga es la disciplina que estudia la mejor forma de llevar de un lugar a otros bienes. Asociado al transporte de carga se tiene la logística que consiste en colocar los productos de importancia en el momento preciso y en el destino deseado. La diferencia más grande del transporte de pasajeros es que para éste se cuentan el tiempo de viaje y el confort.

- Transporte urbano, transporte interurbano

Esta clasificación es muy importante por las diferencias que implican los dos tipos de viajes. Mientras los viajes urbanos son cortos, muy frecuentes y recurrentes, los viajes interurbanos son largos, menos frecuentes y recurrentes.

- Transporte escolar

El transporte escolar o transporte de estudiantes lleva a cabo viajes de niños y adolescentes desde los lugares de residencia hasta los colegios y viceversa. Pese a que muchos de estos viajes se realizan en medios de transporte privado, es frecuente que se lleven a cabo de forma colectiva en buses y caravanas especiales para este propósito.

- Transporte público y privado

Se denomina transporte público a aquel en el que los viajeros comparten el medio de transporte y que está disponible para el público en general, a diferencia del transporte privado los viajeros de transporte público tienen que adaptarse a los horarios y a las rutas que ofrezca el operador. Incluye medios como autobuses, trolebuses, tranvías, trenes, ferrocarriles suburbanos o ferry. En el transporte interregional también coexiste el transporte aéreo y el tren de alta velocidad (Luque, 2005).

El transporte público permite el desplazamiento de personas de un punto a otro en el área de una ciudad y es, por tanto, parte esencial de las ciudades. Disminuye la contaminación, ya que se usan menos automóviles para el transporte de personas, además permite el desplazamiento de personas que no tienen auto y necesitan recorrer largas distancias.

El más representativo de los modos de transporte privado es el automóvil. Sin embargo, la caminata y la bicicleta también están dentro de esta clasificación. El taxi, pese a ser un servicio de acceso abierto al público, es clasificado como transporte privado.

### **1.2.1. Clasificación de transporte público**

El transporte público se clasifica, según González (2005), considerando los siguientes elementos:

- Transporte terrestre:
  - Por carretera (Autobús – Autobús de tránsito rápido – Trolebús – Taxi)
  - Ferrocarril (Tranvía–Tren ligero–Metro – Tren – Tren de alta velocidad).
- Transporte marítimo y fluvial:
  - Transbordador (Ferry) – Catamarán – Lancha colectiva – Góndola
- Transporte aéreo:
  - Teleférico – Telecabina.
  - Aerolínea.

### 1.3. El autobús como medio de transporte

El autobús, bus, colectivo, guagua, micro u ómnibus (Puede variar el nombre según la región o país) (figura 1.2) es el vehículo diseñado para transportar numerosas personas mediante vías urbanas. Generalmente es usado en los servicios de transporte público urbano e interurbano, y con trayecto fijo. Su capacidad puede variar entre 10 y 120 pasajeros. En sistemas de autobús de tránsito rápido, la capacidad de los buses puede variar entre 160 y 240 pasajeros (<http://www.wikipedia.com>). Los autobuses son prácticos y eficientes en rutas de corta y media distancia, siendo frecuentemente el medio de transporte más usado a nivel de transportes públicos, por constituir una opción económica.

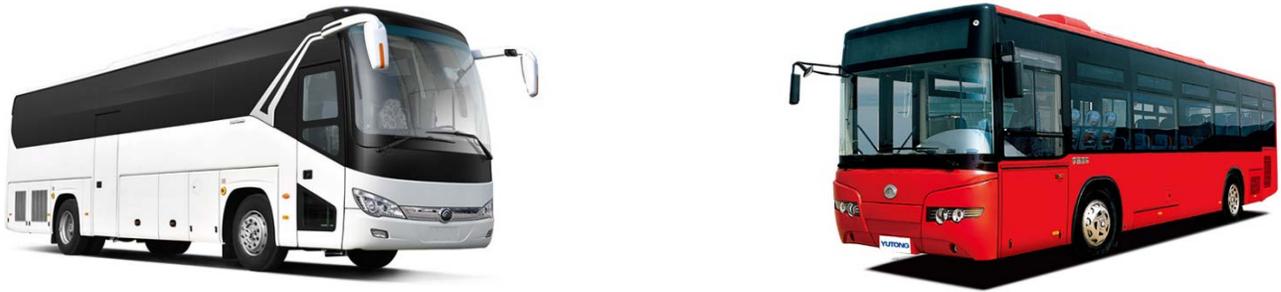


Figura 1.2. Autobuses chinos de la marca Yutong

#### 1.3.1. Averías en los equipos de transporte de pasajeros

El correcto uso y mantenimiento periódico permiten prolongar la vida útil y lograr un rendimiento mayor de los autobuses. Efectuar la reparación, de acuerdo con las normas, es una de las condiciones indispensables para que los autobuses logren el mejor efecto social y económico. Cuando se violan estos principios surgen con gran periodicidad averías que sacan a los equipos de circulación, dentro de las más frecuentes (Szczepaniak y Aragón, 1994) están:

- Avería de la válvula protectora de cuatro bucles.
- El freno pierde funcionamiento de repente.
- El freno arrastra y atasca.

### 1.4. Generalidades sobre el freno

Para contrarrestar toda la cantidad de movimiento que pueda tener un automóvil rodando a una cierta velocidad, si se quiere detener, se tendrá que oponer un esfuerzo resistente que sea capaz de transformar toda esa energía de movimiento hasta conseguir su detención. A

esa energía del movimiento se le llama Energía Cinética (*del griego KINOS-OU*, que significa movimiento), y la forma más rápida es transformarla en calor, haciendo que dos superficies colocadas convenientemente se froten entre sí enérgicamente.

La ley ya nos marca pautas de actuación, puesto que nos exige una serie de características que deben cumplir los dispositivos de frenado. Las más importantes: rapidez y eficacia para que el vehículo pueda ser parado e inmovilizado en las pendientes más pronunciadas.

Un freno es un dispositivo utilizado para detener o disminuir el movimiento de algún cuerpo, generalmente, un eje, árbol o tambor. Son transformadores de energía, por lo cual pueden ser entendidos como una máquina por ser, ya que transforman la energía cinética y potencial de un cuerpo en calor o trabajo dando como resultado la detención de las partes en movimiento y en este sentido pueden visualizarse como “extractores” de energía.

Estos son elementos de máquinas de vital importancia en los procesos, donde se requiere llevar la velocidad de trabajo a cero en el menor tiempo posible, sin que sea una situación traumática; además de servir de seguridad para la vida de las personas que son usuarias del equipamiento de una empresa o servicio. (Luque.; Álvarez y Vera, 2005).

A pesar de que los frenos son también máquinas, generalmente se les encuentra en la literatura del diseño como un elemento de máquina y en literaturas de teoría de control pueden encontrarse como actuadores.

#### **1.4.1. Tipos de frenos**

Según el tipo de accionamiento (Martínez, 2009) de frenos pueden ser clasificados en:

- Frenos de fricción.
- Freno neumático.
- Frenos mecánicos.
- Frenos hidráulicos.
- Freno de estacionamiento.
- Freno eléctrico. Hay dos tipos: freno regenerativo y freno reostático. Cuando utiliza los sistemas de tracción eléctrica se denomina freno dinámico.

A continuación abordaremos en los frenos de fricción por ser los de mayor interés para el presente trabajo.

#### **1.4.2. Características del sistema de freno usado en vehículos**

Además de ser utilizado por numerosos tipos de máquinas, la aplicación de los frenos es especialmente importante en los medios de transporte para mejorar su funcionamiento y seguridad.

Para frenar el vehículo se necesita absorber la energía cinética producida en su desplazamiento. Esto se realiza por fricción entre dos piezas de elevado coeficiente de adherencia, una de ellas fija, como son las zapatas o pastillas de freno, y la otra móvil, que pueden ser los tambores o los discos de freno, según se empleen frenos de tambor o frenos de disco o la combinación de ambos en las distintas ruedas.

El frotamiento entre sí de estos dos elementos detiene el movimiento de las ruedas y transforma la energía de movimiento en calor, que es disipado a la atmósfera por las corrientes de aire que circulan a través de ellos durante el desplazamiento del vehículo.

Las acciones de frenado, junto con las de control direccional y las del sistema de tracción, representan las maniobras básicas en la conducción. Por tanto, los componentes de una instalación de frenado deben diseñarse para aprovechar al máximo la presión aplicada por el conductor y para que dicha presión sea la mínima posible (Alonso, 1990.)

El sistema de frenos tiene como misión la de aminorar la velocidad del vehículo, llegando incluso a detenerlo. Esta disminución de velocidad se hará a voluntad del conductor y se conseguirá de una forma segura y con el mínimo esfuerzo. Además, ha de llevar un sistema que permita poder detener el vehículo, si se avería parte del circuito. Otra dotación de la que dispondrá el sistema, es la que le inmovilice cuando se deje estacionado (*freno de estacionamiento o de mano*).

El sistema de frenos utilizado de manera adecuada y bien mantenido es un medio seguro de detener el vehículo.

El sistema de freno neumático en un automóvil está formado por tres circuitos: el de los frenos de servicio, accionado a través del pedal de freno; el de los frenos de estacionamiento, aplicándose o no por el conductor a través de una palanca; y el de los frenos de emergencia, que utiliza parte del circuito del freno de servicio y del de estacionamiento, en caso de que no exista presión de aire (Andrino, 2006).

En los automóviles cuando se frena, debido a la altura, sobre la calzada del centro de gravedad, se produce una mayor distribución del peso del coche sobre el eje delantero.

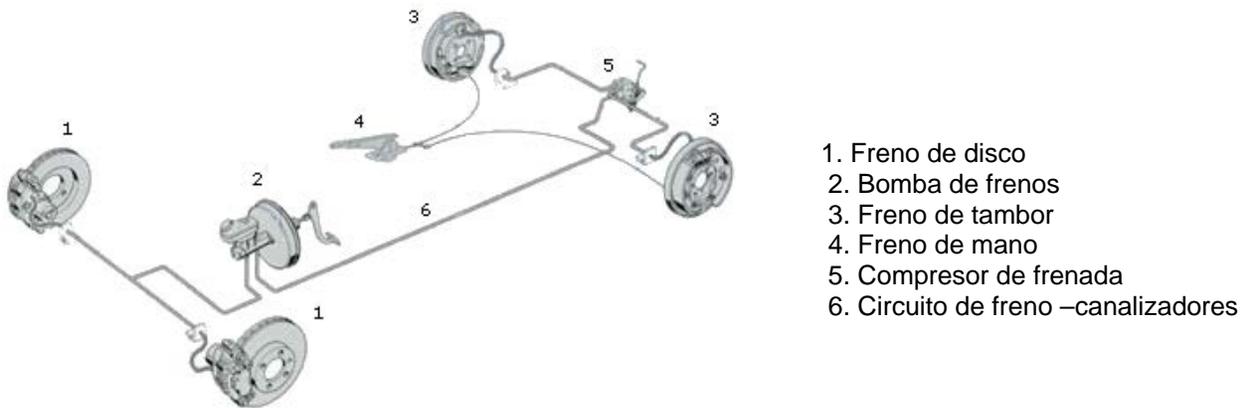


Figura 1.3. Esquema básico de un circuito de frenos

Este efecto de distribución no uniforme de carga sobre el eje delantero es mayor cuanto mayor es la deceleración y el centro de gravedad más alto (Andrino, 2006).

Por este motivo en todos los coches los sistemas de frenado son más potentes en el eje delantero que en el trasero. De hecho se suele diseñar los frenos para que se bloqueen antes en el eje delantero que en el trasero incluso en seco, ya que es más fácilmente solucionable un sub viraje que un sobre viraje. Para mejorar aún más la frenada, en vehículos de competencia se usan repartidores de frenada manuales ya que el reparto de frenada ideal no es siempre el mismo, por ejemplo, en mojado y seco ya que la deceleración es diferente y con ella el reparto de peso sobre los ejes (Andrino, 2006). Por sus características el tipo de freno más utilizado en automóviles es el de fricción.

#### 1.4.3. Características de los frenos de fricción

Los frenos de fricción están diseñados para actuar mediante fuerzas de fricción, siendo este el medio por el cual se transforma en calor la energía cinética del cuerpo a desacelerar. Siempre constan de un cuerpo fijo sobre el cual se presiona un cuerpo a desacelerar. Son muy utilizados en los vehículos, estos deben reunir tres características principales:

- Una adecuada absorción y disipación de calor.
- Suficiente entrada de aire que les permita disipar el calor generado al frenar.
- Las pastillas de freno deben mantener sus propiedades de fricción en un amplio rango de temperaturas.

#### 1.4.4. Tipos de frenos de fricción

Según los elementos empleados y la forma de efectuar el desplazamiento de la parte móvil, los frenos empleados en las ruedas de los automóviles pueden ser de dos tipos, el de disco y el de tambor o tambora, a continuación abordaremos en las características de cada uno de ellos (Martinez, 2009).

##### 1.3.4.1. El freno de disco

Un freno de disco es un dispositivo cuya función es detener o reducir la velocidad de rotación de una rueda (figura 1.4). Hecho normalmente de acero, está unido a la rueda o al eje.

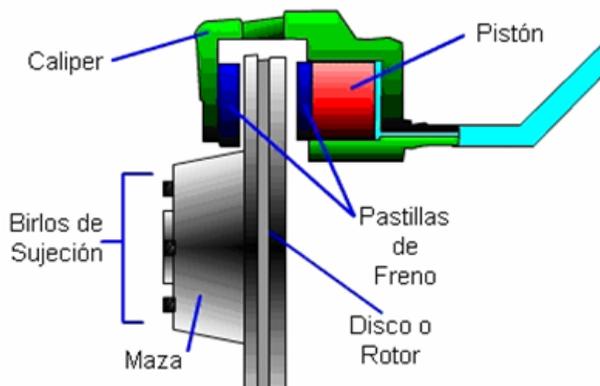


Figura 1.4. Mecanismo del freno de disco de un automóvil (Fuente: López, 2011)

En este tipo de freno una parte móvil (el disco), solidario con la rueda que gira, es sometido al rozamiento de unas superficies de alto coeficiente de fricción (las pastillas) que ejercen sobre ellos una fuerza suficiente como para transformar toda o parte de la energía cinética del vehículo en movimiento, en calor, hasta detenerlo o reducir su velocidad, según sea el caso. Esta inmensa cantidad de calor ha de ser evacuada de alguna manera, y lo más rápidamente posible.

El mecanismo es similar en esto al freno de tambor, con la diferencia de que la superficie frenante es menor pero la evacuación del calor al ambiente es mucho mejor, compensando ampliamente la menor superficie frenante.

#### 1.4.5. El freno de tambora

Los frenos de tambora modernos se inventaron en 1902 por Louis Renault (Romero, 2016), aunque un tipo de freno similar pero menos sofisticado. En los primeros diseños las

zapatas eran dirigidas mecánicamente; a mediados de los años 1930 se introdujo un sistema hidráulico por medio de un aceite especial, si bien el sistema clásico se siguió utilizando durante décadas en algunos modelos.

En los años 60 y 70 se empezaron a dejar de fabricar coches con frenos de tambor en el eje delantero. En su lugar se fue introduciendo el freno de disco al igual que en las motos y actualmente todos los vehículos los incorporan al menos en el eje delantero. Esto es debido a que los frenos de tambor con zapatas internas tienen poca capacidad de disipar el calor generado por la fricción, lo que hace que se sobrecalienten fácilmente. En esos casos el tambor se deforma lo que hace necesario presionar con más fuerza para obtener una frenada aceptable.

Actualmente los frenos de tambor se siguen utilizando en los vehículos de gama baja, sobre todo en las ruedas traseras, debido a su menor coste sobre los frenos de disco. En los vehículos de gran tonelaje, con sistemas de frenado por aire a presión, como los camiones, siguen empleándose por la gran superficie de intercambio de energía por fricción que presentan, mucho mayor que la de una pastilla de disco.

Este tipo de freno (Figura 1.5) está constituido por una tambora que es el elemento móvil, montado sobre el buje de la rueda por medio de unos tornillos o espárragos y tuercas, del cual recibe movimiento, y un plato de freno, elemento fijo sujeto al puente o la mangueta. En este plato van instalados los elementos de fricción, llamados ferodos, y los mecanismos de accionamiento para el desplazamiento de las zapatas.

El tambor de freno rota conjuntamente con el neumático, cuando se acciona el pedal de freno, el mecanismo de empuje de las zapatas hace que éstas se abran, girando sobre los pivotes. Esto hace que los forros de las zapatas entren en contacto con la tambora de freno, generando la fricción entre ellos que a su vez genera la fuerza de frenado que disminuye la velocidad de giro del mismo y con ello la de la rueda. Cuando no se acciona el pedal de freno, un muelle recuperador que une las dos zapatas, hace volver éstas a su posición inicial (<http://www.maquinaspesadas.org>).

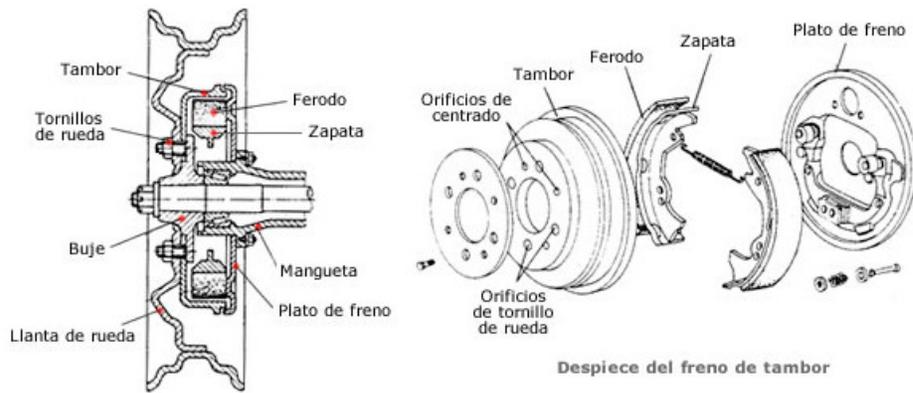


Figura 1.5. Elementos que componen el freno de tambora (Fuente: Lopez, 2011)

A continuación abordaremos sobre las características de los principales elementos que conforman este tipo de freno:

- Tambora

La tambora es la parte móvil que va unida a la rueda, constituye la superficie contra la cual interactúa el frenado del vehículo, lo que provoca una reducción de la velocidad. Su interior va mecanizado para facilitar el acoplamiento adecuado de las zapatas. Recibe casi la totalidad del calor desarrollado en el frenado (Figura 1.6). Se fabrica, generalmente, de fundición gris perlítica con grafito esférico, material que se ha impuesto por su elevada resistencia al desgaste y menor costo de fabricación y que absorbe bien el calor producido por el rozamiento en el frenado. Cabe destacar también, para ciertas aplicaciones, las fundiciones aleadas, de gran dureza y capaces de soportar cargas térmicas muy elevadas.



Figura 1.6. Tambora de freno de un ómnibus Yutong (Fuente: Romero, 2016)

El tambor va torneado en el interior y se debe garantizar un equilibrado dinámico del mismo, con un mecanizado fino para facilitar el acoplamiento con los ferodos, sin que se produzcan agarrotamientos. En la zona central lleva practicados unos taladros donde se acoplan los espárragos de sujeción a la rueda y otros orificios que sirven de guía para el centrado de la rueda al buje. El diámetro de los tambores, según las características del vehículo, esta normalizado según la norma UNE 26 019.

- Plato de freno

El plato de freno (Figura 1.7.) está constituido por un plato portafrenos o soporte de chapa embutida y troquelada, sobre el que se monta el bombín o bombines de accionamiento hidráulico y las zapatas de freno y demás elementos de fijación y regulación. Las zapatas se unen por un extremo al bombín y por el otro a un soporte fijo o regulable; a su vez, se mantienen unidas al plato por medio de un sistema elástico de pasador y muelle, que permite un desplazamiento de aproximación al tambor y las mantiene fijas en su desplazamiento axial.

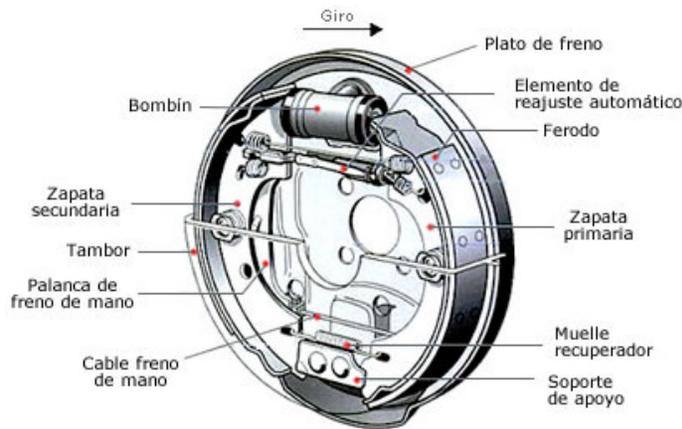


Figura 1.7. Esquema interno de un plato de freno (Fuente: Romero, 2016)

- Zapatas

Las zapatas de freno están formadas por dos chapas de acero soldadas en forma de media luna y recubiertas en su zona exterior por los ferodos o forros de freno, que son los encargados de efectuar el frenado por fricción con el tambor. Los forros de freno se unen a la zapata metálica por medio de remaches embutidos en el material hasta los 3/4 de espesor del forro para que no rocen con el tambor, o bien pegados con colas de contacto.

El encolado favorece la amortiguación de vibraciones y, como consecuencia, disminuyen los ruidos que éstas ocasionan durante el frenado.

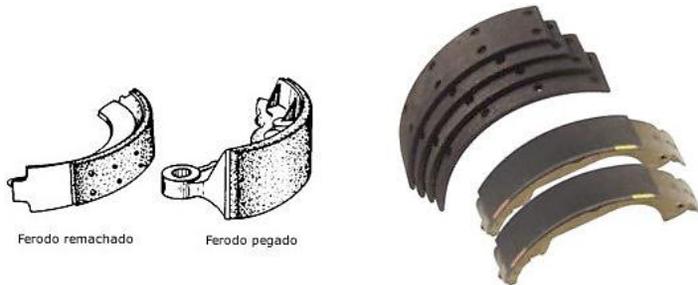


Figura 1.8. Zapatas de freno de tambora (Fuente: Romero, 2016)

#### **1.4.6. Ventajas del freno de tambor**

Dentro de las principales ventajas de este tipo de freno se tienen:

- Efecto autofrenante.
- Mayor superficie frenante.
- Posibilidad de usar materiales de fricción más blandos.
- Posibilidad sencilla de freno de mano.
- Costo reducido.
- Mayor posibilidad de proteger el sistema contra proyecciones de agua, barro y otros elementos externos contaminantes, haciéndolos más idóneos para condiciones de nieve o lluvia, en caminos o carreteras secundarias.

#### **1.4.7. Desventajas del freno de tambor**

A pesar de todas sus ventajas también hay que tener en cuenta que también tiene desventajas, estas son:

- Dificultad de evacuación del calor.
- Aumento del recorrido del pedal por dilatación.
- Mayor posibilidad de bloqueo de rueda.
- Mayor posibilidad de pérdida de eficacia de los frenos (Fading)
- Operaciones de mantenimiento más costosas.

#### **1.4.8. Clasificación de los frenos de tambora**

Según su tipo los frenos de tambora pueden clasificarse de tres formas:

- Sistema simplex

Su característica es que las zapatas disponen de un punto de apoyo fijo sobre el que pivotan al ser accionadas (figura 1.9.a). Este sistema tiene un bombín de freno de doble efecto. Cuando se acciona el pedal de freno, la zapata primaria y secundaria se pone en contacto con el tambor de freno. La particularidad de este sistema es que la zapata de freno primaria, debido a su montaje, se apoya en el tambor en contra del giro del mismo obteniendo así una presión ejercida superior sobre la superficie de frenado del tambor. Por el contrario, la zapata secundaria se apoya en el tambor en el sentido de giro del mismo, lo que hace que la zapata tienda a salir rechazada, traduciéndose en una menor presión ejercida sobre el tambor, respecto a la zapata primaria.

El inconveniente de este sistema es que debido a que la presión ejercida por las zapatas no es homogénea en toda la superficie de frenado del tambor, la frenada obtenida no es muy eficaz (Santos, 2015).

- Sistema dúplex

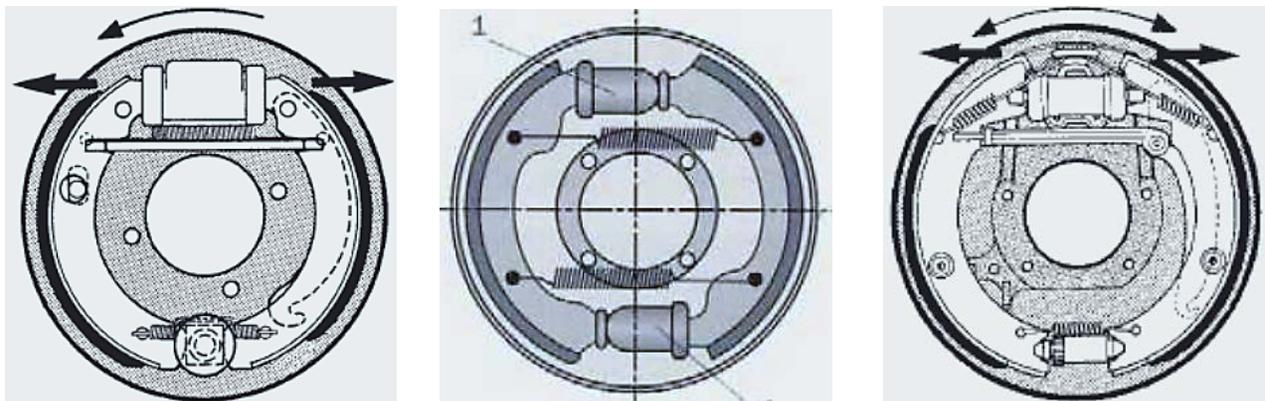
Este se caracteriza porque las zapatas están montadas en serie, en forma de que ambas zapatas son primarias. Siguen teniendo un punto de apoyo sobre el que pivotan al ser accionadas, pero disponen de dos bombines de freno simples, de forma que el bombín de freno de una zapata sirve de punto de apoyo para la otra. Con esto se consigue que las dos zapatas sean primarias, es decir, que ambas zapatas apoyen contra el tambor de freno en contra de su giro. Obteniendo una frenada más eficaz, ya que la presión ejercida por las mismas es más uniforme en toda la zona de frenado del tambor que en el sistema simplex (Santos, 2015).

- Sistema *twinplex*

En el *sistema twinplex*, los puntos de apoyo de las zapatas en lugar de ir montados fijos van montados en posición flotante (figura 1.9.b). Con este montaje de las zapatas se obtiene un mejor reparto de la presión ejercida sobre el tambor de freno, debido a que el efecto cuna que sufre las zapatas queda paliado (Santos, 2015).

- Sistema duo – servo

El sistema duo-servo se caracteriza porque el punto de apoyo consiste en una biela de acoplamiento (figura 1.9.c). Las dos zapatas son también primarias. Al accionar las zapatas de freno, pivotan sobre su apoyo a la vez que empujan, mediante la biela de acoplamiento, a la otra zapata. Con este sistema se consigue un reparto de la presión de frenado más uniforme por toda la superficie de frenado del tambor y del forro de la zapatas. Son muy sensibles a las variaciones de coeficiente de fricción que puedan sufrir los forros de las mismas (Santos, 2015).



a. Sistema simplex

b. Sistema twinplex

c. Sistema Duo-Servo

Figura 1.9. Tipos de freno de tambor (Santos, 2015)

#### 1.4.9. Principales daños y deformaciones en las tamboras de freno

Es importante tener precauciones cuando se realiza las de reparación de los frenos de un autobús debido a que se pueden encontrar problemas como son:

- Puntos duros

Los puntos duros consisten en alteraciones provocadas en puntos aislados de la superficie de frenado del tambor, ocasionadas por altas temperaturas generadas durante las frenadas. Un punto endurecido consiste en una pequeña protuberancia que se origina en la superficie de trabajo del tambor (Suárez, 2013).

Un tambor con áreas grande de puntos duros en la superficie de frenado del tambor, necesariamente debe ser rectificadas, si esta operación no se realiza tendrán como consecuencia perdida de eficiencia en el frenado, el pedal de freno vibra y el frenado es inconstante a baja velocidad.

- Fisuras o grietas

Fisuras con más de 1 mm de profundidad exigen que el tambor sea rectificado inmediatamente. Si después de rectificado las fisuras permanecieran visibles y no fueran percibidos por la prueba de la uña, el tambor puede ser reutilizado y si en el caso de que las fisuras fueran profundas existe el peligro de quiebra del tambor, en este caso se recomienda cambiar por otro tambor nuevo (Suarez, 2013).

- Centro alto

Algunos tambores pueden presentar variaciones en su geometría, en función de las condiciones de uso. El centro alto es una de ellas y consiste en una elevación regular en la parte central de la superficie de trabajo del tambor, esta irregularidad disminuye el contacto entre la balata y la superficie. Si esta elevación fuera superior a 1 mm, el tambor debe ser rectificado si las condiciones de medidas lo permiten. En caso contrario resultará un freno ineficiente y con ajustes prematuros de regulado en los frenos (Suárez, 2013).

- Forma cóncava o convexa

Son tambores que también presentan deformaciones en la superficie de trabajo de concavidad o convexidad. En este caso como el de centro alto, la deformación no debe ser superior a 1 mm, caso contrario proceder a rectificar si las condiciones de medidas lo permiten. En caso contrario también resultara un freno ineficiente y con ajustes prematuros de regulado de frenos (Suarez, 2013).

- Forma en cono recto

Esta deformación en cono recto puede traer consecuencias graves. Consiste en la inclinación del plano de la superficie de contacto del tambor con el patín de freno. Esta inclinación puede generar una tolerancia de 1 mm entre la parte externa e interna del tambor como límite tolerable. Medidas superiores a 1 mm pueden comprometer seriamente el funcionamiento del conjunto de freno debido a que el patín de freno trabajara torcido y bajo esta condición la posibilidad de quiebra y deformación en el patín de freno es inminente (Suárez, 2013).

- Forma ovalada

Esta deformación es una alteración geométrica de la tambora, dando así la apariencia ovalada. Si esta deformación geométrica no es superior a 0.2 mm la tambora puede ser utilizada, siendo el síntoma de ovalización la vibración del pedal de freno al aplicarlo en un proceso de frenado (Suarez, 2013).

### **1.5. Método de elaboración de las tamboras**

Las tamboras de freno son fabricadas por fundición. Para lograr la resistencia, al mismo tiempo que se logra un poder de disipación conveniente, se suelen agregar nervios a la parte exterior de estas.

De acuerdo con la experiencia de la fundición las tamboras de freno deben moldearse con moldeo químico autofraguante, este proceso mantiene los requisitos dimensionales, de calidad y económicamente es más factible, el moldeo de arena en verde también puede ser una variante pero generalmente se usa a menor escala ya que el taller de Fundición debe tener experiencia para lograr esta fabricación en este tipo de moldeo, la línea de moldeo automática y máquinas de moldeo son una buena opción para lograr este objetivo.

### **1.6. Material usado para la elaboración de las tamboras de freno**

El material que se emplea para fabricarlas es la fundición gris perlítica con grafito esferoidal (hierro fundido o hierro colado) de alta calidad con estructura homogénea, este material se ha impuesto ante otros ya que garantiza una adecuada estabilidad de las prestaciones durante el periodo de vida de las mismas en virtud a sus características que a continuación se señalan:

- Fácil fusión y moldeo.
- Bajo costo de fabricación.
- Buena resistencia mecánica.
- Buena resistencia al desgaste.
- Buena capacidad amortiguadora.
- Resistencia a la compresión.
- Excelente rectificado.

Estas son sometidas a estudios de dureza, para así lograr que estén en el rango que corresponde a una calidad excelente.

La fundición gris es un tipo de aleación de las más utilizadas en la industria. Los elementos fundamentales que las componen son: carbono, silicio, fósforo, manganeso y azufre.

Al analizar la microestructuras de los hierros fundidos veremos que estas están formadas por el grafito en estado libre y por una base metálica. De acuerdo a la constitución de la base metálica los hierros fundidos pueden ser:

- Perlíticos

La estructura está formada por perlita y grafito, la perlita contiene aproximadamente 0,8 % carbono, así que el 0,8 % C estará en forma combinada con el hierro en forma de  $Fe_3C$  y el resto en estado libre en forma de grafito.

- Ferrítico

Su estructura consta de ferrita y grafito, prácticamente todo el carbono estará en forma de grafito.

- Ferrítico – Perlítico

La estructura estará formada de ferrita, perlita y grafito, la cantidad de carbono que se combina con el hierro será aproximadamente de 0,8 %.

Como se ha dicho anteriormente, las propiedades de los hierros fundidos dependen de la base metálica y de la forma en que se encuentra el grafito. La tabla # 1, se muestran algunas de las propiedades mecánicas del hierros fundido gris, con la base metálica ferrítica o perlítica.

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de los hierros fundidos.

Propiedades Mecánicas	hierro fundido gris	
	Ferrítico	Perlítico
Resistencia a la Tracción, MPa	120-200	250-320
Elongación, %	0,5	0,2
Dureza, HB	117-148	207-255

Como se puede observar la resistencia mecánica del hierro fundido gris perlítico es superior que en el caso del ferrítico y la plasticidad es menor.

Además de la ferrita y de la perlita por medio del tratamiento térmico se puede obtener otras estructuras (como martensita), que posee mayor resistencia que la ferrita y la perlita. Sin embargo, ya que las propiedades del hierro fundido gris fundamentalmente se determina por la forma del grafito y éstas no se cambian por medio del tratamiento térmico, pues el tratamiento térmico en los hierros fundidos grises se utiliza en raras ocasiones, con el fin de aumentar las propiedades mecánicas.

### **1.7. El tratamiento térmico en los hierros fundidos**

Este tiene como fines específicos:

- Eliminar tensiones internas surgidas durante la solidificación de la aleación.
- Disminuir la dureza y mejorar la maquinabilidad de la pieza fundida.
- Cambiar las propiedades mecánicas de la pieza variando los constituyentes de la base mecánica.

El tratamiento térmico para los hierros fundidos puede dividirse en dos grupos: los que aumentan y los que reducen la estabilidad de la estructura. (Reinosa, 2012).

### **1.8. Fundamentos de la rotura**

La rotura de los materiales de ingeniería es casi siempre un hecho no deseado por varias razones; entre éstas cabe resaltar las posibles pérdidas de vidas humanas, las pérdidas materiales y su incidencia en el suministro de productos y servicios. Aun cuando las causas de la rotura y el comportamiento de los materiales sean conocidos, la prevención de las roturas es muy difícil de garantizar. Las causas usuales son la selección y la conformación inapropiados de los materiales, el diseño inadecuado del componente, o bien su mala utilización en servicio. Es responsabilidad del ingeniero desarrollar planes de contingencia para el caso de una posible rotura y, si ésta ocurre, estudiar su causa y tomar las medidas preventivas apropiadas contra futuros incidentes.

Una de las formas de rotura es la fractura, esta ocurre con cargas estáticas aplicadas y a temperaturas relativamente bajas.

### **1.9. Concentración de tensiones**

Una concentración de tensiones (también llamado concentrador de tensión) es una localización dentro de un sólido elástico donde el campo de tensiones se concentra. Un

objeto es más resistente cuando la fuerza se distribuye uniformemente sobre su área, de tal manera que una reducción del área efectiva, por ejemplo causada por una fisura, conduce un aumento de las tensiones cerca del límite de dicho defecto (respecto a la situación en que dicho defecto no existiera). Un material puede fallar por propagación de grieta cuando una concentración de tensiones excede el límite del material a pesar de que la tensión media esté por debajo de límite resistente.

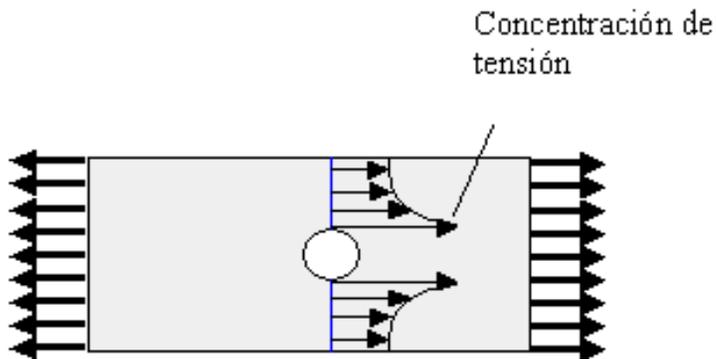


Figura 1.10. Ejemplo de un punto concentrador de tensiones

La resistencia real en fractura de un material siempre es más baja que el valor teórico precisamente porque la mayor parte de elementos resistentes contienen pequeñas fisuras o impurezas que crean un concentrador de tensiones. Las fisuras de fatiga siempre empiezan como concentradores de tensiones, así pues eliminar dichos defectos incrementa la resistencia frente a fatiga.

Las discontinuidades geométricas o la falta de suavidad de una geometría actúan como concentradores de tensión. Los extremos de las fisuras, las esquinas agudas, los agujeros y los cambios de sección transversal son ejemplos de concentradores de tensiones. Las tensiones locales altas pueden producir un fallo más temprano de un elemento resistente, por esa razón los ingenieros diseñan las geometrías para minimizar la concentración de tensiones.

Resulta importante verificar sistemáticamente la existencia de concentradores de tensiones asociados a fisuras. Existe una longitud crítica de la fisura, tal que si ese valor es sobrepasado, la fisura continua creciendo hasta que se produce un fallo catastrófico. Una vez la fisura supera la longitud crítica no se requiere un aumento de la tensión adicional para provocar que la fisura siga creciendo, por lo que la fisura sigue creciendo hasta el fallo

total. La teoría de Griffith en el seno de la mecánica de la fractura sirve para explicar por qué existe una longitud crítica de fractura.

### 1.10. Fundamentos de la fractura

La fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada estática (es decir, constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. La tensión aplicada puede ser de tracción, compresión, cizalladura o torsión. En los materiales de ingeniería, existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. Los materiales dúctiles exhiben normalmente deformación plástica substancial con muy alta absorción de energía antes de la fractura. Por otro lado, en la rotura frágil existe normalmente poca o ninguna deformación plástica con poca absorción de energía en el proceso de rotura.

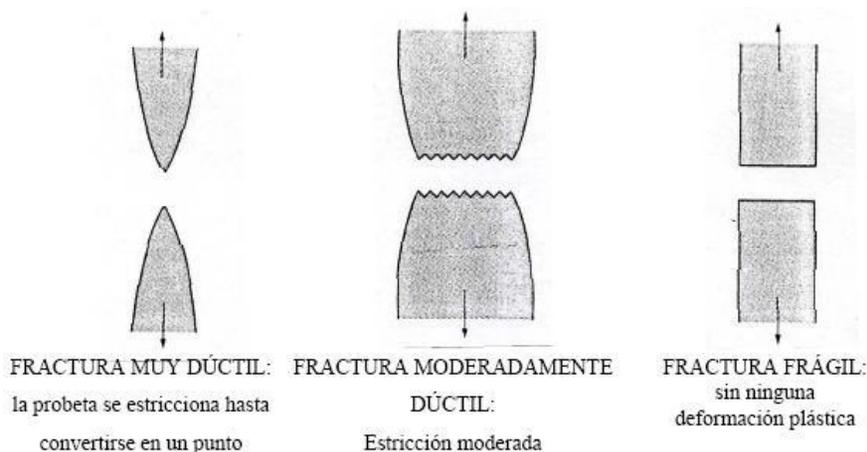


Figura 1.10. Tipos de fractura

### 1.11. Uso del método de elementos finitos para el análisis de piezas

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple. A través del método de elementos finitos es posible generar sólidos de aspecto casi real, comprobar su comportamiento bajo diversas condiciones de trabajo, estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos. Esto permite un conocimiento mucho más profundo de un producto antes de que exista físicamente, siendo posible detectar muchos de los problemas que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real. El método de elementos finitos

(M.E.F.) puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos).

Plantean (Matsii y Derevenets, 2005) que las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas para pasar a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. En realidad no se trata de nada nuevo. El cálculo de estructuras se efectúa también restringiendo el análisis de corrimientos de los nudos de unión. En el M.E.F se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento en los que se subdivide queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad), asociados a los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (nodos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada fusión de interpolación.

Actualmente el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física a partir de un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo (Friedel y Katz, 2004).

A pesar de su carácter aproximado, este método es una herramienta muy útil que permite realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente por los métodos analíticos clásicos, en estas recomendaciones del empleo de los elementos finitos coinciden, (Hutton y Pullman, 2006).

### **1.12. Estado actual de los procesos de fabricación de tamboras**

Sobre el tema de fabricación y mejoras en el diseño de las tamboras para ómnibus marca Yutong en Cuba, no han sido muchos los trabajos realizados por investigadores. La mayor parte de las investigaciones sobre el tema se ha centralizado en la tecnología de fundición.

Reinosa (2012) define según la Norma Internacional ASTM, en la designación A 159-83 G 3500b "*Standard Specification for Automovil Gray Iron Casting*" la aleación para fabricación de las tamboras traseras y delanteras, la cual fue modificada con níquel y recibe la denominación Fe-21 Ni, así como plantea la tecnología para su fabricación.

Hernandez (2016), evalúa a escala de laboratorio la composición química y propiedades mecánicas de las aleaciones Fe 24 y Fe 21N, el que mayor matriz perlítica posee es el Fe 21 Ni considerándose este como el más adecuado para la tambora.

A través del empleo de la simulación con el método de los elementos finitos (MEF), llega a la conclusión de que la forma constructiva de los agujeros de ventilación no responde a una adecuada distribución de tensiones, por lo que recomienda eliminarlos.

Sin embargo no se tiene en cuenta el efecto que provocaría eliminar los agujeros de ventilación en la temperatura de trabajo de las tamboras, la cual según bibliografía consultada pueden alcanzar temperaturas de 320 °C o más, lo que en tales casos provocaría deterioro de las mismas por fatiga térmica y además deterioraría los elementos de hule de la llanta.

### **1.13. Conclusiones del capítulo**

- Se puntualizaron los aspectos teóricos que permitieron actualizar el conocimiento sobre el transporte de pasajeros, así como los materiales, tecnología y métodos utilizados para la fabricación de tamboras de freno y las causas de sus roturas.
- La revisión bibliográfica realizada permitió identificar las características del proceso de frenado; así como las roturas y los materiales, tecnología y métodos, utilizados para la fabricación de tamboras.
- A partir de la información consultada se pudo conocer que en las tamboras de freno se producen concentraciones de tensiones que pueden conducir a la fractura de las mismas.



donde:

$D$ - disponibilidad, %.

$T_{PPP}$ - tiempo promedio para el periodo, h.

$T_{PPR}$ - tiempo promedio para la reparación, h.

## 2.2. Caracterización de las tamboras

En la figura 2.1 podemos ver las características geométricas de la trasera, de forma general podemos decir que la misma tiene un diámetro interior de 410mm y ancho de 255 mm; el espesor máximo en la región de frenado de 18 mm, la cual además esta reforzada con 18 nervios; dispone de 10 agujeros para sujeción a los clanes y el espesor en este área es de 14 mm, cuenta además con 5 agujeros para ventilación.

En el caso de la delantera con similar configuración geométrica, solo con pequeñas variaciones en las dimensiones, de forma general podemos decir que la misma tiene un diámetro interior de 400mm y ancho de 192 mm; el espesor máximo en la región de frenado de 34 mm, la cual además esta reforzada con 18 nervios; dispone de 10 agujeros para sujeción a los clanes y el espesor en este área es de 24 mm, cuenta además con 5 agujeros para ventilación.

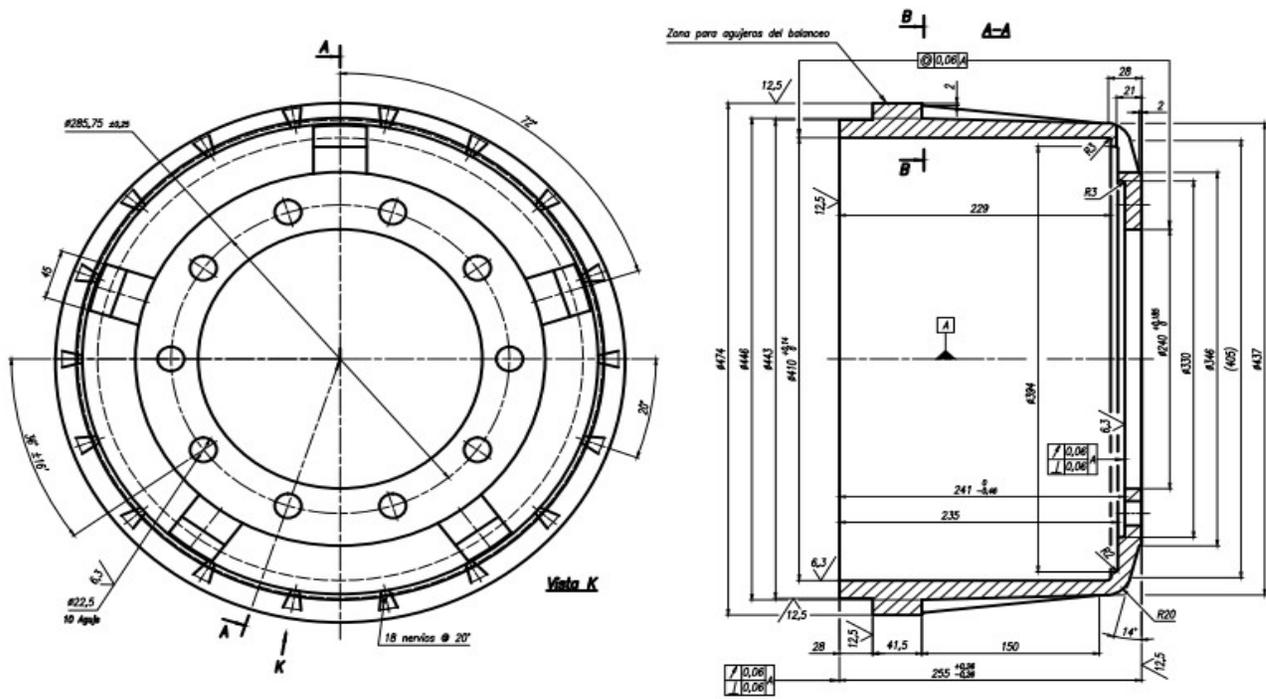


Figura 2.1. Plano de la tambora trasera

### 2.3. Cálculo de los esfuerzos de frenado en las tamboras

Se define como fuerza de frenado la que se desarrolla en el contacto neumático-calzada como reacción al par que se opone al movimiento de giro de dicho neumático, estando limitada principalmente por la adherencia. Si se supera el límite de adherencia del contacto rueda-calzada, se produce el bloqueo de la rueda (Luque *et al*, 2005).

Si se actúa con el freno de servicio, al presionar sobre el pedal de freno se incrementa la presión en el circuito, convirtiéndose esta, en los dispositivos de las ruedas, en pares y aplicados en sentido opuesto a su movimiento. Cuando esto sucede, el suelo reacciona con una fuerza sobre el neumático, denominada fuerza de frenado, que tratara de mantenerlo girando (Hernández, 2016).

Los pares de frenado en las ruedas que no tienen tracción son debidos a las fuerzas que genera el sistema de frenos, como consecuencia de la fricción de las pastillas o zapatas contra los discos o los tambores de freno. En el caso de las ruedas tractoras, los pares que se oponen al giro de la rueda pueden ser debidos al motor, al sistema de frenos o a la suma de ambos.

Los pares de frenado debidos al sistema de frenado se pueden generar con dos de los dispositivos que exige el reglamento, con el freno de servicio (freno de pie) o con el freno de estacionamiento (freno de mano). Si se actúa con el freno de servicio, al presionar sobre el pedal de freno se incrementa la presión en el circuito, convirtiéndose esta, en los dispositivos de las ruedas, en pares de momentos de fricción ( $M_f$ ) aplicados en sentido opuesto a su movimiento. Cuando esto sucede, el suelo reacciona con una fuerza sobre el neumático, denominada fuerza de frenado, que tratara de mantenerlo girando.

El dispositivo que genera el par de frenado en las ruedas, lo que el reglamento define como freno, puede ser un freno de disco o un freno de tambor. La forma de generar el par en ambos es muy similar. Si se dispone de un freno de disco, al incrementar la presión en el circuito de frenos se desplazan unas “pastillas” que, al rozar contra el disco, generan una fuerza de fricción de valor  $F_{f-disco}$  aplicada a una distancia del eje de la rueda. En nuestro caso que el freno es de tambor sería ( $F_{f-tambor}$ ), el proceso por el cual se genera el par es similar, donde el cálculo se realiza por la metodología de cálculo propuesta por (Szczeplaniak y Aragón, 1974) y sería:





donde:

$f$ - coeficiente de fricción que depende de las propiedades del material

$a$ - distancia entre el pasador de la articulación y el centro de la tambora

$r$ - radio de la tambora

Es conveniente integrar la ecuación para cada problema, por lo cual se la mantendrá en esta forma:

$$M_{ff} = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r}{\text{sen} \theta_a} \left[ (r - a \cdot \cos \theta_2 - \frac{a}{2} \text{sen}^2 \theta_2) \right] \quad \dots \dots \dots \quad 2.10$$

donde:

$p_a$  - presión máxima [N/m<sup>2</sup>]

$b$ - ancho de la zapata [ m ]

El brazo de momento de la fuerza normal respecto del pasador es  $a \cdot \text{sen} \theta$ . Designando el momento de las fuerzas normales por  $M_N$  y sumándolas respecto del pasador de la articulación se obtiene:

$$M_N = \int dN(a \cdot \text{sen} \theta) \quad [ \text{N} \cdot \text{m} ] \quad \dots \dots \dots \quad 11$$

Una vez integrada la ecuación se obtiene que:

$$M_N = \frac{p_a \cdot b \cdot r \cdot a}{\text{sen} \theta_a} \left[ \frac{\theta_2}{2} - \frac{1}{4} \text{sen}^2 \theta_2 \right] \quad [ \text{N} \cdot \text{m} ] \quad \dots \dots \dots \quad 2.12$$

La fuerza de accionamiento  $F$  debe equilibrar estos momentos de la siguiente manera:

$$F = \frac{M_N - M_{ff}}{c} \quad [ \text{N} ] \quad \dots \dots \dots \quad 2.13$$

Aquí se observa que existe una condición de fuerza de accionamiento cero. En otras palabras, si  $M_N = M_{ff}$  se logra el autobloqueo y no se requiere fuerza de accionamiento, lo que proporciona un método para obtener las dimensiones de alguna acción de autoenergizado, por lo que se debe cumplir que:

$$M_N > M_{ff} \quad \dots \dots \dots \quad 2.14$$

El par de torsión que aplica la zapata de frenado a la tambora es la suma de las fuerzas de fricción multiplicada por el radio de la tambora:

$$T = \int f \cdot r \cdot dN \quad [N \cdot m]. \quad 2.15$$

De tal manera que si se integra la esta ecuación se obtiene la siguiente:

$$T = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2}{\text{sen}\theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \text{sen}^2 \theta d\theta \quad [N \cdot m] \quad 2.16$$

Una vez integrada la ecuación anterior se obtiene como resultado:

$$T = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{\text{sen}\theta_a} \quad [N \cdot m] \quad 2.17$$

La zapata derecha es autoenergizante, por lo cual la fuerza se determina bajo el fundamento de que la presión máxima ocurrirá en esta zapata y el par de torsión que aplica se calcula mediante:

$$T_R = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{\text{sen}\theta_a} \quad [N \cdot m]. \quad 2.18$$

donde:

$p_a$  - presión máxima en la zapata derecha

El par de torsión con el que contribuye la zapata izquierda no se puede obtener hasta que se conozca su presión máxima de operación.

$$M_{N'} = \frac{M_N \cdot p_a}{1000} \quad [N \cdot m]. \quad 2.19$$

donde:

$M_{N'}$  - fuerza normal de la zapata izquierda

$$M_{f'} = \frac{M_f \cdot p_a}{1000} \quad [N \cdot m] \quad 2.20$$

Donde:

$M_{f'}$  - es el momento de la fuerza de fricción  $[N \cdot m]$

Luego, el par de torsión sobre la zapata izquierda es:

$$T_L = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{\text{sen}\theta_a} \quad 2.21$$

donde:

$p_a$  - presión máxima en la zapata izquierda  $[N/m^2]$



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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 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  $\text{Fe}_3\text{C}$  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 (Hernández, 2016).

La norma deja a recomendación y experiencia de los talleres de fundición el contenido máximo de carbono y los elementos aleantes que se pudieran añadir, con tal que se logren las propiedades que la norma establece.

Atendiendo a la práctica y disponibilidad de la fundición en la UEB “Fundición” de la Empresas Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, considerando los requisitos de la norma y además teniendo en cuenta como referencia el material usado para las tamboras Chinas, evaluaremos las aleaciones Fe-24 y Fe-21 Ni

## **2.5. Métodos, procedimientos y condiciones experimentales**

Las grietas presentes en la superficie de la tambora se observaron visualmente para recolectar información pertinente que verifique el estado que rige en la pieza luego de la explotación. Con esto se puede emitir un criterio de cuáles deben ser las pruebas de laboratorio a realizar para una mejor caracterización de los defectos vigentes y un pronóstico de mejora (Barsom, 1994).

La problemática planteada implica la aplicación de técnicas de ensayos para identificar el carácter de las roturas que se presentan en las tamboras 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.

A partir de las condiciones de trabajo a las que están expuestas las piezas objeto de este trabajo se planificaron las tareas siguientes:

1. Análisis químico.
2. Análisis fractográfico.
3. Análisis metalográfico.
4. Ensayos de dureza y microdureza.
5. Ensayos de tracción.
6. Simulación del comportamiento a las tensiones.

### **2.5.1. Selección y preparación de las muestras**

Las probetas metálicas se obtienen mediante el vertido del metal líquido en un molde previamente confeccionado a estas se les le aplicará el tratamiento térmico que llevan las tamboras (normalizado). En conjunto con estas muestras se escogerá un ejemplar de las tamboras fabricada por China Zhengzhou Yutong Group Lts., Co, de HT 250 como patrón, de igual forma se compararán las tres aleaciones que se analizarán (Fe24, Fe21Ni, HT250) con la norma ASTM A 159-83 (*Reapproved 1993*),

A las muestras se le realizarán operaciones de preparación y pulido en el laboratorio de ciencia de los materiales de la Universidad de Moa, para lo que se seguirá la siguiente secuencia:

1. Fresado: las secciones de corte se maquinarán en una fresadora vertical 6P-12B con refrigeración constante.
2. Rectificado: se rectificarán dos caras en una rectificadora horizontal 6T-82-1 con refrigeración continua y los análisis se realizarán en dichas caras.
3. Pulido: se utilizará 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  $\mu\text{m}$ .
4. Ataque: se sumergirá en ácido nítrico (densidad relativa 1,42) + 100 ml alcohol– *Rectif* (Nital), en una cantidad de 1 - 5 mL durante 15 segundos a 1 minuto a temperatura de 20 ° C.

A continuación, se describe el conjunto de métodos, procedimientos y técnicas que complementarán los experimentos.

### **2.5.2. Determinación de la composición química del material**

Los resultados del análisis químico se obtienen en un espectrómetro cuántico de masa Belec Compact Port (*Mobile Spectrometer for Metal Analysis*) para base hierro, marca SPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. El análisis consiste en una chispa que ataca la muestra, lee el espectro y en función de la longitud de onda se determinan los componentes del material. El análisis se realiza en tres puntos de cada probeta, separados los mismos por una distancia de 1 cm.

De la serie de mediciones se determina un promedio, obteniendo así el porcentaje de cada elemento que conforma la aleación. 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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 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.

### **2.5.3. Análisis fractográfico de las muestras**

Las superficies de fractura, las macro y micro grietas se estudiaron fractográficamente a través de la observación visual y la microscopía con aumentos de 20X, en un microscopio óptico de la marca OLYMPUS BX51M, el que posee magnificación de hasta 1000X.

### **2.5.4. Determinación de la dureza superficial**

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

El número de dureza se determinó por el tamaño de las huellas. Para determinar la dureza de las probetas analizadas se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midieron los diámetros de las huellas de la punta del diamante con  $136^\circ$ , con una penetración en un





## 2.6. Cálculo del carbono equivalente

El espesor combinado se define como la suma de los espesores que concurren a la junta el carbono equivalente de la fundición en función del carbono, el silicio y el fósforo:

$$\%C_{eq} = \%C + \frac{(\%Si + \%P)}{3} \quad 2.26$$

donde:

$\%C_{eq}$ : Carbono equivalente; %

$\%C$ : Carbono; %

$\%Si$ : Silicio; %

$\%Po$ : Fósforo; %

La influencia combinada del carbono y el silicio normalmente se evalúa mediante la expresión siguiente:

$$\%C_{eq} = \%C + 0,3(\%Si) + 0,33(\%P) - 0,27(\%Mn) + 0,4(\%S) \quad 2.27$$

Donde:

$\%Mn$ : contenido de Manganeso; %

$\%S$ : contenido de Azufre; %

El cálculo del  $C_{eq}$  permite evaluar el efecto de la composición de los elementos en las fundiciones no aleadas. Permite estimar si una determinada fundición será hipo o hipereutéctica durante la solidificación.

## 2.7. Cálculo del 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 temperatura de transformación eutéctica (CET) y temperatura de arresto de líquidus (TAL), sobre la base de las fórmulas siguientes según (Dardati et al., 2004).

$$Si[\%] = \frac{2085,4 - C_{ET}}{22,7} \quad 2.28$$

$$C_{ET}[\%] = \frac{2994 - T_{AL} - 53,07 \times \%Si}{212,3} \quad 2.29$$



características, nueve agujeros por donde se une a las llantas, cinco agujeros de ventilación y una superficie liza interior que entra en contacto con las zapatas de freno

### 2.8.2. Cargas y restricciones

Las piezas se fijarán por las caras y aristas de los orificios destinados a unir las tamboras con las llantas a través de espárragos más conocidos como clanes, y se les aplicarán los esfuerzos actuantes en el momento de frenado a la temperatura máxima de  $60^{\circ}\text{C}$  a la que estará sometida en la superficie lisa interior (ver fig.2.4.a). En la figura 2.5.b, se muestra el mallado, el mismo se realizó fino para obtener mayor precisión.

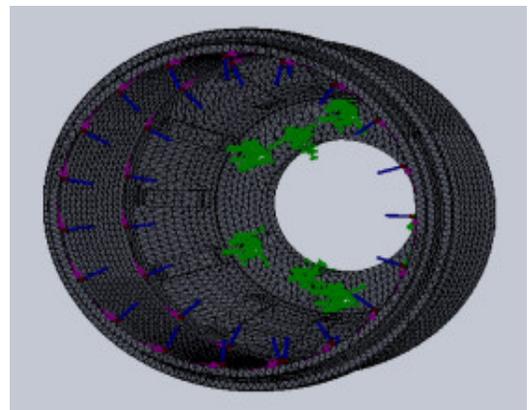
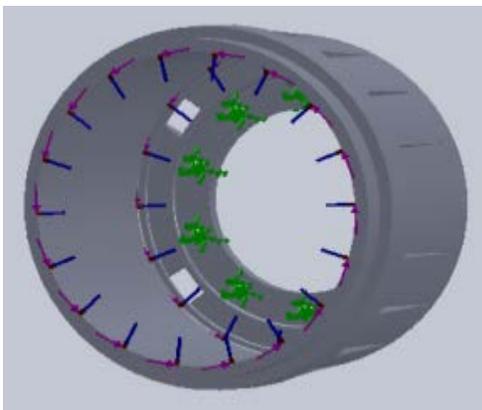


Figura 2.4.a, 2.5.b).Cargas y condiciones de frontera; mallado de una de las tamboras.

### 2.9. Análisis estadístico y prueba de significancia

Para comprobar la idoneidad del método y los modelos propuestos se desarrolló el tratamiento estadístico de los resultados, simulados y experimentales, con la utilización del tabulador Microsoft Excel 2003 y el paquete estadístico Statgraphics, lo que permitió establecer la necesaria correspondencia entre las observaciones teóricas y las experimentales.

La prueba de significación entre los resultados teóricos (frecuencia esperada) y los experimentales (frecuencia observada) se realiza mediante la prueba de “t-Student”, para medias de dos muestras emparejadas, la que posibilita establecer si hay diferencia o no entre las medias de los datos.

El valor de la prueba “t” se calcula (Sánchez y Torres, 1989; Freund y Simona, 1992;) por la ecuación:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{xy}} \sqrt{\frac{n_x \times n_y}{n_x + n_y}} \quad 2.32$$

Donde:

$\bar{x}_1 - \bar{x}_2$  : Medias de las series de datos comparadas.

$S_{xy}$ : Desviación media cuadrática ponderada.

$n_x$  y  $n_y$ : Tamaño de las series  $x_i$  e  $y_i$

Como el tamaño de la muestra en cada serie es igual, entonces:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{xy}} \sqrt{\frac{n}{2}} \quad 2.33$$

Por lo que la desviación estándar ponderada se calcula de la siguiente manera:

$$S^2_{xy} = \frac{(n_x - 1)S^2_x + (n_y - 1)S^2_y}{n_x + n_y - 2} \quad 2.34$$

Según Freund y Simona (1992) y Sánchez y Torres (1989) es necesario determinar la probabilidad de cometer un error casual o error tipo dos, teniendo en cuenta que no se conoce la varianza de la población aunque se puede estimar conociendo la varianza de la muestra:

$$\vartheta(\mu) = f(d_{fm}) \quad 2.35$$

Siendo:

$d_{fm}$ : Relación entre la diferencia de las medias y la varianza.

$$d_{fm} = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{s} \quad 2.36$$

$\vartheta(\mu)$ : Probabilidad de ocurrencia de un error de estimación.

Se determina  $\vartheta(\mu)$  en dependencia del número de muestras y del resultado de la relación entre la diferencia de las medias y la varianza.

### 2.9.1. Formulación de la hipótesis estadística

La idoneidad de los modelos con una distribución de tensiones más uniforme, se realizará a través de la comprobación de que hay una diferencia significativa entre las variables de salida o si es resultado de la aleatoriedad.

Sobre la base de los planteamientos anteriores se establecen las hipótesis siguientes:

$H_0: |t_{abs}| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ ; para N-1 grados de libertad

$H_1: |t_{abs}| \leq t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ ; para N-1 grados de libertad

Donde:

$H_0$  - hipótesis nula

$H_1$  - hipótesis alterna.

t - estadístico "t" observado.

La toma de decisiones se realiza teniendo en cuenta que si bajo la hipótesis estadística asumida se cumple la desigualdad  $t_{abs} > t_{0.05}$ , entonces se rechaza  $H_0$  y se concluye que la diferencia entre las varianzas es significativa. El valor  $t_{0.05}$ , se selecciona para un nivel de significación  $\alpha_t = 0.05$  y  $v_1 = N - 1$  grados de libertad.

## 2.10. Tecnología para el tratamiento térmico de las taboras

El tratamiento térmico a emplear en las taboras es el Normalizado, con un enfriamiento al aire (Ver anexo 6)

En el normalizado los carburos masivos pueden removerse por grafitización a alta temperatura, como se describió anteriormente, pero la resistencia a la tracción y al desgaste se pueden retener por un tratamiento térmico de normalizado, enfriando al aire desde una temperatura por encima del rango crítico, el procedimiento es el mismo que para el recocido de alta temperatura, excepto que después de mantener la fundición durante un adecuado tiempo a temperatura, el enfriamiento se realiza más rápidamente, dependiendo principalmente del tamaño y composición de la fundición. En espesores pequeños o fundiciones aleadas, el enfriamiento debe ser lento, pudiendo incrementarse con el tamaño y la disminución de aleantes.

Una de las etapas del normalizado es el enfriamiento al aire desde una temperatura por encima del rango crítico por dos propósitos. Uno es promover la grafitización de carburos masivos, que pueden formarse durante una rápida solidificación de la fundición, mientras se evita un ablandamiento del material, que resultaría de un recocido. Con la eliminación de los carburos por el normalizado, se logra un incremento de la maquinabilidad mientras se retiene la resistencia a la tracción y al desgaste. El segundo propósito para metalografía y tratamientos térmicos, el normalizado es incrementar la resistencia al desgaste y a la

tracción de aquellas fundiciones que contienen ferrita libre, producida a menudo por un muy lento enfriamiento en el molde.

### **2.11. Conclusiones del capítulo**

- Se definieron los métodos y materiales que permitirán realizar un diseño, de manera que se garantice una adecuada distribución de tensiones en las tamboras de freno.
- Se ha propuesto una metodología que posibilitará seleccionar la aleación para la fabricación de las tamboras de frenos de ómnibus Yutong e incrementar la durabilidad de las mismas.
- Se ha desarrollado el procedimiento experimental para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales a emplear.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y análisis realizados, los cuales permitirán determinar la causa de la rotura prematura por fractura de las tamboras, y proponer la solución al problema.

Objetivo: Realizar un análisis de los resultados obtenidos, el cual permitirá realizar un correcto diseño de las tamboras de los ómnibus Yutong para garantizar mayor durabilidad de las mismas.

### 3.2. Determinación de la disponibilidad técnica

La disponibilidad técnica fue determinada de forma relativa a las roturas de las tamboras, esta se realizó empleando como período un año y para un parque de 50 equipos, se tuvo en cuenta el número total de horas del período (horas calendario) con el número de horas de mantenimiento (preventivo, correctivo) del mes correspondiente y también se consideró para el cálculo que el equipo opera un promedio de 12 horas al día. (Figura 3.1)

Para el cálculo de la disponibilidad de los ómnibus se empleó la ecuación 2.1, en la que el tiempo promedio para el período es de 50 h, el tiempo para la reparación del equipo fue de 100 h, por lo que sustituyendo:

$$D = 85,53 \%$$

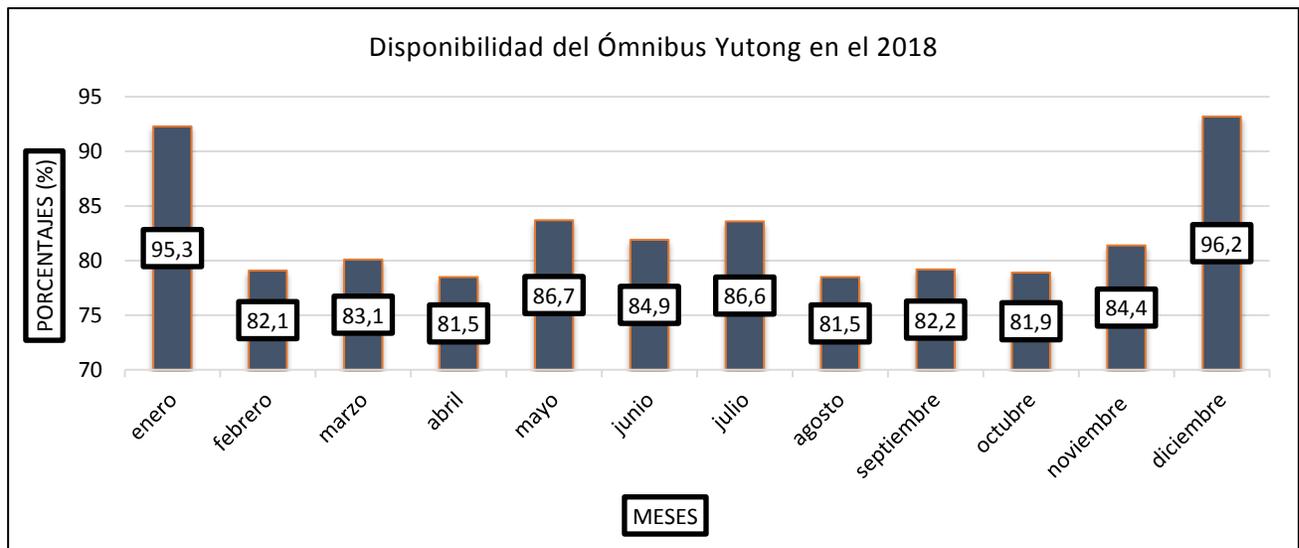


Figura 3.1. Comportamiento de la disponibilidad de los ómnibus Yutong (año 2018)

Como se observa el valor de la disponibilidad es muy baja si se considera que, para una buena explotación, de ese tipo de transporte, debe oscilar alrededor de un 95 %.

Los resultados de la disponibilidad demuestran cierta variación a través de todo el año, notándose que los meses de abril y agosto se presentaron con menor comportamiento con un valor de 81.5% para cada mes. Se puede notar, en el gráfico de la figura 3.1, que la presencia de los picos más bajos se presenta al cabo de cuatro meses lo cual constituye el tiempo máximo que se debe esperar para la aplicación del mantenimiento.

### 3.3. Resultado de la experimentación

Se obtuvieron dos probetas metálicas representativas de cada una de las posibles aleaciones a utilizar para la fabricación, 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 compararon las tres aleaciones con la norma ASTM A 159-83 (Reapproved 1993).

#### 3.3.1. Composición química del material

En el análisis realizado a las muestras de las tamboras chinas se corroboró que el material con el cual fueron fabricadas fue el HT 250, el mismo es comparable con el A 278M Clase 275 según la Normas ASTM A 278M-93 y NC 16-33:80

Tabla 3.1. Composición química de la probeta de fundición gris HT 250

C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)	Cu (%)	Ni (%)	Fe (%)
3,4	1,8	0,9	0,02	0,01	0,36	0,03	Resto

A partir del análisis realizado se obtuvo la composición química de las dos variantes de aleaciones, primeramente se analizó el Fe-24 y posteriormente la muestra de Fe-21 Ni para luego establecer la relación existente de acuerdo con el grado de alta seguridad

G3500b de la norma ASTM A 159-83. En la tabla 3.2 y 3.3 se muestra la composición química de ambas aleaciones obtenidas.

Tabla 3.2. Composición química del Fe21 Ni

Grado G 3500b Fe21 Ni							
Material	C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
ASTM A 159	≥3,4	1,3-1,8	0,6-0,9	≤0,12	≤0,15	≤ 2,1	Resto
Probeta	3,48	1,68	0,763	0,0650	0,049	0,591	Resto

Tabla 3.3. Composición química del Fe24

Grado G 3500b Fe24							
Material	C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
ASTM A 159	≥3,4	1,3-1,8	0,6-0,9	≤0,12	≤0,15	≤ 2,1	Resto
Probeta	3,27	1,61	0,801	0,0532	0,040	0,119	Resto

Al comparar la composición química, establecida por las normas y, las determinadas por análisis espectral, se observa que la aleación de Fe24 difiere un poco de la norma presentando un menor contenido de carbono, sin embargo en la aleación de Fe21Ni puede decirse que los elementos se ajustan a las mismas, por lo que se destaca una pequeña diferencia entre ambas aleaciones.

### 3.3.2. Resultados del análisis fractográfico

Al analizar macroscópicamente una muestra física de una pieza que presentó problemas de fractura, se obtuvo como resultado la no existencia de indicios de deformaciones ni torceduras en los elementos en la zona de rotura, lo que conlleva a rechazar la posibilidad de ocurrencia de fracturas dúctiles (ver figuras 3.2 y 3.3).

En la Figura 3.2 se evidencia que ocurre la aparición de grietas entre los orificios de ventilación (colocados para disminuir las altas temperaturas por fricción y eliminar todo tipo de impurezas dentro de la zona de frenado), las cuales se propagan por todo el borde superior, y a través de la superficie interior de forma transversal o radial. Este fenómeno surge producto a la fragilidad que dichos orificios le introducen al diseño, ya que la fractura inicia por la parte interior de estos, hasta propagarse por toda la pieza.



Figura 3.2. Apreciación de las zonas de inicio de las grietas

La Figura 3.2 muestra una vista general de la rotura catastrófica en las taboras, donde se muestra más claramente la fractura y sus consecuencias. Las zonas señaladas indican los puntos concentradores de tensiones por donde presumiblemente se inició la fractura.



Figura 3.3. Apreciación de las zonas colapsadas

El análisis realizado muestra una superficie de fractura típica de las grietas como resultado de la rotura de los elementos. Se distingue un microrrelieve característico de la rotura frágil con desgarramiento o descohesión de los granos y la presencia de una microgrieta que contornea los mismos. Se observa la presencia de micro-deformaciones, correspondientes a bandas de deslizamiento que revelan la propagación de grietas elasto-plásticas.

Predominan zonas con desgarramiento y huellas de clivaje que denotan la preponderancia de la fractura frágil. La presencia de micro-deformaciones indica la ocurrencia simultánea de la fractura dúctil, a escala microscópica y la fractura frágil a escala macroscópica.

### 3.3.3. Resultados del análisis de la dureza

En la figura 3.4 se muestran los resultados de las mediciones de dureza realizadas en correspondencia con las distintas aleaciones. Se evidenció que hay diferencia significativa entre la dureza de las aleaciones, como valores promedios la aleación de Fe24 tiene HB 281, en el Fe21Ni el valor obtenido fue de HB 233, sin embargo para el HT 250, se obtuvieron durezas menores, hasta HB 210.

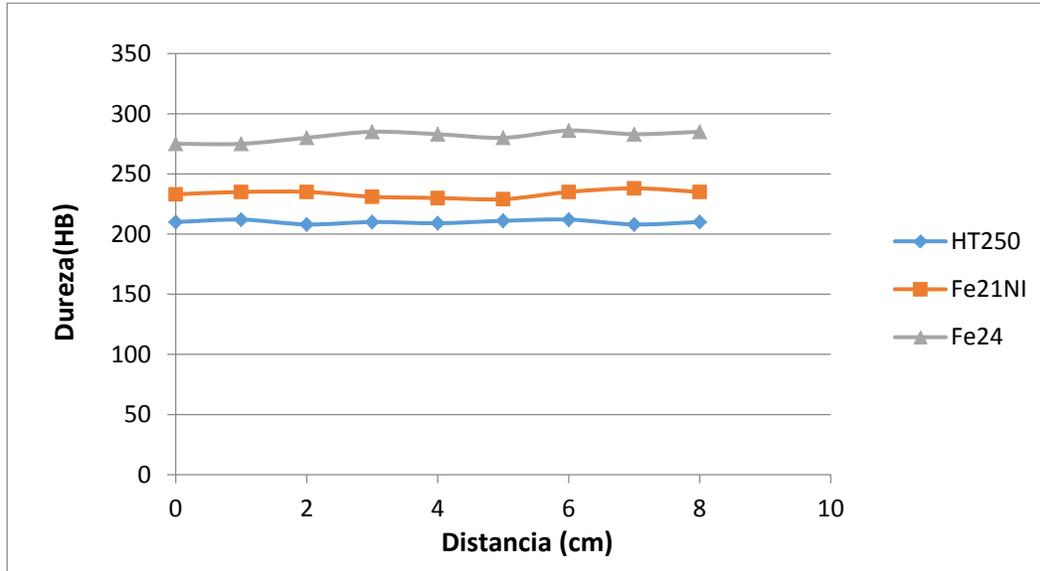


Figura 3.4. Comportamiento de la dureza vs distancia en las zonas

Por los resultados obtenidos se puede plantear que para diferentes distancias medidas, no existen grandes variaciones de dureza en las aleaciones, estas no superan el 3%. Estos resultados se atribuyen a que con el tratamiento térmico se logra una estructura bastante homogénea aunque por otra parte se muestra una gran diferencia entre los distintos materiales como consecuencia de la variedad que existe entre los granos de ferrita que se presentan mucho más gruesos al igual que los precipitados de austenita.

Como vimos en el capítulo 2, la norma ASTM, en la designación A 159-83 exige para la fabricación de tamboras de freno con el grado de responsabilidad G 3500b que el material tenga dureza HB = 207 – 255, de acuerdo a lo cual consideramos que el material más adecuado de acuerdo a los resultados de dureza es el Fe 21Ni

### 3.3.3.1. Análisis de regresión múltiple para dureza y distancia

El análisis de regresión se desarrolla para observar la relación estadística que existe entre dos o más variables cuando se cosechan, es decir para saber si son o no estadísticamente significativas cada una de estas variables.

En este caso se realizó el análisis estadístico para evaluar la incidencia de la dureza según la distancia medidas en cada zona de las aleaciones. En la tabla 3.4 se muestra el análisis de regresión múltiple.

Tabla 3.4. Análisis de regresión múltiple para dureza y distancia

Parámetro	Error	Estadístico			P-Valor
	Estimación	estándar	T		
CONSTANTE	-89,229	313,858	-0,284298		0,7903
Fe 21 Ni CT	-0,213891	0,697116	-0,306823		0,7743
Fe 24 CT	0,25755	0,342024	0,753019		0,4933
HT 250	0,376356	1,13793	0,330739		0,7574
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	6,23388	3	2,07796	0,23	0,8698
Residuo	35,7661	4	8,94153		
Total (Corr.)	42,0	7			
R-cuadrado = 14,8426 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje					
Error estándar de est. = 2,99024					
Error absoluto medio = 2,00065					
Estadístico de Durbin-Watson = 0,336134 (P=0,0034)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,609982					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre distancia y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Distancia} = -89,229 - 0,213891 \cdot \text{Fe 21 Ni CT} + 0,25755 \cdot \text{Fe 24 CT} + 0,376356 \cdot \text{HT 250}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.10, no existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90% o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 14,8426% de la variabilidad en Distancia. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 0,0%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 2,99024. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 2,00065 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,7743, perteneciendo a Fe 21 Ni CT. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, debería considerar quitar Fe 21 Ni CT del modelo.

La ecuación de distancia es el modelo para hallar el error del experimento, a través de esta se determina de acuerdo con las bases de datos cual aleación presenta menor dureza, o sea que cuando él desarrolla un rango de valores entre todas las bases de datos en este caso el Fe 21 Ni y el Fe 24 presentan valores casi iguales por lo que se queda con el de mayor significancia (mayor dureza) despreciando el que menor dureza presenta que en este caso es el Fe 21 Ni.

### **3.3.4. Resultados del análisis metalográfico**

Los cambios microestructurales y en composición química de las fases de las fundiciones depende del tratamiento térmico, de la velocidad de vertido y de permanencia del material en el molde.

#### **3.2.4.1. Evaluación de la fundición gris HT 250**

La figura 3.5 se corresponde con la microestructura de la muestra patrón para el material las tamboras de fabricación China (fundición gris HT 250), se observa la presencia de hojuelas de grafito en una matriz perlítica. La hojuela presente en la microestructura es del tipo A, la cual para la mayoría de las aplicaciones se prefieren este tipo que es de tamaño

“pequeño”, los tamaños grandes reducen la resistencia y ductilidad del hierro como resultado de interrumpir seriamente la continuidad del material.

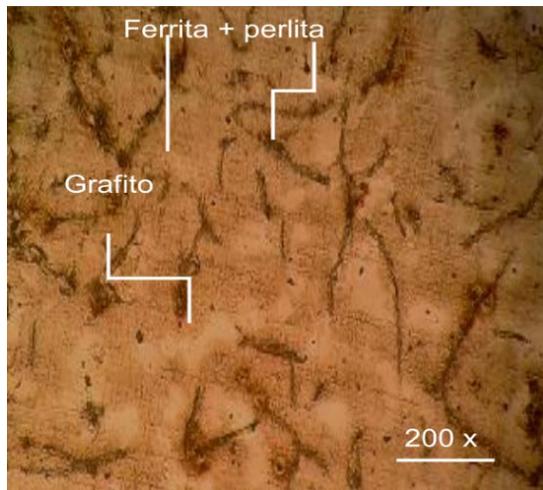


Figura 3.5. Microestructura de la fundición gris HT 250

El grafito tipo A, suele ser el más corriente, aparece en el centro de las piezas de cierto espesor, fabricadas con fundiciones grises ordinarias, de composición próxima a la eutéctica. Este tipo de grafito es el que conviene para la fabricación de piezas para maquinaria.

#### 3.2.4.2. Evaluación de la fundición Gris Fe 24

Al observar la figura 3.6.b, antes de efectuar el tratamiento térmico se aprecia una matriz de ferrita dendrítica de listoncillo o esquelética y brazos de austenita desordenada, con la formación de carburos en el interior, presentando granos gruesos tipo E en la constitución de ferrita.

Como se observa en la figura 3.6.a después de efectuado el tratamiento térmico, esta presenta una matriz austenítica con perlita en los bordes de granos, donde se aprecia la formación de dendritas de ferrita. La austenita se produce debido al contenido de níquel (0.12%) en el material, el cual genera la grafitización, por otra parte la dendritas de ferrita aparece en el límite de grano, esta se forma por el contenido de carbono presente en el hierro fundido.

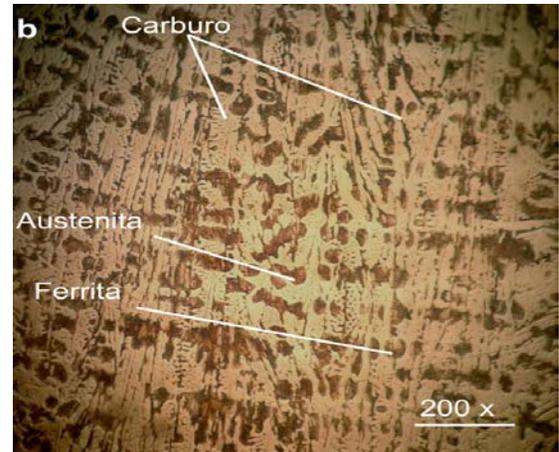
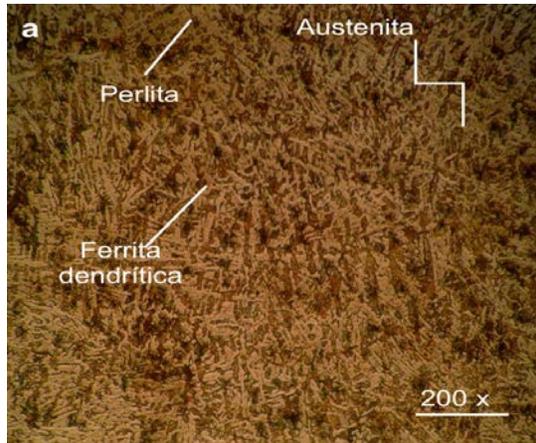


Figura 3.6.a; 3.6.b) Muestra de Fe 24 con tratamiento; muestra de Fe 24 sin tratamiento

### 3.2.4.3. Análisis de la fundición gris Fe 21 Ni

En las figuras 3.7a y 3.7b, se muestran los resultados microestructurales obtenidos con muestra de Fe21Ni.

En la muestra sin tratamiento térmico figuras 3.7.b obtenida del proceso de fundición se puede observar una estructura dendrítica y carburos donde estos pueden alcanzar dureza de hasta HV 900. Luego del tratamiento térmico figura 3.7.a se ha obtenido una estructura de perlita más ferrita acicular pero con menor dureza con relación a la microestructura fundida ya que aquí se ha normalizado la estructura y se han eliminado los carburos, por tanto y demás se ha disminuido también la dureza. Las diferencias que caben destacar son la disminución de la fracción volumétrica de austenita retenida al aumentar la temperatura de los tratamientos térmicos, de igual forma se observa una disminución en el tamaño de los granos de ferrita y el contenido de carburo de hierro. El contenido de carburo puede llegar a disminuirse con un revenido a 575 °C.

Las estructuras obtenidas han sido producto a ciclo de calentamiento y enfriamiento, las mismas se han formado al calentar de 850 – 950 °C, el material, donde no existe la formación de grafito o esta formación tiene poca importancia, ya que la temperatura de mantenimiento no es apropiada para el depósito de gran cantidad de grafito.

Al calentar a 950 °C, se ha formado la austenita que durante la permanencia a esta temperatura habrá formación de una pequeña cantidad de grafito y luego, en un enfriamiento sin precauciones muy especiales, al pasar la zona eutécticoide, se formará perlita.

En la figura 3.7.b muestra la austenita retenida respecto de la ferrita y la perlita tras ser sometida al tratamiento térmico. Se aprecia un mínimo en el contenido de austenita retenida, a la temperatura de 1000 °C y un aumento, a partir de esta temperatura. Mientras que al calentar la muestra en estado bruto de moldeo a temperaturas inferiores a 1000 °C se produce, sin duda, una precipitación de carburos que contribuye a disminuir el contenido de carbono y el grado de aleación de la austenita y favorecer, así, su transformación en el enfriamiento subsiguiente, para las temperaturas superiores a los 1000 °C ocurre lo contrario, la puesta en solución de los carburos precipitados: la austenita aumenta su contenido en carbono y aleantes, estabilizándose.

Observando ambas microestructuras y considerando que en el Fe 21 Ni se presenta una matriz de perlita más ferrita mientras que para el Fe 24 se observa una matriz austenítica se concluye que el que mayor matriz perlítica posee es el Fe 21 Ni considerándose este como el más adecuado para la tambora.

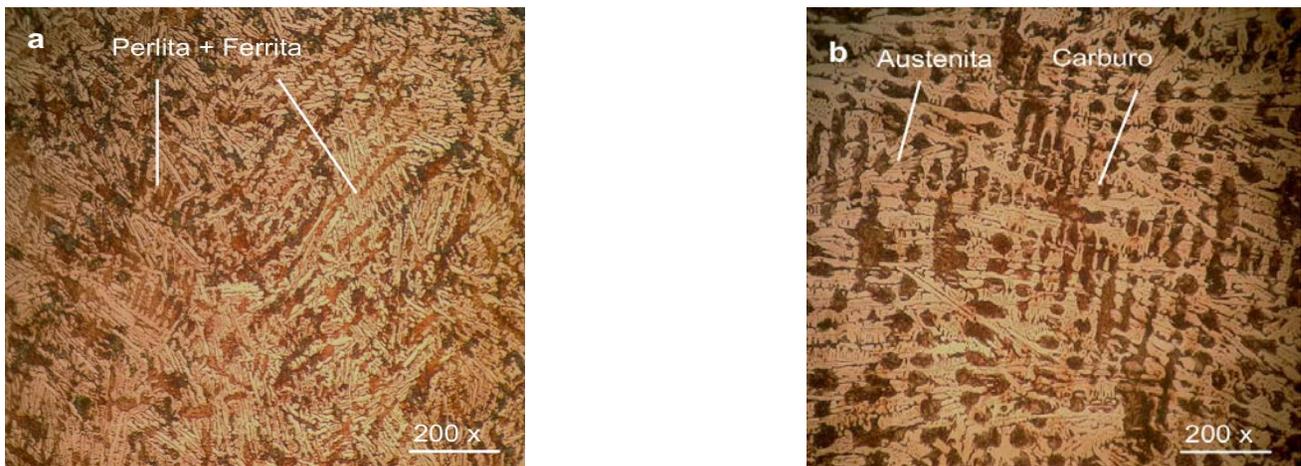


Figura 3.7.a. Muestra de Fe21Ni con tratamiento; muestra de Fe21Ni sin tratamiento

### 3.2.5. Resultados del ensayo de desgaste gravimétrico

Según Rojas (2011), 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.

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 3.7 se muestran los valores de los pesajes realizados a las probetas de Fe24 y de Fe21 Ni correspondiente a las tamboras de Yutong y la cantidad de material ( $\Delta P$ ) en función de la masa en gramos, calculado a partir de los datos expuestos en la tabla anterior.

Tabla 3.5. Valores de los pesos de las probetas

Material	Probeta	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	$\Delta P$ (g)
Fe24	1	76,908	76,47	0,438
	2	92,41	91,94	0,47
Fe21 Ni	3	104,65	104,4	0,25
	4	81,95	81,72	0,23

La variación de masa ( $\Delta P$ ) correspondiente a estos materiales se calculó a partir de la expresión 2.23 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 3.5 la probeta de menor variación de peso es de 0,23 g perteneciente al Fe 21Ni.

Como el material desgastó muy poco, de esa manera se puede apreciar que el Fe21Ni es altamente resistente al desgaste

### 3.2.6. Resultados del análisis de tracción

Se efectuó a partir de la fundición de dos probetas, 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 (Hernández E, 2016).

Las dimensiones empleadas fueron, diámetro  $d=19\text{mm}$  y longitud de trabajo  $L_o = 150\text{mm}$

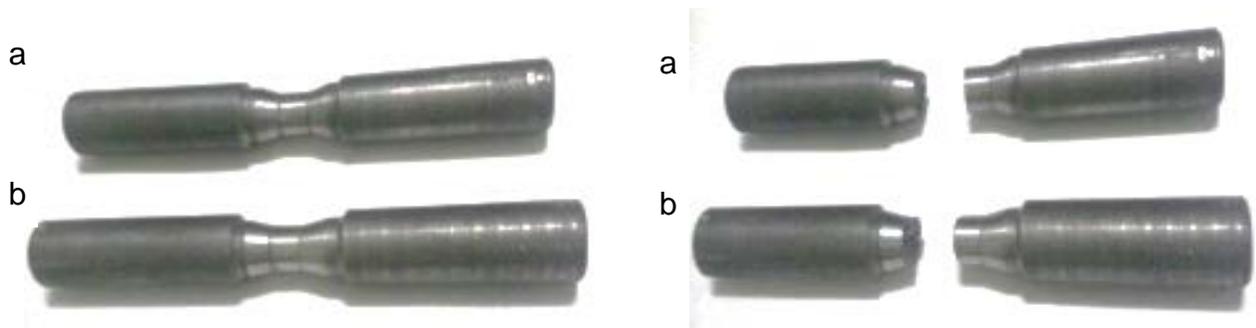


Figura 3.8. Probetas de Fe 21Ni (a) y Fe24 (b) antes y después del ensayo.

Al someter cada aleación al ensayo de tracción se obtuvo un límite de rotura de 140 MPa para el Fe 21 Ni y 88 MPa para el Fe 24.

Según los resultados arrojados por el ensayo de tracción el Fe21Ni posee mayor resistencia a la tracción y es más adecuado para usarlo en la fabricación de las tamboras.

### 3.4. Susceptibilidad al agrietamiento de las aleaciones de 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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 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 2.26 se determinó el carbono equivalente para cada aleación de fundición gris, donde para:

El Fe24 con un contenido de carbono de 3,27 %, contenidos de fósforo y silicio de 0,04 y 1,61 % respectivamente, este parámetro es de 3,85 %. El Fe21Ni con un contenido de carbono de 3.48 %, contenidos de fósforo y silicio de 0,049 y 1,68 % respectivamente este parámetro es de 4,15 %.

El carbono calculado en función del fósforo y el silicio clasifica a las fundiciones grises 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 2.29 donde se consideran los elementos químicos que intervienen en la fundición, el resultado del porcentaje equivalente

de carbono total es de 3,64 % para el Fe 24 y 3.94 % para el Fe 21 Ni de carbono total, estos resultados justifican que la solidificación de las aleaciones objeto de estudio es hipoeutéctico.

En la fundición gris, los altos contenidos de carbono equivalente CE 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.

De este modo se observa que por encima de la temperatura crítica 911 °C los aceros están constituidos sólo por austenita, una solución sólida de carbono en hierro  $\gamma$ , y su microestructura en condiciones de enfriamiento lento dependerá por tanto de las transformaciones que sufra ésta.

### **3.5. Contenido de carbono y silicio y magnesio en la fundición**

Las fundiciones de hierro se encuentran en una composición de carbono equivalente por debajo del 4,3%, es decir, son de carácter hipoeutéctico. Para determinar la influencia que ejerce el silicio y el carbono en la fundición, por las ecuaciones 2.28 y 2.29 se calcularon estos parámetros, resultando que:

Para el Fe24 el silicio es de 2,85 %, para determinar el contenido de carbono se consideró la ecuación 2.14 que tiene en cuenta la temperatura de líquido de la austenita, donde la misma es de 1 208 °C, por lo que el carbono presente sería de 7,99 %.

Para el Fe 21 Ni el silicio es de 3,15 %, para determinar el contenido de carbono se consideró la ecuación 2.14 que tiene en cuenta la temperatura de líquido de la austenita, donde la misma es de 1180 °C, por lo que el carbono presente sería de 8,09 %.

El contenido de silicio en las fundiciones es de 2 a 5 %, 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 % no es suficiente para ello. Por cada 1 % de silicio, la composición eutéctica se desplaza hacia la izquierda del diagrama aproximadamente 0,3 % de carbono, lo cual abate la temperatura a la cual la aleación empieza a solidificar.



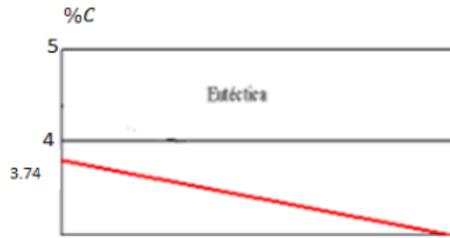


Figura 3.9(a). Carbono eutéctico para el Fe 24.

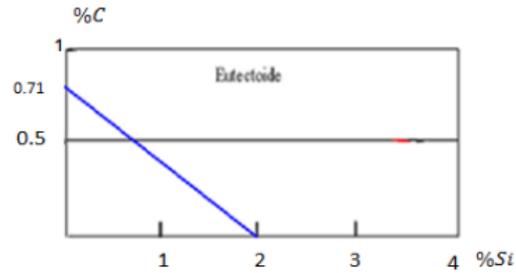


Figura 3.9 (b). Carbono eutectoide para el Fe 24.



Figura 3.10(a). Carbono eutéctico para el Fe 21 Ni.

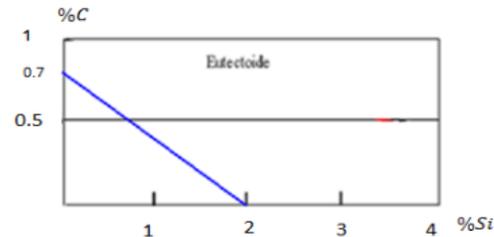


Figura 3.10 (b). Carbono eutectoide para el Fe 21 Ni.

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. 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.

### 3.6. Determinación de los esfuerzos del proceso de frenado

Para el cálculo de los esfuerzos en las tamboras de freno se tuvo en cuenta el autobús de modelo ZK6118HGA-6(carga de pasajeros: 54/70), los pesos totales máximos y la carga de ejes correspondientes: 5500 kg (delantero) y 11000 kg(trasero). Utilizando las ecuaciones descrita en el capítulo 2 se procede con el cálculo, los resultados se muestran a continuación.

### 3.7. Resultado del cálculo del radio dinámico

En este cálculo se consideró el diámetro de la llanta  $D_0 = 0,57$  m, el ancho de la llanta  $b_0 = 0,29$  m y el coeficiente que depende del tipo de vehículo, en este caso es un vehículo pesado por lo que  $\lambda = 0,11$ . Al sustituir estos datos en la ecuación 2.6 se obtiene:

$$r_d = 0,54 \text{ m.}$$

Por lo que se tiene que el radio dinámico coincide con el del ómnibus analizado.

### 3.8. Resultado del momento de frenado

Teniendo en cuenta la ecuación 2.8 donde se demuestra la igualdad entre las fuerzas de frenaje y adherencia sobre las ruedas de los ejes delantero y trasero y considerando el peso del puente delantero  $G_p = \frac{55\,000}{2} = 27\,500 \text{ N}$ , y  $G_t = \frac{110\,000\text{N}}{2} = 55\,000 \text{ N}$  en el caso de trasero, así como el coeficiente de adherencia que depende del camino, en este caso es de asfalto y seco por lo que  $\mu = 0,8$ . De acuerdo con estos datos y utilizando la ecuación 2.9 se obtienen los momentos de frenado:

$$M_{hp} = 11\,880 \text{ Nm (puente delantero)}$$

$$M_{ht} = 23\,760 \text{ Nm (puente trasero)}$$

Estos momentos de frenado serán ejercidos sobre cada una de las tamboras delanteras y traseras de acuerdo al puente al que pertenezcan una vez accionado el pedal de freno.

Se puede apreciar que el momento de frenado obtenido es acorde con el que se necesita ya que el tren trasero posee mayor peso y necesita mayor seguridad a la hora de detener el vehículo.

### 3.9. Selección del material para la fabricación de las tamboras

Teniendo en cuenta los resultados de la experimentación realizada, consideramos que de las dos aleaciones evaluadas, la de mejores características es el Fe-21 Ni y por tanto se pueden fabricar las tamboras con esta, teniendo en cuenta que el níquel actúa como grafitizante, lo que disminuye la precipitación de carburos y afina el grano de hierro. Por medio de esta adición se obtiene un aumento de la resistencia mecánica y de la homogeneidad de la pieza fundida, según lo planteado por Biederman (1967).

Tabla. 3.6. Composición química de la aleación

Grado G 3500b Fe-21 Ni											
Carbono		Silicio		Manganeso		Azufre		Fósforo		Níquel	
Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.
3,4	3,7	1,6	1,8	0,6	0,9	0,01	0,12	0,01	0,15	0,4	0,6

### 3.10. Simulación de las tamboras

Para realizar la simulación por el método de elementos finitos a las tamboras, se les asignó el material correspondiente, se fijaron por las caras y las aristas de los orificios destinados a unir las tamboras con las llantas y luego se les aplicó la carga en la cara interior, consistente en momentos de 11880 Nm y 23760 Nm para las tamboras delanteras y traseras respectivamente.

#### 3.10.1. Comportamiento de las tamboras actuales

Como resultado se obtuvo una tensión de Von Mises de 43,895 MPa (tambora delantera) y 94,169 MPa (tambora trasera), en ambas se pudo observar el mismo comportamiento mostrado en la figura 3.11, el cual demuestra que existe una analogía entre la simulación realizada y la muestra física ya que las zonas de concentración de tensiones coinciden con las reflejadas en la imagen tomada y el análisis fractográfico, y que los mayores valores se presentan por todo el borde superior a partir de los orificios de ventilación.

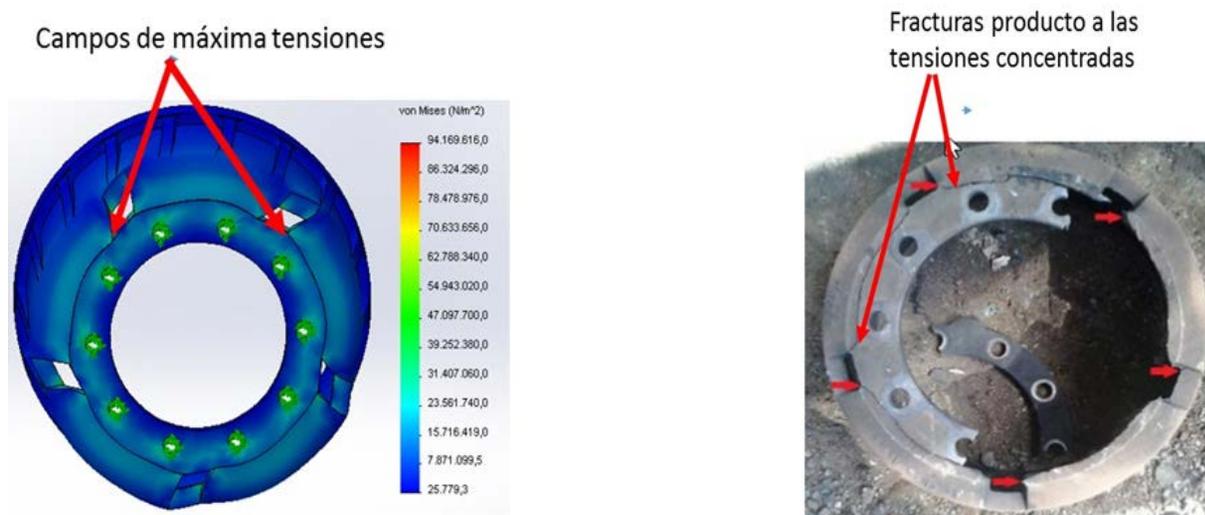


Figura 3.11. Analogía entre la simulación y la forma de rotura de las tamboras

En la figura 3.12 se muestran los desplazamientos con valores de 28,2  $\mu\text{m}$  (tambora delantera) y 62,1  $\mu\text{m}$  (tambora trasera), esto explica lo reflejado en el análisis fractográfico. Como las deformaciones son muy elevadas y el límite de rotura es bajo, el material no puede soportar estas distorsiones.

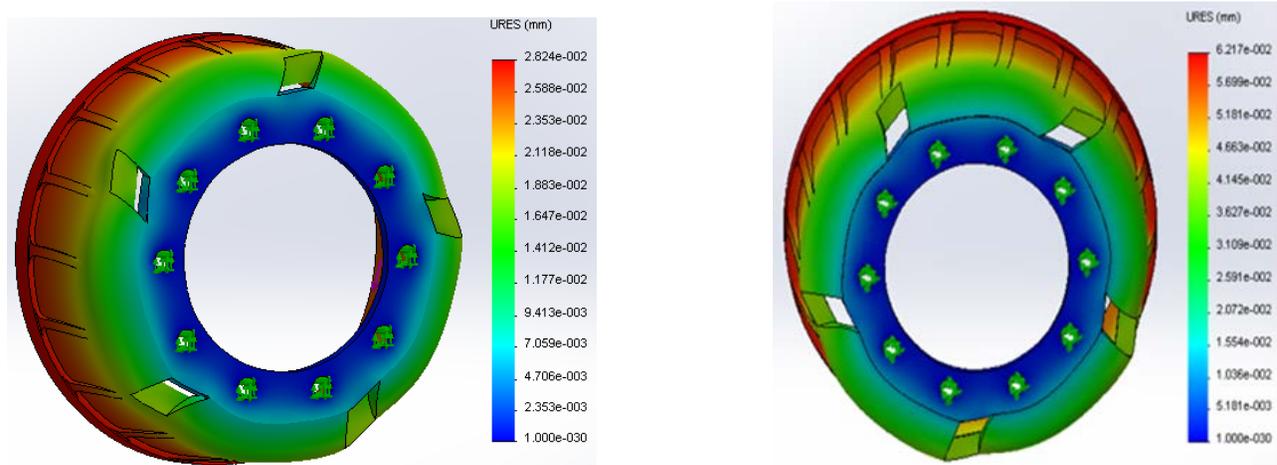


Figura 3.12. Comportamiento de los desplazamientos en las tamboras actuales

Al realizar un análisis de los resultados alcanzados, llegamos a la conclusión de que tanto los espesores mínimos y los radios de curvatura como los orificios de ventilación definen la zona donde se localiza el campo de máximas tensiones y el origen de la fractura de los elementos, lo que demuestra que:

- Si la pieza permanece con espesores mínimos pequeños y orificios de ventilación, se manifestará una rotura frágil con inicio y propagación de grietas originadas en el borde exterior de la zona crítica, lo que coincide con Shigley y Mishke (1990), Pilkey (1997), Symonds et al. (2001), Alekseev (2005) y Stiopin (2005).
- Si se varían los espesores o se retiran los agujeros(o parte de estos) se puede lograr una distribución más uniforme, lo que dificulta la identificación del lugar de origen de la fractura.

### 3.10.2. Evaluación del diseño propuesto

A partir de las conclusiones obtenidas en epígrafe anterior se realizó un nuevo diseño con modificaciones similares para las dos tamboras, en el cual se disminuyeron los concentradores de tensiones al disminuir los radios de curvatura y eliminar uno de los agujeros de ventilación en el caso de las tamboras traseras y dos en las delanteras, además se aumentó 10 mm al espesor donde se encuentran los orificios de ventilación y los agujeros de fijación, además se usó como material la aleación Fe21Ni seleccionada. En la (Fig.3.13) se pueden ver las variaciones realizadas y su ubicación para el caso de la tambora trasera.

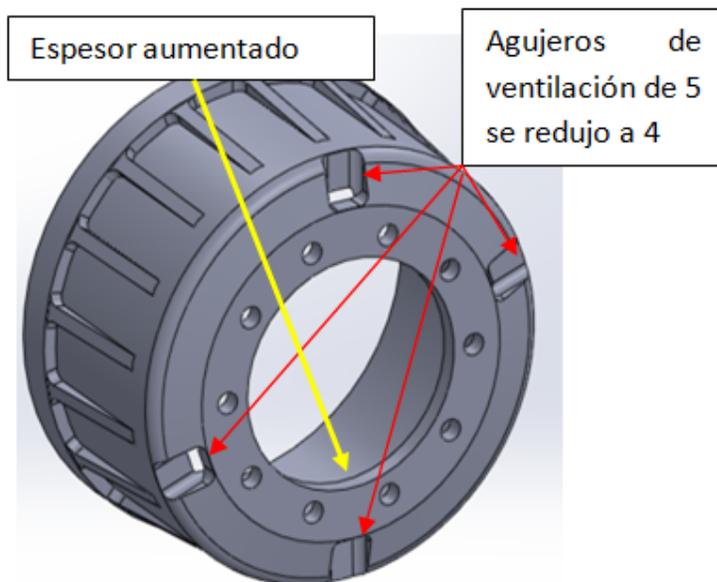


Figura 3.13. Modificaciones realizadas al diseño original (El plano de fabricación se puede ver en los anexos 7 y 8).

Como se puede observar en la figura 3.14 ahora obtenemos que las tensiones se distribuyen en gran parte de la pieza y las máximas que pueden surgir toman valores de 22,682 MPa (tambora delantera) y 45,44 MPa (tambora trasera).

Con el nuevo diseño se logra una mejor distribución de tensiones, donde las mismas disminuyen en un 49 % (tambora delantera) y un 51,71 % (tambora trasera) con respecto a las originales

La aleación empleada posee un límite de rotura de 140 MPa, si se compara con el de las máximas tensiones surgidas en el nuevo diseño, se tienen coeficientes de seguridad de 6,17 (tambora delantera) y 3,07 (tambora trasera).

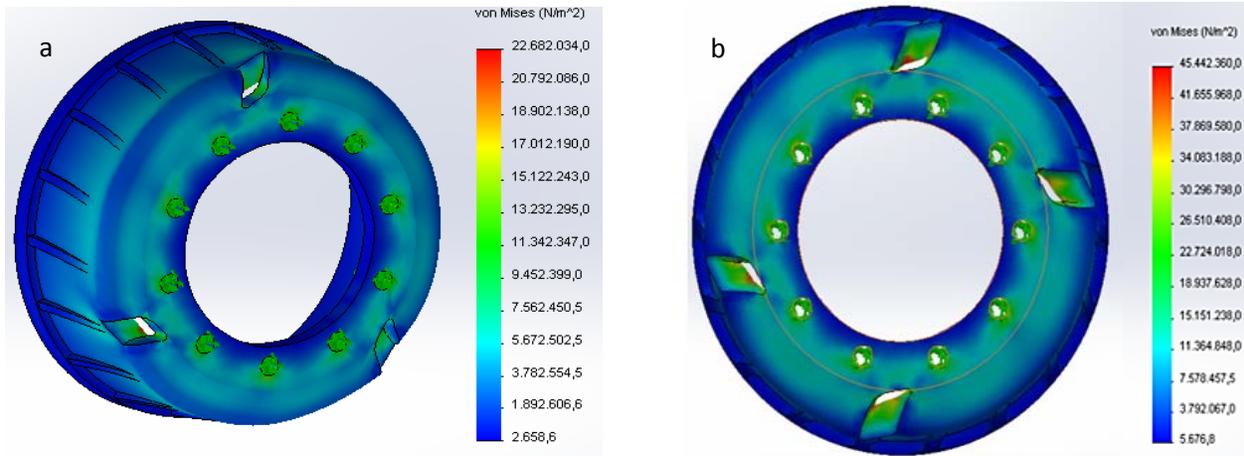


Figura 3.14. Distribución de tensiones de Von Mises en las tamboras diseñadas; a.) delanteras; b.) traseras

Si se observan los desplazamientos en la figura 3.15, para el nuevo diseño, toman valores de 21,1  $\mu\text{m}$  y 48,2  $\mu\text{m}$  los cuales son considerablemente pequeños, los de las originales son de 28,2  $\mu\text{m}$  y 62,1  $\mu\text{m}$ , lo cual muestra una disminución de un 22 % y un 25 %, por lo tanto, el nuevo diseño es más eficiente que el original.

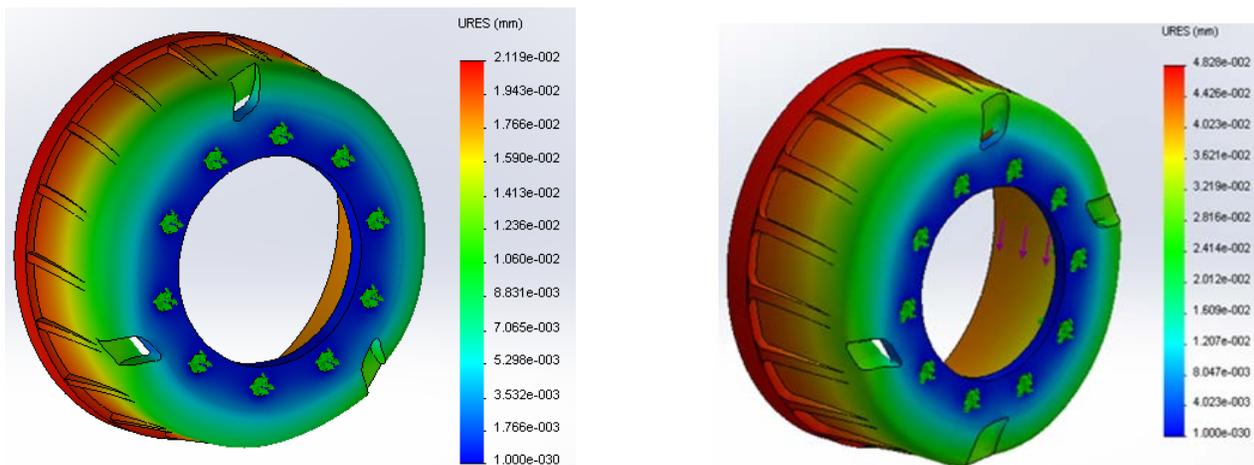


Figura 3.15. Desplazamientos en el nuevo diseño

### 3.10. Prueba de hipótesis y análisis estadístico

Para contrastar las hipótesis planteadas sobre los modelos que dan soluciones particulares a la forma en que se distribuyen las tensiones longitudinal y transversalmente

Según las condiciones expuestas, se empleó el método descrito en el apartado 2.8, el procesamiento estadístico se muestra en la tabla 3.9.

Como se cumple que  $t_{abs} > t_{0.05}$  entonces, se rechaza la hipótesis nula observándose que existe diferencia significativa entre las medias de los datos en las variables analizadas, con un nivel de confianza superior al 95 %.

Tabla 3.7. Prueba t para medias de los datos analizados

<b>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas</b>		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	180,87	67,6
Varianza	11421,6498	53,2512
Observaciones	2	2
Coeficiente de correlación de Pearson	-1	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	1,40307197	
P(T<=t) una cola	0,19710167	
Valor crítico de t (una cola)	0,72654253	
P(T<=t) dos colas	0,39420334	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96261051	

Luego se calcula la probabilidad de cometer un error de tipo dos por la ecuación 2.35, conociendo que el tamaño de muestra es de 2 y los demás datos de la ecuación 2.34 derivados de la tabla 3.9, se obtiene que tiende a cero.

El hecho de rechazar la hipótesis asumida para el nivel de significación definido permite plantear que, como los resultados experimentales son probadamente significativos, se pueden utilizar los modelos definidos para distribución de las tensiones de forma uniforme, operando en regímenes normales de explotación para las condiciones analizadas.

De esta manera, los resultados experimentales demuestran que las modificaciones realizadas al modelo fabricado por China Zhengzhou Yutong Group Lts., Co, son consistentes con la distribución uniforme de las tensiones, ya que provoca una disminución en su valor, lo que constituye el primer aporte de la investigación.

### **3.11. Evaluación económica**

Para importar productos desde el extranjero hay que tener en cuenta que además del coste del producto hay que considerar gastos por concepto de seguro, flete y transportación. El costo en china de una tambora de frenos para ómnibus Yutong es de 60 dolares, al sumarle los gastos por concepto de seguro, flete y transportación este valor asciende a 76 dólares

El precio de las tamboras tomando como referencia los datos de la ficha de costo realizada por la UEB Fundición y teniendo presente los procesos tecnológicos que participan en la elaboración de las mismas, tales como los gastos de materia prima y materiales, gastos de fuerza de trabajo, gastos indirectos de producción, gastos generales y de administración y otros es de 493 y 458,62 pesos por tonelada de fundición para las tamboras delantera y trasera, y de de ellos en CUC 198,96 y 194,04 respectivamente.

Considerando que según la carta tecnológica de fundición para las tamboras, cada molde de estas necesita 202,76 kg para la delantera y 256,70 kg en el caso de la trasera, tendríamos entonces que con una tonelada de material podríamos fabricar de forma redondeada 4 piezas, lo cual nos permite llegar a la conclusión de que el costo de fabricación de cada tambora es de 123,25 y 114,5 pesos, de ellos 49,74 y 48,51 en CUC, respectivamente para las tamboras delanteras y traseras.

Por lo tanto, en comparación con el precio de fabricación es económicamente más factible fabricar las tamboras en la industria nacional que importarlas ya que permite ahorrar 27 dólares por pieza.

Además del aporte ya analizado por concepto de importación, el nuevo diseño incorpora además un aporte económico y social, ya que este aumenta la vida útil del elemento analizado y por lo tanto aumenta la disponibilidad técnica del transporte nacional de pasajeros en ómnibus, beneficiando tanto a los pasajeros como además la empresa de ómnibus nacionales que tendría mayores ganancias.

Teniendo en cuenta que en la base de ómnibus donde fue realizada la investigación cuenta con 50 equipos y que como promedio en dos ocasiones en el año cada equipo presentó rotura de las tamboras por agrietamiento, si se implementa el nuevo diseño se lograría eliminar este problema lo cual generaría solo por concepto de importación un ahorro aproximado de 7600 dólares para este parque automotor; y por concepto de fabricación la cifra sería de 12300 pesos entre CUC Y CUP.

Por lo antes planteado consideramos que económicamente es recomendable implementar el nuevo diseño en el taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, siendo consecuentes de esta forma con una de las principales necesidades de nuestro país en la actualidad que es la sustitución de importaciones.

### **3.12. Evaluación ecológica**

El nuevo diseño tiene un impacto positivo en el medio ambiente ya que al lograr mayor vida útil de las tamboras se reducen los niveles de fabricación de las mismas, lo cual se realiza por el método de fundición y en este proceso en el área de preparación de la mezcla, pueden ocurrir grandes emanaciones de partículas de polvo de las arenas, la bentonita, y de otros aditivos que se utilizan en la propia preparación de la mezcla o en la elaboración de los moldes como son el grafito, y la arena sílice, así como aditivos para disminuir la penetración metálica en forma de polvo o pinturas, los cuales son contaminantes ambientales y dañan la salud de las personas

Debe tenerse también en cuenta que las tamboras desechadas provocan afectaciones medioambientales, ya que por lo general pasan a formar parte del material no utilizable en los patios de los talleres de mantenimiento y reparación o a orillas de las carreteras.

Además con el nuevo diseño se reduce la posibilidad de ocurrencia de accidentes ya que aumenta la seguridad del equipo.

### **3.13. Conclusiones del capítulo**

- En el análisis fractográfico y en la modelación realizada, a las tamboras de freno, se pudo comprobar que hay similitudes consistentes, observándose que los campos de máximas tensiones están localizados en los bordes superiores a partir de los orificios de ventilación, zonas por donde se produce la fractura.
- De acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados se pudo determinar que de las aleaciones evaluadas y de acuerdo a las normas de referencia, la que mejores características posee para fabricar las tamboras es el Fe2Ni.
- En el diseño propuesto se evidencia una mejor distribución de tensiones y el carácter de la fractura en presencia de un momento torsor, lo que permitirá incrementar la vida útil de dicha tambora.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Se realizó un diseño que posee una nueva configuración de geometría, para las tamboras de frenos de ómnibus Yutong, el cual conducirá a reducir la aparición de fractura prematura debido a una distribución de tensiones más uniforme ante cargas de trabajo.
- A partir del análisis por elementos finitos, realizado a las actuales tamboras de freno del ómnibus Yutong, se pudo observar que los agujeros para los clones y los de ventilación son los principales focos de concentración de tensiones y a postre la causa más probable de fractura de estos elementos.
- De acuerdo con los análisis realizados, se propone la aleación fundida Fe-21Ni para la fabricación de las tamboras de freno ya que esta presenta mejores características, como mayor resistencia al desgaste, dureza media dentro de los límites exigidos por la norma, una estructura cristalina más acorde, y mayor resistencia mecánica.
- El cambio de diseño de las tamboras así como la propuesta de material realizados genera un impacto económico que asciende a 12300 (CUC+CUP) en el periodo de un año para el parque automotor analizado, además genera un importante impacto social ya que aumenta la disponibilidad técnica del transporte nacional de pasajeros.

## **RECOMENDACIONES**

- Proponer a la Empresa Mecánica del Níquel, el empleo del diseño propuesto, para la fabricación de tamboras de freno de ómnibus Yutong.
- Establecer la tecnología de fabricación para el diseño de tamboras de frenos realizado en esta investigación.
- Continuar investigando la relación, de los orificios de ventilación, con la fractura de las tamboras actuales, con el fin de eliminarlos o reducirlos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alonso, J. M. "Técnicas del automóvil". Paraninfo. Madrid, 1990.
2. Andrino, J. C. Mecánica y mantenimiento simple del automóvil, 2006.
3. Aparicio, F.; Vera, C.; Díaz, V. "Teoría de los Vehículos Automóviles". SP ETSII Universidad Politécnica Madrid, 1995.
4. Budynas, R. J. y Keith, J. N. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8<sup>va</sup> edición, 2008.
5. Estrada y Cingualbres, R.; González-Utria, E. Fundamentos de la medición de tensiones y deformaciones. Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad de Holguín, Cuba, 2001
6. Freund, J.; Simona, G. Modern Statistics. 8 the Edition. Ed. Prentice Hall. New Jersey, USA, 1992
7. González, O. A. El transporte público colectivo, individual y masivo de pasajeros, el transporte intermunicipal y las terminales satélites en Bogotá, 2005.
8. Guliaev A. P, Metalografía. Editorial MIR- Moscú, 1988.
9. Hernández, E. "Selección de la aleación y tecnología de fundición de tamboras de ómnibus Yutong". Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, universidad de Moa; Antonio Núñez Jiménez, 2016.
10. Han Jun. Uso y mantenimiento diario del autobús. Zhengzhou Yutong Bus Co., Ltd. Yutong, 2006.
11. <http://www.juventudrevelde.cu>. Desarrollo del sector del Transporte. Cuba. 2018.
12. <http://www.mauinariaspesadas.org/sub/>. Curso de tipos de frenos, 2017.
13. <http://www.ingenieriamecanica.com/diagnosis> de averías frecuentes, 2017.
14. <http://www.wikipedia.com>. La enciclopedia libre (Fundación). Barcelona, 2003.
15. López, J. A. Manual técnico y de recomendaciones fricción SRL, 2011.
16. Luque P.; Álvarez D.; Vera C. Ingeniería del Automóvil. Sistema y Comportamiento Dinámico. Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
17. Martínez, J. N. Clasificación de frenos, 2009.
18. Maujo, O. "Selección del material para la fundición de bolas empleadas en la molienda del Clinker". Tesis para la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Moa, 2016.

19. Paumier, Y. Comportamiento microestructural del material del enfriador de mineral de la Empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara "Tesis en opción al Título de Master en Electromecánica. 2013.
20. Pérez L. R. Diseño del sistema de frenado para un prototipo Fórmula Student. Trabajo Fin de Grado; Universidad de Sevilla, 2013. **de Sevilla**
21. Reinoso A. "Tecnología de fundición para fabricación de tambora trasera y delantera de los ómnibus Yutong". Tesis de Diplomado, universidad de Moa; Antonio Núñez Jiménez, 2012.
22. Rivera, G. Estructura de Solidificación de Fundiciones de Hierro con Grafito. 2000.
23. Rodríguez, I.; Fernández, T.; Guardado, R.; Ngendanzi, V. Modelación por elementos finitos de la ruptura del tubo en el transportador de mineral laterítico reducido. Revista Geología y Minería, XXIII (4): 1 -13, 2007.
24. Romero, M. L. Manual de tipos de frenos de tambor, 2016.
25. Rojas, M. Resistencia al desgaste de la aleación Ni-Resist con adición de aluminio como elemento de aleación. Tesis en opción al Título de Master en Metalurgia. Mención Metalurgia Física. 2011.
26. Sánchez, R.; Torres, S. Estadística elemental. Ed. Pueblo y Educación. La Habana, Cuba, 1989.
27. Santos, M. S. manual de mecánica de frenos de tambor. 2015
28. Suárez, P. A. Manual de procedimientos para reparación de frenos, 2013.
29. Szczepaniak, C. y Aragón, R. M. Teoría del automóvil. Editorial Pyeblo y Educación, La Habana, 1994.

## ANEXO 1. Ficha técnica del ómnibus Yutong

Ítem		
Modelo	Autobús de modelo ZK6118HGA-6	
Estándar ejecutivo		
Posición del logo y modelo del autobús	Superficie superior del manto delantero del vehículo, superficie exterior del manto lateral izquierdo	
Código VIN (contenido y posición )		Posición engravada: La viga grande de la parte trasera del marco del vehículo
El uso del autobús	Carga de pasajeros: 54/70	
Posición de placa de datos	En la pared trasera del estibo de la puerta delantera en el vagón	
Parámetros de dimensión	Largo x Ancho x Alto(mm):11600x2500x3265(3075)	
Parámetros de funciones	Velocidad máxima(km/h):110	
	Distancia de freno (m): V <sub>0</sub> =30km/h:≤10	El diámetro mínimo de vuelta(mm)≤24
	Angulo de acercar/ alejar(°):7/7	Espacio min. al terreno(mm)195
Parámetro de pesos	Pesos totales máximos y la carga de ejes correspondientes(kg):16500/5500(delantero)/11000(trase ro)	
	Peso del equipo entero y la carga de ejes correspondientes(kg): 11900/3900/8000	
Especificación del neumático	295/80R22.5	





#### ANEXO 4. Carta tecnológica para la fundición de la tambora delantera

		Empresa Mecánica del Níquel "Cmdte: Gustavo Machín Hoed de Beche" UEB de Fundición				Modelo R-01 / ST-P-001 Carta del Proceso Tecnológico de Fundición en Moldes de Arena				
Número de Plano	432007				Orden de trabajo	E-860002				
Denominación	Tambora Delantera				No Tecnología	4H501	Rev.			
Material			Masa, KG							
Norma	Marca, Descripción.	Pieza	Pieza Fundida	Sistema de Aliment.	Metal líquido para Fundir	Metal líquido en el molde	Cant piezas en el molde	Pzas Fund Útiles, %		
ASTM-159-83	G3500b(Fe21	42	62	9,38	101,38	202,76	1	67		
Sistema de Alimentación, mm					Profundidad secado del molde, mm	Permanencia molde antes de fundir, h	Tiempo envejecim. del molde, h			
ØTragadero	Escoreador		Alimentador		-----	4	-----			
Ø 38	31X21X31		22X18X11		-----	4	-----			
Juego de Plantilla					Mazarotas					
Descripción		Cant.	Descripción		Cant.	Núm.	Cant.	Base	Vértice	Altura
Entera		2	-----		-----	1	4	Ø 40	Ø 112	200
Sistema de Alimentación		1	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----
Caja de macho		1	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----
Mazarotas		8	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----
Caja de Moldeo				Mezcla de Moldeo			Clavos de Fundición			
Posición	Diám. Largo	Ancho	Altura	Tipo	Número	Masa	Dimensiones, mm		Cant.	
Superior	1000	800	250	cara/relleno	Autofrag	580	-----		-----	
Inferior	1000	800	200	cara/relleno	Autofrag	380	-----		-----	
Soporte			Enfriadores			Sujeción del molde				
Material	Tipo, Tamaño	Cant.	Núm.	Material	Dimensiones	Cant.	Cantidad de grapas		Masa del contrapeso.	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4		-----	
Pintura Anticostra			Vertido del molde				Permanen. pieza fundida		Masa del Molde Vertido	
Forma	Descripción	Espesor	Capacidad Cazuela	Cant. de	Temp. del Metal, °C	Duración Seg.	10 horas		2162,76	
A brocha	Base Zirconio	2 Manos	500 Kg	1	1280-1300	20				
<b>Observaciones:</b> Contracción del metal Líquido 1%. Comprobar el peso de la pieza fundida. Ventilación en el molde superior con aguja de Ø 4 - 5 mm. Calentar la cazuela de 700-800 C. Colocar las 4 mazarotas a 90 grados y suplementarlas hasta la altura de 200 mm. Realizar dos moldes de prueba (serie cero).										
								Hoja No	1	
						Firma	Fecha			
				Elaboró						
Mod	Cant	No Notif	Firma	Fecha	Aprobó			Cant hojas		

## ANEXO 5. Carta tecnológica para la fundición de la tambora trasera

		Empresa Mecánica del Níquel "Comdte: Gustavo Machín Hoed de Beche" UEB de Fundición				Modelo R-01 / ST-P-001 Carta del Proceso Tecnológico de Fundición en Moldes de Arena				
		Número de Plano	436035			Orden de trabajo	E-860001			
Denominación		Tambora Trasera			No Tecnología	4H504	Rev.			
Material			Masa, KG							
Norma	Marca, Descripción.	Pieza	Pieza Fundida	Sistema de Aliment.	Metal líquido para Fundir	Metal líquido en el molde	Cant piezas en el molde	Pzas Fund Útiles, %		
ASTM A159-83	G3500b(Fe21)	76	84	9,38	125,38	250,76	2	67		
Sistema de Alimentación, mm					Profundidad secado del molde, mm	Permanencia molde antes de fundir, h	Tiempo envejecim. del molde, h			
ØTragadero	Escorador		Alimentador							
Ø 38	31X21X31		24X20X11		-----	4	-----			
Juego de Plantilla				Mazarotas						
Descripción		Cant.	Descripción		Cant.	Núm.	Cant.	Base	Vértice	Altura
Entera		2	-----		-----	1	4	Ø 40	Ø 112	200
Sistema de Alimentación		1	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----
Caja de macho		1	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----
Mazarotas		8	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----
Caja de Moldeo				Mezcla de Moldeo			Clavos de Fundición			
Posición	Diám. Largo	Ancho	Altura	Tipo	Número	Masa	Dimensiones, mm		Cant.	
Superior	1000	800	400	cara/relleno	Auto frag	560	-----		-----	
Inferior	1000	800	200	cara/relleno	Auto frag	373	-----		-----	
Soporte			Enfriadores				Sujeción del molde			
Material	Tipo, Tamaño	Cant.	Núm.	Material	Dimensiones	Cant.	Cantidad de grapas	Masa del contrapeso.		
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4	-----		
Pintura Anticostra				Vertido del molde			Permanen. Masa del			
Forma	Descripción	Espesor	Capacidad Cazuela	Cant. de	Temp. del Metal, °C	Duración Seq.	pieza fundida	Molde Vertido		
Abrocha	Base Zirconio	2 Manos	500 Kg	1	1280-1300	24	10 horas	2183,76		
<b>Observaciones:</b>										
Contracción del metal Líquido 1%. Comprobar el peso de la pieza fundida. Ventilación en el molde superior con aguja de Ø 4 - 5 mm. Calentar la cazuela de 700-800 C. Colocar las 4 mazarotas a 90 grados y suplementarlas hasta la altura de 200 mm. Realizar dos moldes de prueba (serie cero).										
								Hoja No	1	
						Firma	Fecha			
						Elaboró				
Mod	Cant	No Notif	Firma	Fecha	Aprobó					
								Cant hojas		

ANEXO 6. Tecnología para el tratamiento térmico

Hoja1		CARTA TECNOLÓGICA DE TRATAMIENTO TÉRMICO				07-R-59						
 Empresa Mecánica del Níquel. Comandante "Gustavo Machin Hoed de Beche" Moa-Holguin.		Denominación de la pieza.		Orden de trabajo.								
		Tambora delantera y trasera		F07 - 0004								
Nº de Plano. 436034		Nº de Plano.		Tecnología No.								
		382										
Denominación y Grado del Material ASTM A 159 - 83 Grade G3500b		Masa Kg										
		42										
Número de la operación Tecnológica.	Denominación de la Operación Tecnológica	Equipo Tecnológico	Utilaje Tecnológico	Medio Ambiente.	Dureza (HRC)	Penetración del temple.	Régimen de trabajo		Cantidad	Norma de Rendimiento		T.P.C.
							Temperatura (°C)	Exposición. (h)		Velocidad (oc/h)	Piezas en el Dispositivo o la Instalación.	
1.	Normalizado	CW4 - 16.12/9	Disp.				840		1	1	V	3,08
	Calentamiento											
	Permanencia						2,00					
	Enfriamiento			Aire								
	Comprobación de dureza	DP.			207 - 255 HB							



