



**Departamento de Mecánica  
Facultad de Metalurgia y Eletromecánica  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa**

# **TRABAJO DE DIPLOMA**

**En opción al título de Ingeniera Mecánica**

Caracterización mecánica y microestructural de una fundición Hadfield sometida a regímenes de desgaste

**Autora:** Lianet Rodríguez Guilarte

**Tutores:** Dr.C. Isnel Rodríguez González

Dr.C. Tomás H. Fernández Columbié

**Moa, 2018**



## **RESUMEN**

En el presente trabajo se analizó una aleación de acero al manganeso del tipo Hadfiel, fabricada en la Empresa Mecánica del Níquel, debido a la frecuencia de averías, por desgaste, que se producen al colocarlas bajo la acción de agentes erosivos, en ambiente acuoso, para ello se seleccionaron tres muestras fundidas del mismo (una sin que haya trabajado en ningún proceso y dos que habían rendido vida útil), de las que se prepararon 3 probetas de cada una, se le realizaron ensayos de dureza y de microscopía óptica para conocer su comportamiento microestructural y la presencia de microconstituyentes duros que evidenciaran la realización de algún tratamiento de endurecimiento. Los resultados muestran que no hay coincidencia, en algunos elementos, con los estándares establecidos para la aleación, se corroboró la presencia de una matriz con estructura austenito-ferrítica, muy blanda, con durezas promedio que no excedieron los HRC 20, elementos que constituyen la causa fundamental de la mencionada rotura prematura de piezas fabricadas de ese material. La valoración económica realizada justifica la realización de un tratamiento térmico que garantizaría un impacto de 3558,68 CUC.

## **SUMMARY**

In the present work a steel alloy with manganese, type Hadfiel, manufactured in the Empresa Mecánica del Níquel, due to the frequency of mishaps, for waste that take place when placing it under erosive media, in watery atmosphere, was analyzed, for it were selected three fused samples of the same one (one without has worked, in any process, and two that had surrendered useful life), of those that got ready 3 test tubes of each, it was carried out rehearsals of hardness and of optic microscopy, in order to know its microstructural behavior and the presence of hard structures that evidenced the realization of some hardening treatment. The results show that there isn't coincidence, in some elements, with the established standards for the alloy, was corroborated the presence of a womb with austenitic-ferrite structure, very soft, with hardness average that didn't exceed HRC 20, elements that constitute the fundamental cause of the aforementioned premature break of fabricated parts of that material. The carried out economical valuation justifies the realization of a thermal treatment that would guarantee an impact of 3558,68 CUC/year.

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>CAPITULO I: DESGASTE Y MECANISMOS DE AGITACIÓN</b> .....	7
<b>1.1. Introducción</b> .....	7
<b>1.2. Características de los mecanismos de agitación</b> .....	7
<b>1.1.1. Clasificación de los mecanismos de agitación</b> .....	8
<b>1.2. Desgaste de las piezas de máquinas</b> .....	11
<b>1.2.1. Tipos de desgaste</b> .....	11
<b>1.3. Materiales resistentes al desgaste</b> .....	17
<b>1.3.1. Hierro fundido aleado resistente al desgaste abrasivo</b> .....	17
<b>1.3.2. Hierros blancos al cromo-níquel</b> .....	18
<b>1.3.3. Hierros blancos con elevado contenido de cromo</b> .....	20
<b>1.3.4. Hierros blancos con alto cromo modificados con molibdeno</b> .....	20
<b>1.4. Propiedades de los aceros tipo Hadfield</b> .....	21
<b>CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	24
<b>2.1. Introducción</b> .....	24
<b>2.2. Materiales disponibles para la investigación</b> .....	24
<b>2.2.1. Material de las paletas fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel</b> .....	24
<b>2.3. Preparación de muestras</b> .....	25
<b>2.3.1. Preparación mecánica de las probetas</b> .....	26
<b>2.3.2. Preparación de las muestras para la observación microestructural</b> .....	26
<b>2.3.3. Desbaste y pulido</b> .....	27
<b>2.3.4. Lijado grueso y fino</b> .....	27
<b>2.3.5. Ataque de las muestras para su examen microscópico</b> .....	28
<b>2.4. Determinación de la dureza</b> .....	28
<b>2.5. Caracterización microestructural</b> .....	29
<b>2.6. Determinación del tamaño de los granos de la microestructura</b> .....	29

<b>2.7. Identificación de transformaciones de fase en la aleación del tipo Hadfield</b>	<b>30</b>
<b>2.8. Cálculo del volumen de la aleación</b>	<b>33</b>
<b>2.8.1. Determinación del peso del árbol</b>	<b>33</b>
<b>2.9. Comprobación de la resistencia por el método de elementos finitos</b>	<b>34</b>
<b>2.9.1. Trabajo con programas de elementos finitos</b>	<b>34</b>
<b>2.10. Determinación del desgaste producido en el material</b>	<b>36</b>
<b>CAPITULO III: RESULTADOS Y SU VALORACIÓN</b>	<b>40</b>
<b>3.1. Introducción</b>	<b>40</b>
<b>3.2. Determinación de la dureza de las muestras</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Composición química de las probetas</b>	<b>41</b>
<b>3.3.1. Caracterización microestructural de las piezas fundidas no trabajadas</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2. Caracterización microestructural de las piezas sometidas a desgaste</b>	<b>43</b>
<b>3.4. Determinación de los tamaños de grano</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1. Tamaños del grano para la aleación no trabajada</b>	<b>45</b>
<b>3.4.2. Tamaños del grano para las aleaciones retiradas del proceso</b>	<b>46</b>
<b>3.5. Cálculo del volumen de la aleación</b>	<b>46</b>
<b>3.5.1. Determinación del peso de los árboles</b>	<b>47</b>
<b>3.5.2. Presión actuante</b>	<b>47</b>
<b>3.6. Modelación por el método de elementos finitos</b>	<b>48</b>
<b>3.7. Cálculo del desgaste</b>	<b>48</b>
<b>3.10. Valoración ambiental</b>	<b>49</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>52</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>54</b>

## INTRODUCCIÓN

La calidad de la mayoría de los productos, elaborados de metal, depende de la condición de la superficie y del deterioro debido al uso continuado. Dicho deterioro es importante también en la práctica de la ingeniería; suele ser el factor principal que limita la vida y el desempeño de las componentes de una máquina.

El desgaste, como proceso, conduce a la pérdida de capacidad, no intencional, resultante del empleo o del medio donde se está explotando la pieza; puede considerarse esencialmente como un fenómeno de superficie y es una de las influencias más destructivas a las que están expuestos los materiales, por lo que requiere de estudios relacionados con la resistencia a dicho fenómeno y sobre todo la interacción entre los cuerpos y de su pérdida de masa gradual.

No hay regla general que sea válida, para todas las manifestaciones del desgaste. Este fenómeno afecta, a las piezas, por toda una variedad de condiciones, tales como tipo y modo de la carga, velocidad, cantidad y tipo de lubricante, temperatura, dureza, acabado de la superficie, velocidades relativas de los elementos que se acoplan, presencia de materiales extraños y naturaleza química del medio.

Así como las condiciones varían en cada aplicación, también lo hacen las correspondientes manifestaciones de desgaste, debido, generalmente, a la combinación de una o más formas elementales. Las pequeñas partículas resultantes del raspado, originado por el rozamiento a la vez favorecen las consecuencias del mencionado fenómeno. No siempre es fácil deducir el tipo de deterioro que se ha producido.

Como en la mayoría de las aplicaciones mecánicas, el desgaste rara vez puede evitarse por completo, aun con la mejor lubricación. Es práctica común utilizar, en forma conjunta, un material duro y otro relativamente suave, donde este último se emplea con la finalidad de remplazar, con mayor frecuencia, siendo esta una variante económica.

El desgaste genera considerables pérdidas de materiales, recursos, tiempo y gran cantidad de medios para su reparación, con la consiguiente afectación de la producción, así como en la elaboración o adquisición de nuevas piezas. Si a estos factores se une la tendencia a incrementar las velocidades de trabajo, se tienen elementos suficientes para entender por qué el aumento de la vida útil, de los órganos de trabajo de los elementos de máquinas, se ha convertido en un problema básico, en la práctica de la ingeniería, en los últimos años.

Los órganos de trabajo de las maquinarias tienen particularidades en cuanto a su uso, como son presentar períodos de trabajo relativamente cortos y largo tiempo de almacenamiento. En los mencionados órganos, varían las dimensiones y propiedades de los materiales, debido a los procesos de oxidación corrosión y posibilidades de deformaciones permanentes, en ocasiones, como resultado de la acción del propio peso de los elementos y sobre todo cuando éstos tienen dimensiones considerables.

### **Situación problemática:**

En la Unidad Empresarial de Base Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” se fabrican piezas, para equipos sometidos a un ambiente altamente agresivo, las que son elaboradas de materiales metálicos, endurecibles por acritud, como los aceros del tipo Hadfield y las fundiciones Ni-Hard, los que garantizan la consistencia de sus elementos. En los últimos tiempos se han experimentado dificultades debido a las averías, por desgaste, que se produce en paletas para equipos de lavado de menas lateríticas, sobre todo en su superficie, las que van perdiendo material hasta dejar incapacitadas dichas máquinas, ello provoca la salida prematura del proceso productivo de dichas paletas, una vez que se produce la pérdida de capacidad de trabajo hay que desarrollar acciones correctivas, de sustitución de los elementos desgastados, no previstas para las operaciones de la máquinas, proceso que atenta contra la humanización del trabajo e inciden en paradas frecuentes. Ello trae consigo significativas pérdidas económicas por aumento considerable del tiempo empleado en el recambio de dichas piezas desgastadas, incremento de los costos de operación y mantenimiento, además de alterar los niveles de consumo de energía establecidos. Otras pérdidas se producen al no poder recuperar las piezas averiadas, las que pasan a formar parte de la acumulación de desechos, en los patios de los talleres y plantas que afectan el medio ambiente, de la región, al ser materiales muy difíciles de reciclar.

### **Problema a investigar:**

Aún son insuficientes los estudios relacionados con el efecto del desgaste, el comportamiento microestructural, así como la determinación de las cargas y esfuerzos que actúan sobre la aleación fundida, del tipo Hadfield de producción nacional, empleadas para la fabricación de paletas en equipos de lavado de menas lateríticas.

**Objeto de estudio:**

Acero Hadfield fabricado en la Empresa Mecánica del Níquel.

A partir del problema planteado se define como **objetivo:**

Caracterizar, a partir de las condiciones de desgaste, así como de las cargas y esfuerzos que actúan, las variaciones microestructurales que se originan en la aleación fundida, del tipo Hadfield, elaborada en la Empresa Mecánica del Níquel, de manera que permita identificar las causas de roturas cuando es empleada para la fabricación de paletas para el lavado de menas lateríticas.

El **campo de acción** lo constituye:

La caracterización microestructural, de dureza, de cargas y esfuerzos de la fundición del tipo Hadfield, expuesta a condiciones de desgaste.

**Hipótesis:**

A partir de las propiedades mecánicas y metalúrgicas, así como la determinación de las cargas y esfuerzos que actúan sobre la fundición del tipo Hadfield, fabricada en la Empresa Mecánica del Níquel, se podrá determinar los efectos del desgaste sobre la superficie de la misma y las causas que producen frecuentes salidas de servicio y garantizar un incremento de su vida útil de servicio.

Se definen los siguientes **objetivos específicos:**

- Obtener el comportamiento microestructural del acero Hadfield, fabricado por proceso de fusión en la Empresa Mecánica del Níquel.
- Determinar la dureza de un acero Hadfield, fabricado en la Empresa Mecánica del Níquel.
- Comprobar, mediante el método de elementos finitos, la resistencia de la aleación Hadfield en una paleta de lavadora de menas lateríticas.

**Tareas:**

1. Revisión bibliográfica relacionada con materiales resistentes al desgaste.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas, originadas en el acero del tipo Hadfield.

4. Determinación de las condiciones de carga a las que está sometido el acero Hadfield por efecto del desgaste.
5. Caracterización microestructural, del acero Hadfield, expuesto a condiciones de desgaste.
6. Obtención del comportamiento tensodeformacional a través del método de elementos finitos.
7. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso.

## **CAPITULO I: DESGASTE Y MECANISMOS DE AGITACIÓN**

### **1.1. Introducción**

La determinación de los factores responsables del desgaste, de un mecanismo o estructura, brinda una valiosa información para mejorar, tanto el diseño como el uso de los componentes, que permita evitar paradas de líneas o afectaciones a la producción.

#### **Objetivo:**

Sistematizar los conocimientos, presentes en la literatura, relacionados con el desgaste y el comportamiento microestructural de aleaciones empleadas para la fabricación de elementos sometidos a ese tipo de condición.

### **1.2. Características de los mecanismos de agitación**

La agitación y la mezcla son operaciones básicas utilizadas en la ingeniería de procesos. Se refiere principalmente al movimiento que se genera en un material de una manera específica, principalmente con un equipo que produce un movimiento circular dentro de algún tipo de contenedor o estanque, el cual puede ser cerrado o abierto (Verdugo, 2013).

La mezcla consiste en la homogenización, al azar, de dos o más materiales que en un inicio se encontraban separados. Un sistema de agitación puede ser clasificado (Castillo, 2013) dependiendo de varios criterios dentro de los cuales se pueden indicar los siguientes:

- Según el modelo de flujo producido (axial, radial, tangencial).
- Dependiendo de la viscosidad del fluido.
- La relación que existe entre el diámetro del agitador y el del estanque.
- La velocidad inducida en el fluido.
- El tipo de régimen al que está sometido el fluido (laminar o turbulento).
- La geometría del fondo del estanque.

Un agitador de fluidos puede realizar varios propósitos al mismo tiempo y dependerán entonces para su elección, tanto de las características mecánicas como del proceso solicitado en un proyecto determinado.

Las paletas pueden ser de espesor variable o constante. Las de espesor variable, generalmente tienen una forma aerodinámica, con el objetivo de disminuir las pérdidas antes mencionadas y como producto de resultados experimentales. Las de espesor constante son

los más empleados debido a la simplicidad de su construcción. En ambos casos es importante la determinación de la posición geométrica, en el disco de la línea media, de la paleta (Ramos, 1995).

El elemento que caracteriza a los distintos tipos de impelentes es el modelo de flujo que producen. Estos modelos a pesar de su diversidad tienden a cuatro condiciones principales: flujo tangencial, flujo radial, flujo axial y flujo mixto. El flujo es radial cuando la succión del fluido ocurre en dirección paralela al eje del impelente y la descarga se realiza en dirección radial, es decir, paralela al plano de las hojas. La principal característica de este flujo es que dirige el movimiento del líquido hacia las paredes del tanque, de forma perpendicular al eje de rotación (Mott, 2006).

### **1.1.1. Clasificación de los mecanismos de agitación**

Existen tres tipos básicos de agitadores (Castillo, 2013), los que están relacionados con los tres modelos de flujo fundamentales:

- de flujo axial,
- de paso cerrado
- de flujo radial

#### **1.1.1.1. Agitadores de flujo axial**

Los agitadores de flujo axial permiten que el mineral se desprenda de las paletas del impulsor aproximadamente a 45° y por lo tanto presenta recirculación, luego retorna hasta la zona central de dichas paletas, creando un campo de circulación, de ida y vuelta, paralelo al eje de giro. El mismo se presenta con un Reynolds de entre 200 a 600 y se transforma en flujo radial cuando el número de Reynolds disminuye. Los agitadores de flujo axial incluyen a todos los que tienen palas que forman un ángulo determinado, con respecto al plano perpendicular del eje, menor de 90°. Las hélices y turbinas de palas o aspas inclinadas son las más representativas de este tipo de agitadores.

Existen dos rangos básicos de velocidades de giro: de 1150 a 1750 min<sup>-1</sup> con transmisión directa y de 350 a 420 min<sup>-1</sup> y empleo de engranajes. Para la suspensión de sólidos es habitual utilizar las unidades con dichos engranajes, mientras que para reacciones o dispersiones rápidas son más apropiadas las unidades de alta velocidad.

### **1.1.1.2. Agitadores de paso cerrado**

Los agitadores de paso cerrado se incluyen los de tipo ancla y helicoidal. Su principal característica es que trabajan muy cercanos a la pared del estanque y son particularmente eficaces para fluidos de alta viscosidad, en los que es necesario tener concentrada la capacidad de mezcla cerca de la pared, consiguiéndose un campo de flujo más efectivo que con los agitadores anteriormente mencionados.

### **1.1.1.3. Agitadores de flujo radial**

Los más representativos son los agitadores de palas planas o paletas. Éste tipo de agitadores incluyen palas (o aspas) paralelas al eje del motor. Los más pequeños y de aspas múltiples se denominan “turbinas”; los mayores, de velocidades más bajas, con dos o cuatro aspas, se denominan agitadores de palas o de paletas. Generan un flujo radial para cualquier Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial, aunque baja capacidad de impulsión.

En la mayoría de los procesos industriales de mezclado se busca que la capacidad de impulsión sea lo mayor posible, mientras que la velocidad tangencial no constituye un factor de importancia y por lo tanto se prefiere evitar. Por esto, este tipo de agitador no es de uso común, siendo los más utilizados los que principalmente maximizan el flujo y minimizan la velocidad tangencial. Los agitadores de palas rígidas se clasifican según el valor del cociente entre el área total de las palas con respecto al del círculo que circunscribe al agitador y, según aumenta la viscosidad del fluido, un mayor valor del cociente, anteriormente definido, resulta más efectivo para proporcionar un tipo de flujo predominantemente axial (Castillo, 2013).

#### **1.1.1.3.1. Agitadores de paletas**

Los agitadores de paletas (Roxón, 2013) consisten en una o varias hojas planas sujetas a un eje rotatorio de manera que:

- El flujo de líquido tiene una componente radial grande en el plano de la pala y también un gran componente rotacional.
- Los agitadores de pala son de construcción relativamente fácil.
- Los agitadores de pala sencillos producen una acción de mezcla suave, que es con frecuencia la más conveniente para el trabajo con materiales cristalinos frágiles.

- Son útiles para operaciones de simple mezcla, como, por ejemplo, la mezcla de líquidos miscibles o la disolución de productos sólidos.

Los agitadores industriales de paletas giran a velocidades entre 20 y 150 r/min. La longitud del rodete de un agitador de paletas es del orden de 50 al 80 % del diámetro interior del tanque. La anchura de la paleta es de un sexto a un décimo de su longitud.

A velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave, en un tanque sin placas deflectoras o cortacorrientes, las cuales son necesarias para velocidades elevadas. De lo contrario el líquido se mueve como un remolino que gira alrededor del tanque, con velocidad elevada, pero con poco efecto de mezcla.

#### 1.1.1.3.2. Agitador propulsor de tres aspás

El agitador propulsor de tipo marino, similar a la hélice de un motor para lanchas, es uno de los más utilizados, puede ser móvil o estar montado en la pared de un tanque abierto (ver figura 1), en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades entre 400 y 1 750  $\text{min}^{-1}$ , son empleados para líquidos de baja viscosidad.

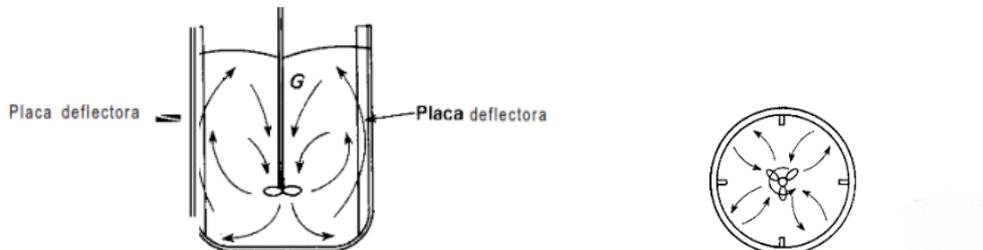


Figura 1. Agitador de tres paletas (Fuente: Raxón, 2013)

#### 1.1.1.3.3. Agitadores de turbina

Cuando se procesan líquidos con amplia diversidad de viscosidades, se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspás más cortas. El diámetro de una turbina mide entre 30 y 50 % del diámetro del tanque. Normalmente las turbinas tienen cuatro o seis aspás. Las turbinas con aspás planas producen un flujo radial.

#### 1.1.1.3.4. Agitadores de banda helicoidal

Los agitadores de banda helicoidal se usan para fluidos muy viscosos, opera a pocas velocidades de rotación en la región laminar; la banda se forma en trayectoria helicoidal y está unida a un eje central; el líquido se mueve en una trayectoria de flujo tortuosa hacia

abajo en el centro y hacia arriba a los lados, con movimiento de giro, algunos tipos son: de banda helicoidal doble y de banda helicoidal con tornillo.

## **1.2. Desgaste de las piezas de máquinas**

El desgaste puede ser definido como el daño superficial sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos. Este fenómeno se manifiesta por lo general en las superficies de los materiales, llegando a afectar la sub-superficie. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias. Los mecanismos de daño en los materiales se deben principalmente a deformación plástica, formación y propagación de grietas, corrosión y/o desgaste (FUNCA, 2017).

La pérdida progresiva de materia de las superficies de trabajo, es la consecuencia fundamental del desgaste, como resultado de la fricción y el movimiento relativo, o sea es un proceso de destrucción de las superficies de los sólidos en rozamiento el cual provoca la deducción de las dimensiones de las piezas, en dirección perpendicular al plano del punto donde se produce la fricción, también cambio de geometría (Márquez, 2002). Este puede ser:

1. Moderado: la superficie prácticamente lisa y protegida del óxido.
2. Severo: ocurre un contacto íntimo, ralladuras, partículas desprendidas que pueden alcanzar hasta 0,1 mm, aparece en etapas finales e iniciales del par.

### **1.2.1. Tipos de desgaste**

El desgaste (Hutshings, 1992), depende de las propiedades del material, del tratamiento de la superficie y su calidad y de la condición de explotación (temperatura, velocidad, carga, lubricación). Se clasifica:

1. En función de la interface:
  - Seco.
  - Limite.
  - Abrasivo.
2. En función a la cantidad de material desprendido puede ser:
  - Moderado (aparece durante la explotación normal).
  - Severo (inicio y final de la vida útil del par).

3. Según el movimiento relativo de los cuerpos:

- Por rodadura.
- Por deslizamiento.
- Por vibraciones.
- Por golpes (choque).

4. Por el mecanismo de formación del desgaste:

- Desgaste corrosivo – mecánico.
- Desgaste abrasivo.
- Desgaste corrosivo por fricción.
- Desgaste adhesivo (contacto metal – metal).
- Desgaste por fatiga superficial.

#### **1.2.1.1. Desgaste adhesivo**

El desgaste adhesivo se debe a que las superficies presentan rugosidades sobre las cuales se ejercen elevadas presiones, que provocan la formación de enlaces metálicos muy fuertes y para que tenga lugar el movimiento resulta necesario la rotura de estos donde se origina la fricción y por ende el desgaste. El mismo se puede reconocer por la presencia de protuberancias, ondulaciones, transporte de metal blando al duro (generalmente), mala lubricación en movimiento por deslizamiento (Martínez, 2006).

Ocurre en todos los pares de rozamiento si las superficies no están separadas completamente por películas gruesas de lubricante. Se manifiesta el contacto metal-metal por mala lubricación o por ausencia de esta. Se explica por la teoría de la soldadura (aquí se presenta la capa formadora de rugosidades y se rompe por el material generalmente más blando). El proceso puede transitar desde la mejora de la fricción hasta el bloqueo del mecanismo, en función del material, la carga y la velocidad.

Aparece en cuerpos con movimiento relativo por deslizamiento, una de sus principales características es que el desgaste es rápido debido al contacto metal-metal.

Factores que influyen en el desgaste adhesivo:

Los materiales: a mayor tendencia de adhesión la intensidad del desgaste aumenta.

Lubricación: si es efectiva se logra disminuir la intensidad del desgaste.

- Acabado: con un mayor grado de perfección del acabado se logra disminuir la intensidad del desgaste ya que se eliminan las rugosidades.
- Dureza: al aumentar la dureza del par de rozamiento, se contrarresta el desprendimiento de partículas de sus superficies por la acción de la adhesión.

#### **1.2.1.2. Desgaste por fatiga superficial**

El desgaste por fatiga superficial, es el desprendimiento de material debido a la fatiga, producto de esfuerzos cíclicos de contacto entre 2 superficies en contacto que superan el límite de fatiga del material (Martínez, 2006; Nam, 1986).

Se caracteriza por la formación de cavidades o caries que aparecen en las superficies del par tribológico, típicas en:

- Las superficies en contacto con rodadura pura o con rodadura y deslizamiento.
- Trasmisiones dentadas, rodamientos, levas y seguidores.

Para que exista el desgaste por fatiga superficial es obligatorio la presencia de aceite, que al quedar atrapado dentro de las grietas de las superficies de contacto que quedan luego del maquinado definitivo, al recibir la presión ocasionada por la explotación normal del mecanismo en cuestión, este aceite transmite presión a las paredes de las grietas, variado así la geometría de estas, proceso que se repite continuamente hasta el deterioro completo de la pieza (por el desprendimiento periódico de material).

Cuanto mayor sea la viscosidad del aceite mayor será el límite de resistencia a la fatiga. El aceite de elevada viscosidad tiene mejor capacidad de amortiguar las cargas dinámicas y le es más difícil introducirse en las microgrietas (Castillo, 2006).

#### **1.2.2. Desgaste corrosivo-mecánico**

El desgaste corrosivo-mecánico es la combinación de la interacción de los materiales entre las superficies y el medio en que se encuentran. Ocurre cuando existe una fricción activa entre dos elementos provocando de forma ininterrumpida el desprendimiento de material y deformaciones.

La corrosión puede venir dada por la acción química o electroquímica del medio con las superficies en contacto, típico en:

- Grupo cilindro-pistón en los motores de combustión interna.

- Impelentes de bombas hidráulicas (cuando el fluido es corrosivo).
- Cojinetes de deslizamiento.

### 1.2.1.3. Desgaste corrosivo por fricción

Según Deuis (1988) el desgaste corrosivo por fricción ocurre entre superficies con movimiento oscilatorio de poca magnitud, como resultado de vibraciones, fricción y torsión que se producen de manera periódica. Al desarrollarse este movimiento relativo pequeño, entre los elementos, se introduce el oxígeno y provoca corrosión. El mismo se manifiesta generalmente en:

- Uniones por interferencia.
- Uniones por chaveta.
- Uniones roscadas.
- Cables con sus poleas.
- Conjunto leva-seguidor-pasador.

Factores que influyen en el desgaste corrosivo por fricción:

- El deslizamiento es una condición necesaria para que ocurra este tipo de desgaste, el que tiene que ser pequeño, ya que el *fretting* aparece en elementos que se supone que no tengan movimiento relativo.
- Frecuencia de oscilaciones:
  - A baja amplitud ( $10^{-4}$  cm.) no influye.
  - La intensidad del desgaste aumenta para frecuencias entre 50-60  $\text{min}^{-1}$ .
  - A altas frecuencias las superficies no tienen tiempo de oxidarse (período de tiempo de exposición es relativamente pequeño).
  - Si la frecuencia de oscilación disminuye, la intensidad del desgaste aumenta.

Es el desgaste producido por partículas abrasivas que se deslizan sobre la superficie metálica, produciendo desprendimiento de material, dislocaciones de cristales y ralladuras profundas. El mismo se pone de manifiesto en equipos agrícolas, de construcción y minería. También se observa en el equipamiento empleado en la preparación de las arenas de moldeo de fundición. En una estructura que determina la intensidad del desgaste por abrasión y depende de la forma, dureza y tamaño de los granos y partículas abrasivas (Kardec y Nascif, 2002; Neale, 2001).

La velocidad de desgaste depende del grado de penetración de las partículas abrasivas en la superficie y por lo tanto es función de la dureza superficial del material. La dureza, la tenacidad y sobre todo la rugosidad de esas partículas, acentúan la abrasión, mientras que la fragilidad de éstas atenúa su efecto.

Si la dureza del abrasivo es muy superior a la dureza de la superficie fraccionada, el desgaste es fuerte. Si por lo contrario es más blando la velocidad de desgaste es lenta. Se debe tener en cuenta que si la dureza de ambos es similar, el más leve cambio de una de ellas puede aumentar considerablemente el efecto.

Otros factores que afectan el desgaste abrasivo son la temperatura, las cargas que actúan sobre la superficie de trabajo, condiciones ambientales, tales como la humedad y el grado de compactación de las partículas. Se considera que todo desgaste abrasivo del material es un agrietamiento por fragilidad, como resultado de actos de deformación plástica y endurecimiento que se repiten cíclicamente (De la Torre, 2013).

El proceso de desgaste abrasivo en condiciones reales, se realiza siempre con la colaboración, no solamente de los granos abrasivos, sino también del medio exterior de una composición química controlada (en el caso del empleo de lubricante) o no controlada (en el caso de la acción de la atmósfera).

El metal deformado plásticamente, al reaccionar con el oxígeno contenido en la atmósfera, forma estructuras de capas secundarias, que se diferencian del metal original, por sus estructuras y propiedades de resistencia. La actuación de presiones produce la destrucción de esas capas, el fenómeno se conoce con el nombre de desgaste oxidante.

En el desgaste abrasivo influye sobre la dureza y la tenacidad del material y depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre partículas abrasivas y de la superficie del metal. Cuando los valores del coeficiente de fricción son elevadas, se favorece el proceso de microcorte, el que, según Budynas (2008), se puede clasificar en:

- Desgaste abrasivo de baja presión, que ocurre por deslizamiento de las partículas moviéndose libremente por la superficie y las tensiones actuantes son bajas y no exceden la resistencia a la rotura del abrasivo.
- Desgaste abrasivo por alta presión, cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies de carga y el desgaste no es solo por penetración, sino también por fractura de las partes

frágiles y por deformación plástica de la matriz. Este tipo de abrasión es característica de operaciones de trituración, pero también se presenta como efecto secundario en interacciones metal-metal.

- Desgaste abrasivo con impacto, involucra la remoción de material por la acción de un abrasivo, cuyas partículas son de un tamaño apreciable e impactan en la superficie bajo un ángulo determinado. La energía de impacto se transfiere al material y hace que dicho abrasivo produzca grandes surcos y ralladuras apreciables a simple vista. Este tipo de fenómeno es más frecuente en el transporte de minerales.

Es importante destacar que en la práctica el desgaste no se presenta en forma simple, sino que aparece combinado como:

- Impacto, abrasión y presión: en rodillos, cadenas y rodaje de tractores.
- Impacto, abrasión y temperatura: en martillos y cuchillas de cizalla.
- Impacto y presión: en martillos de pilón y machacadoras, quebradoras.
- Abrasión, erosión y corrosión: válvulas y asientos, tornillos sinfín.
- Fricción, corrosión y cavitación: impulsores, álabes de turbinas.

En este tipo de desgaste pueden observarse tres regímenes, en dependencia de las durezas de la dureza de los materiales interactuantes:

- Régimen débil: cuando la dureza del abrasivo es menor que la del metal.
- Régimen de transición: cuando la dureza del abrasivo es aproximadamente igual a la del metal.
- Régimen severo: cuando la dureza del abrasivo es mayor que la del metal.

Se ha demostrado experimental y teóricamente que la dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión (Rojas-Fernández, 2015).

La dependencia de la resistencia a la abrasión, de la composición química, dureza y microestructura, de un hierro fundido de alto cromo, ha sido demostrada por autores como Wirojanupatup (2000) y Zun-Gahr (1982), en estudios realizados, a diferentes tipos de hierros blancos aleados con 17,5 % de cromo, en los cuales se presentaban tres niveles, de contenido de carbono y aleadas, con otros elementos tales como: cobre (0,5 a 3,0 %), manganeso (0,75 a 3,0 %), molibdeno (0,5 a 3,0 %) y níquel (0,6 a 2,0 %). Todas las muestras fueron ensayadas tal y como se obtuvieron de la fundición. En este estudio se

demuestra que la dureza no es tan importante como la microestructura de la matriz, en el control de la resistencia a la abrasión de un hierro blanco. Se demostró también que contenidos de molibdeno combinados con níquel, cobre y manganeso, en cantidades superiores a lo normal, producen fundiciones con satisfactoria resistencia a la abrasión, aspecto relacionado con las microestructuras que se obtienen debido al efecto de los elementos de aleación.

La función primaria de las aleaciones, empleadas en sistemas donde predomina la abrasión metal-tierra, es aumentar la resistencia a la abrasión. Las aleaciones de abrasión de este tipo están constituidas por hierros blancos, con alto contenido de cromo, en la que los carburos que se forman, durante la solidificación de la aleación, les proporcionan las propiedades necesarias a la aplicación.

### **1.3. Materiales resistentes al desgaste**

Existen gran variedad de materiales resistentes al desgaste que son utilizados en la fabricación de piezas, expuestas a materiales altamente corrosivos y que trabajan bajo condiciones de esfuerzo.

#### **1.3.1. Hierro fundido aleado resistente al desgaste abrasivo**

En las especificaciones dadas por ASTM A 352, clasifican a los hierros de alta aleación en un grupo independiente y proponen entre ellos a: hierros blancos al cromo-níquel, son conocidos también como Ni-Hard (tipos del 1 al 4) y contienen contenidos de cromo bajos, (de 3 a 5 % de níquel y de 1 a 4 % de cromo, con una modificación en la que este se eleva de 7 a 11 %), hierros al cromo-molibdeno, que contienen de 11 a 23 % de cromo y hasta 3 % de molibdeno y adicionalmente se añaden níquel o cobre. Un tercer grupo de hierros blancos aleados, con elevado contenido de cromo (de 25 a 28 %), pueden ser aleados, además, con otros elementos (molibdeno y/o níquel hasta 1,5 %).

Los hierros blancos aleados (Martínez y Gordon, 1995), ofrecen una considerable versatilidad en sus propiedades, que lo hacen útil en aplicaciones donde es necesaria la resistencia a la abrasión. La composición de estos se selecciona para obtener una distribución determinada en los carburos y una matriz que brinden una vida de servicio elevada y bajos costos. Mientras las fundiciones de hierro blanco de baja aleación, con un contenido de elementos de aleación inferior a 4 %, desarrollan durezas entre HB 350 y 550, los hierros de elevada aleación alcanzan durezas entre HB 450 y 800. Los carburos en los

hierros blancos aleados presentan durezas del orden de HV 900 a 1 200 y las matrices martensíticas, con austenita residual, que llegan a durezas del orden de HV 600 a 700.

### **1.3.2. Hierros blancos al cromo-níquel**

El grupo más antiguo entre los hierros blancos de elevada aleación, con importancia industrial, es el aleado con cromo y níquel, o Ni-Hard, los cuales han sido producidos durante más de 50 años, con un costo muy efectivo para la molida y trituración de materiales abrasivos (Rojas-Fernández *et al.*).

En estos hierros blancos martensíticos, el níquel es elemento primario de aleación, el que en niveles entre 3 y 5 % es muy efectivo, para suprimir la transformación de la austenita en perlita, asegurando así que la estructura dura de la martensita (que usualmente contiene austenita retenida) se desarrolle durante el enfriamiento en los moldes. El cromo se incluye en estas aleaciones en niveles desde 1,4 a 4 %, para asegurar que se formen carburos durante la solidificación y contrarrestar el efecto grafitizante del níquel.

La composición óptima de un hierro blanco, aleado al cromo-níquel, depende de las propiedades requeridas para las condiciones de servicio y las dimensiones y peso de las piezas. La resistencia a la abrasión es una función de la dureza y del volumen de carburos en la microestructura. Cuando la resistencia a la abrasión es el principal requerimiento y la resistencia al impacto es el secundario, se recomienda el empleo de aleaciones de levado contenido de carbono (ASTM A 532 Clase I Tipo A Ni-Hard 2) porque presentan menos carburos y además, mayor resistencia. Un grado especial es el Clase J Tipo C, el cual se ha desarrollado para la producción de bolas para la trituración. Aquí la composición de níquel-cromo ha sido adaptada para fundiciones templadas y procesos especiales de fundición de piezas en arena (FUNCA, 2017).

La aleación Ni-Hard 4, Clase I tipo D, es una modificación de los hierros al cromo-níquel, la cual contiene niveles más elevados de cromo, que van desde 7 a 11 % y niveles superiores de níquel, que van desde 5 a 7 %. El carbono es variado, de acuerdo con las propiedades que se necesitan para el servicio previsto. Contenidos de carbono en el rango de 3,2 a 3,6 % se proponen cuando se desea un máximo en la resistencia a la abrasión. Cuando se espera una resistencia al impacto considerable el contenido de carbono se mantiene de 2,7 a 3,2 % (Martínez y Gordon, 1995).

El contenido de níquel se incrementa con el tamaño de la sección o el tiempo de enfriamiento de las piezas, para inhibir la transformación perlítica. En las fundiciones de 38 a 50 mm de espesor, el contenido de ese elemento se mantiene entre 3,4 y 4,2 %, para suprimir la misma durante el enfriamiento en el molde. Las secciones más gruesas requieren niveles de níquel hasta 5,5 % para evitar dicha transformación. Es importante limitar el contenido de níquel necesario para el control de la formación de perlita, pues el exceso de níquel eleva la austenita retenida y baja la dureza.

El silicio se necesita por dos razones, primera: una pequeña cantidad para garantizar la fluidez del metal fundido y producir escoria fluida, pero de igual manera es importante su efecto sobre la dureza, segunda: contenidos de silicio entre 1 y 1,5 %, elevan la densidad de la martensita y por tanto la dureza resultante. La modificación con 0,2 % de FeSi al 75 % es empleada para aumentar la resistencia del material. Contenidos superiores pueden promover la formación de perlita y requerir el incremento de níquel.

El cromo es añadido para suprimir el efecto grafitizante del níquel y el silicio en los tipos A, B y C, en rangos que van de 1,4 a 3,5 %. Elemento que se incrementa según aumenta la sección de las piezas. En el tipo D, el nivel de cromo alcanza valores entre 7 y 11 % (típicamente 9 %) con el propósito de producir carburos eutécticos de cromo del tipo  $M_7C_3$ , los cuales son más duros y deterioran menos la resistencia (Goyos *et. al.* 2012).

Con el manganeso mantenido entre el rango de 0,8 hasta 1,3 %, como máximo, aumenta la templabilidad, evita la formación de perlita, es más estabilizador de la austenita que el níquel y promueve grandes cantidades de austenita retenida y menos dureza como fundición. Por esta razón porcentos superiores de manganeso no son deseadas. Cuando se considere el contenido de níquel requerido para evitar la perlita en una fundición dada, el nivel de dicho manganeso presente tiene que ser un factor a considerar.

El cobre incrementa la templabilidad y la austenita retenida, por lo que su cantidad debe ser controlada al igual que la del manganeso. El mismo debe ser tratado como un sustituto del níquel e incluido en los cálculos para la cantidad de níquel requerido para inhibir la formación de perlita, reduce la cantidad de níquel requerido (Martínez y Gordon, 1995). El molibdeno es un potente agente para aumentar la templabilidad en las aleaciones y es usado en secciones gruesas también para e inhibir la formación de perlita.

### **1.3.3. Hierros blancos con elevado contenido de cromo**

Los hierros blancos, con elevado cromo, tienen una excelente resistencia a la abrasión y son usados efectivamente en bombas de lodo, moldes de ladrillos, molinos de carbón y equipos de *sand blasting*, también se aplica en la transportación, molienda y trituración de minerales. En algunas aplicaciones, de este tipo de hierro, las piezas deben soportar cargas de impacto. Son reconocidos, además como los de mayor combinación de resistencia y resistencia a la abrasión entre los hierros blancos aleados.

Según (Martínez y Gordon, 1995), en los hierros aleados con elevado contenido de cromo, como en los materiales resistentes a la abrasión coexisten la tenacidad de la matriz y la resistencia al desgaste. Si se varía la composición química y se le aplica tratamiento térmico, se pueden ajustar las propiedades para alcanzar las necesidades, de la mayoría de las aplicaciones, donde se precise de resistencia a la abrasión.

Ese propio autor expresa que el hierro aleado al cromo-molibdeno (clase II), con contenidos entre 11 y 23 % de cromo y hasta 3,5 % de molibdeno, puede mostrar una matriz austenítica o austenito-martensítica. También con tratamiento térmico se puede obtener una matriz martensítica con una máxima resistencia a la abrasión y tenacidad. Son considerados los hierros blancos aleados más duros. Comparados con los hierros aleados al cromo-níquel, los carburos eutécticos son más duros y pueden ser tratados térmicamente para obtener fundiciones de mayor dureza. El molibdeno, como el níquel y el cobre, cuando son necesarios, se añaden para prevenir la formación de perlita y asegurar una dureza máxima.

Los hierros de alto contenido de cromo (Clase III) representan el más viejo de los grados de hierro de alto contenido de ese elemento, las patentes más antiguas datan del 1917, según señala Pero-Sanz (2000), estos hierros son también conocidos como 25 % Cr y 28 % Cr y contienen hasta 1,5 % de molibdeno. El mismo se añade para prevenir la formación de perlita y obtener la máxima dureza, excepto en las secciones finas. Aleado con cobre hasta 1 % también es usual. Aunque la dureza obtenida no es tan elevada como en la clase II, de los hierros blancos, aleados con cromo y molibdeno. Estas aleaciones se seleccionan cuando se desea también resistencia a la corrosión.

### **1.3.4. Hierros blancos con alto cromo modificados con molibdeno**

La ASTM A532 (2013) establece las especificaciones en la clase II para hierros con alto cromo, modificados con molibdeno. Estas aleaciones muestran una combinación de la

resistencia a la abrasión y resistencia, que no se obtienen en otros hierros blancos. Su uso se extiende exitosamente por la industria minera.

Los tipos B y C poseen contenidos de cromo inferiores (14 a 18 %) y el molibdeno se eleva hasta 3 %.

La Clase II tipos D y E son hierros blancos resistentes a la abrasión con un contenido de cromo de 20 %, de 1 a 2 % de molibdeno, 1 % de níquel o cobre, los cuales se añaden para adecuar la templabilidad en las secciones más gruesas.

La matriz de los hierros blancos aleados con alto cromo y molibdeno es austenítica (510-520 HV10). La adición de cobre o níquel impide la transformación perlítica, aun con altos contenidos de carbono (Sebon, 2018). Con el tratamiento térmico la dureza de la matriz se incrementa hasta cerca de HV 800, debido a que hay presencia masiva de martensita con alguna densidad de austenita retenida.

#### **1.4. Propiedades de los aceros tipo Hadfield**

Los aceros austeníticos al manganeso, también llamados aceros Hadfield, son aleaciones no magnéticas extremadamente tenaces, en la cual la transformación martensítica, de endurecimiento, ha sido suprimida por una combinación de alto contenido de Mn y C y la precipitación de carburos por una rápida velocidad de enfriamiento desde alta temperatura. Estos aceros están caracterizados por sus propiedades mecánicas como: alta resistencia (a la tracción y compresión), alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste; bajo la forma de piezas coladas o planchas laminadas. Su aplicación es en operaciones que combinan abrasión e impacto pesado. Su composición nominal es de 1,2 % C y 12 a 13 % Mn como elementos esenciales. Las aleaciones comerciales usualmente varían en el rango de 1,0 a 1,4 % C y 10 a 14 % Mn, como lo establece la norma ASTM A128 (2013) y algunas otras especificaciones, en las cuales no se especifica el nitrógeno. Este último elemento, hasta hace unas décadas, era sólo considerado como perjudicial para los aceros al mismo nivel que el hidrógeno y oxígeno (Belzunce, 2001).

La dureza de esa aleación es de alrededor de HB 200, después de un tratamiento térmico, establecido en la norma antes mencionada, la cual aumentará tan rápidamente por deformación, por lo que los aceros austenítico al manganeso deben ser evaluados sobre una base distinta. Estos aceros exceden, aún, a los aceros austeníticos inoxidable en su endurecimiento por deformación. La máxima dureza obtenida en la práctica es alrededor de

HB 500. Se ha reportado que la dureza sobre la superficie de desgaste de un cruce de vía férrea después de servicio ha variado de HB 495 a 535.

## **Conclusiones del Capítulo**

1. La bibliografía consultada no muestra las regularidades del comportamiento microestructural ni de dureza, del acero Hadfield sometido a regímenes de desgaste abrasivo, con agentes agresivos en medio acuoso.
2. Los aceros al alto manganeso deben estar sometidos a tratamientos de endurecimiento, volumétrico o superficial, para trabajar en condiciones de desgaste.

## CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

Las investigaciones del proceso de desgaste y deterioro de piezas, se estudian, en la actualidad, con diferentes métodos, que se sustentan en ensayos y experimentos característicos de la rama de la Ingeniería de los Materiales, la que constituye una valiosa herramienta para la verificación de hipótesis, el tratamiento de aleaciones y la solución a problemas relacionados con la pérdida de capacidad de trabajo de elementos de máquinas.

El **objetivo** de este capítulo es establecer los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para determinar el comportamiento microestructural y la dureza, que permitan identificar la resistencia al desgaste de las aleaciones estudiadas.

### 2.2. Materiales disponibles para la investigación

Las aleaciones del material estudiado son fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel y luego puestas en explotación, en las industrias del procesamiento de las menas lateríticas. Su composición química, según las normas *American Iron and Steel Institute* (AISI) y la *Society of Automotive Engineers* (SAE), deben ser verificadas.

#### 2.2.1. Material de las paletas fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel

Fue necesario determinar la composición química de las muestras, para compararla con los estándares, en el material analizado, lo que tiene como finalidad descartar las posibles variaciones de la misma, de manera que no fuera ese el elemento que influye en el desgaste prematuro que experimentan las piezas.

El acero Hadfield, dentro de ellos el A 128 (ver tabla 2.1), es el único que combina alta resistencia y ductilidad con gran capacidad de endurecimiento por deformación y, usualmente, buena resistencia al desgaste para la fabricación de piezas sometidas a elevadas condiciones de trabajo.

Tabla 2.1. Composición química estándar del ASTM A 128. Fuente: Aceros SISA (2013)

Material	% C	% Mn	% Cr	% Fe
Gx 120 MnCr 12,2	1,00 – 1,40	10,00 – 14,00	2,00	Resto

### 2.3. Preparación de muestras

Se tomaron 3 muestras (figura 2.1), dos de piezas averiadas y una de piezas nuevas, incluidas las de mayor durabilidad, lo que permitió comparar el comportamiento del material en ambos casos.

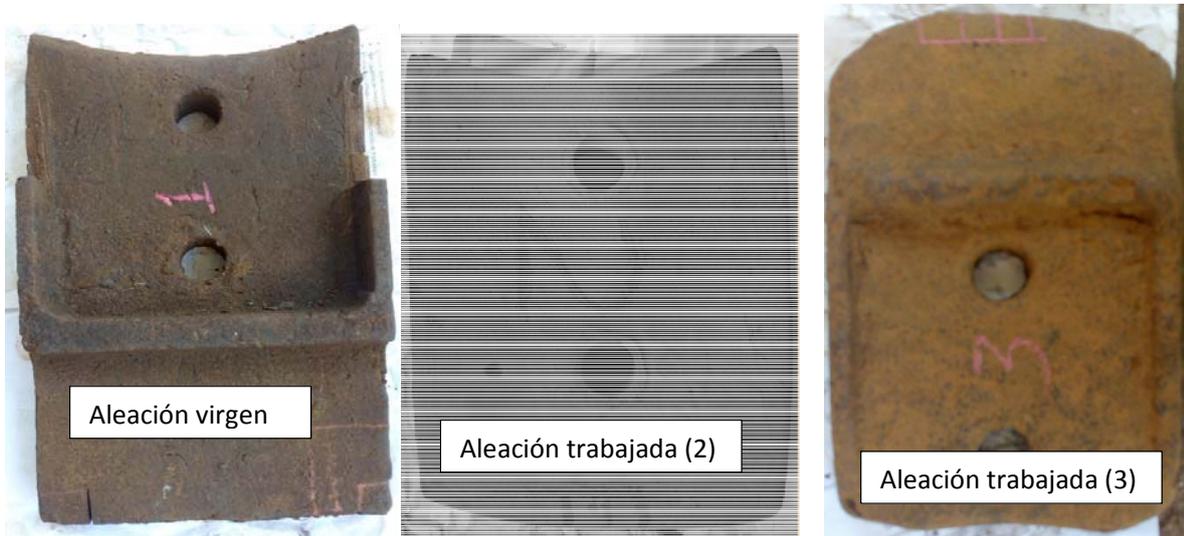


Figura 2.1. Muestra de la aleaciones

Las probetas se cortaron (figuras 2.2 y 2.3), con el empleo de un disco de corte, durante el trabajo se refrigeró constantemente la pieza para evitar el calentamiento por efecto de la fricción, debido a que la temperatura, producida por el roce, puede alterar radicalmente la estructura original, por lo menos en la superficie obtenida (Sturla, 1951), se encapsularon para el mejor el manejo de las mismas y luego se marcaron para su posterior identificación durante la investigación.



Figura 2.2. Muestras de la aleación sin trabajar



Figura 2.3. Muestras de la aleación fuera de servicio

### **2.3.1. Preparación mecánica de las probetas**

Se realizaron las operaciones de preparación y limpieza en el laboratorio de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, para lo que se siguió una secuencia determinada. Puesto que es necesario validar la hipótesis planteada, se procedió a tomar las muestras necesarias como parte de la experimentación. Con la intención de lograr superficies planas con la menor deformación posible, las muestras se limpiaron en toda la superficie y se cortan en una máquina de corte de tipo CM 260 (marca Echo RD), la que envía a la zona de corte cinco chorros de líquido refrigerante que garantizan una buena lubricación, ello evitará el excesivo calentamiento y por ende transformaciones microestructurales en las superficies de contacto lo que genera ruidos en los resultados de la investigación.

### **2.3.2. Preparación de las muestras para la observación microestructural**

Antes de las operaciones de desbaste y pulido, fue necesario montar las muestras en un soporte, que permitiera trabajar con las mismas sin que el operario se dañara las manos y tampoco aparecieran superficies no deseadas, que distorsionan la imagen en el microscopio, para lo que se les hizo un encapsulado (ver figuras 2.4 y 2.5). Esta operación se realiza por medio de una máquina marca Echo RD, de tipo MP 350 A. Se empleó resina fenólica de color negro, con una temperatura de fusión de 150-170°C, la que permaneció durante un tiempo de 6-8 minutos, luego fueron enfriadas en el molde.



Figura 2.4. Muestras encapsuladas de la aleación sin trabajar

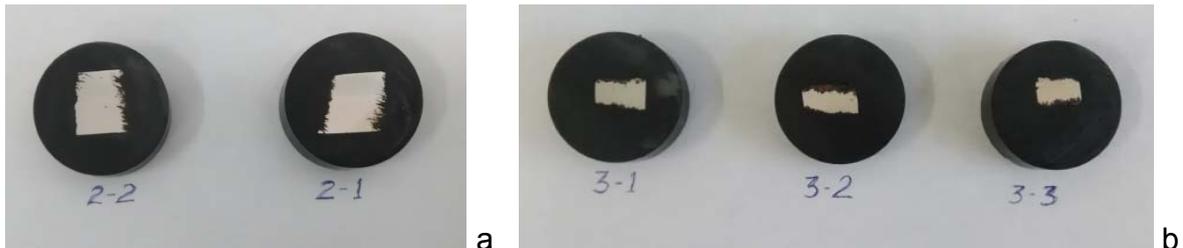


Figura 2.5. Muestras encapsuladas de las aleaciones fuera de servicio

### 2.3.3. Desbaste y pulido

Una vez tenidas las muestras en el contenedor fenólico se pasó al desbaste, el que a grandes rasgos consistió en obtener, primeramente, una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El mencionado pulido se realizó con los papeles abrasivos, garantizando una variación de la granulometría escalonada desde la más gruesa hasta la más fina.

### 2.3.4. Lijado grueso y fino

Para un mejor acabado en la superficie de las probetas se realiza el lijado con papeles abrasivos, de diferentes tamaños de grano, desde la más gruesa, de grano 120, hasta la más fina de grano 1200. Con el lijado grueso se redondearon los ángulos que podrían provocar la rotura del papel esmeril o del paño durante el pulido. Las primeras etapas de lijado se realizaron con papel de lija con tamaño de granos 120 y 240 respectivamente, para obtener una superficie plana, libre de distorsión o huellas producto del corte y además lograr que todas las marcas del lijado sigan una misma dirección, garantizando 90° uno de otro.

El lijado fino se realizó de manera semejante al anterior, con la diferencia que esta vez el proceso se inició con lija de granos 320, pasando por 600, 800 y finalmente de 1200. Cada vez que se cambió de lija se operó de la forma descrita anteriormente, a fin de obtener nuevas rayas perpendiculares a las anteriores. Una vez lijadas las probetas fueron pulidas,

con el empleo de discos de fieltro y una solución de alúmina, que permitió llevarlas hasta un “brillo de espejo”. Finalmente se lavaron con agua destilada, se secaron con papel de filtro para evitar interacciones de la suciedad con el reactivo de ataque.

### 2.3.5. Ataque de las muestras para su examen microscópico

El ataque químico de las probetas depende del material de las mismas, se hace con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido, dicho ataque se realiza por medio de técnica manual por inmersión durante unos 15 segundos. Una vez atacadas, se limpian nuevamente con agua destilada, se sumergen en alcohol etílico durante unos segundos y finalmente se secan, lo que elimina las impurezas y la humedad.

El reactivo a utilizar es el Nital, compuesto por una solución de 5 mL de ácido nítrico y 95 mL de alcohol etílico, recomendado por ASM Handbook (1992) para aceros al carbono, aceros aleados y fundición gris. Esa sustancia oscurece la perlita y da contraste entre sus colonias por lo que revela sus fronteras, además diferencia la ferrita de la martensita y aumenta la rapidez del ataque.

### 2.4. Determinación de la dureza

Para la medición de la dureza se limpiaron y pulieron las superficies de las muestras a medir. Las mencionadas mediciones fueron realizadas con un durómetro Vickers (ver figura 2.6), para lo que se empleó una carga de 100 kgf/mm<sup>2</sup> (10,19 MPa) para el material analizado, el citado durómetro posee un indentador, con punta de diamante, que posibilita realizar una huella a una profundidad determinada y con ello conocer la dureza del mismo.

Se necesita comprobar la dureza de las muestras y compararla con la que debe poseer el material, según las exigencias de diseño (HRC 55-60), con ello se podrá determinar si la aleación analizada tiene la resistencia necesaria para soportar las condiciones altamente erosivas a las que es expuesta.



Figura 2.6. Colocación de las muestras en el durómetro

## 2.5. Caracterización microestructural

El análisis microestructural consistió en la observación de las muestras del material de la pieza sin usar y la que se encuentra fuera de servicio. Esta se empleará para establecer el comportamiento de la fundición, así como sus fases y tamaño del grano, en las zonas que están directamente en contacto con los materiales altamente erosivos y las que no con el fin de determinar las causas que provocan el desgaste en las piezas fabricadas con este material.

En la figuras 2.7 se muestran las piezas a ser analizadas, con las zonas de donde se cortaron para su preparación y posterior análisis.

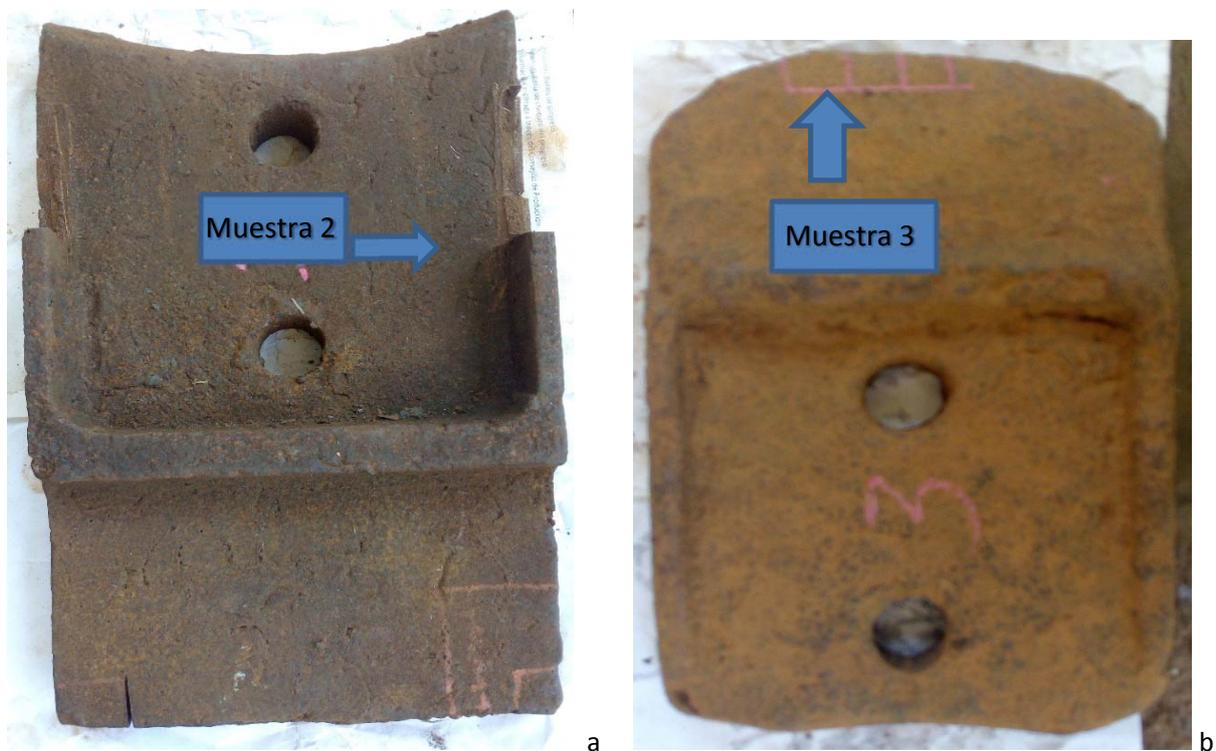


Figura 2.7. Zona de toma de muestras. a: pieza sin usar; b: pieza retirada de servicio

## 2.6. Determinación del tamaño de los granos de la microestructura

Los cristales de los metales tienen por lo general pequeñas dimensiones. Los objetos metálicos están formados por un número muy grande de estos. En el microscopio Echo RD se obtuvieron las microestructuras, a través de una cámara fotográfica se tomaron fotos de las mismas para todas las aleaciones analizadas, a través de un programa de computo se

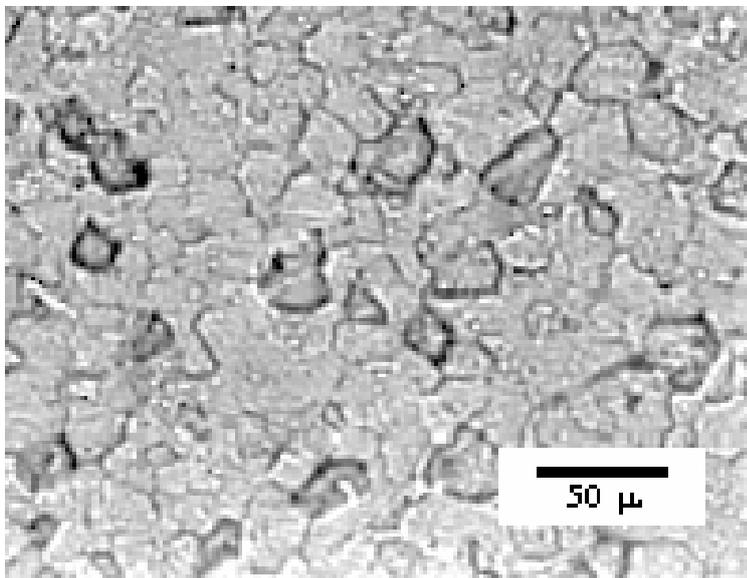
midieron los tamaños predominantes de los granos, los que dan una medida de la dureza del material y de los microconstituyentes presentes.

## 2.7. Identificación de transformaciones de fase en la aleación del tipo Hadfield

Las transformaciones de fase, en las aleaciones al alto manganeso, por lo general, son resultado de los tratamientos térmicos, que tienen como finalidad optimizar las propiedades del material, si bien el efecto endurecedor de la fase martensítica obtenida, garantiza resistencia al desgaste también fragiliza el material.

Para la realización de los tratamientos térmicos y de acuerdo con la composición química de la aleación, han de ser introducidas diferentes muestras en un horno destinado a tal efecto, manteniéndolas a temperaturas superiores a la crítica (desde los 850 hasta los 1100 °C), con tiempos de permanencia 120 y 240 minutos. Posteriormente, las muestras deben ser sumergidas en un baño de aceite a temperatura ambiente.

El material sin tratar presenta, como consecuencia del recocido de recristalización que ha experimentado después del proceso de fundición, una estructura formada totalmente por granos equiaxiales de fase  $\alpha$  (figura 2.8), con una dureza inferior a los HRC 20.



## 2.8. Granos equiaxiales de la estructura austenítica

Después de 120 minutos de mantenimiento de la temperatura en la aleación se observará una estructura bien definida de fase  $\alpha$ . Por otra parte el calentamiento, a elevadas temperaturas, con un tiempo de permanencia de 120 minutos provoca un ligero aumento

del tamaño de grano, elemento que evidencia poca dureza.

Las zonas más oscuras, de la micrografía, corresponden con el borde de los granos y a los que migran los MxC, la cual se ha disuelto de forma selectiva en el ataque con el reactivo utilizado para revelar la microestructura del material. La observación microscópica de las regiones adyacentes a los granos de fase  $\alpha$ , técnica que no requiere de un ataque químico previo, denota claramente la microestructura austenítica de dichas zonas (figura 2.9).

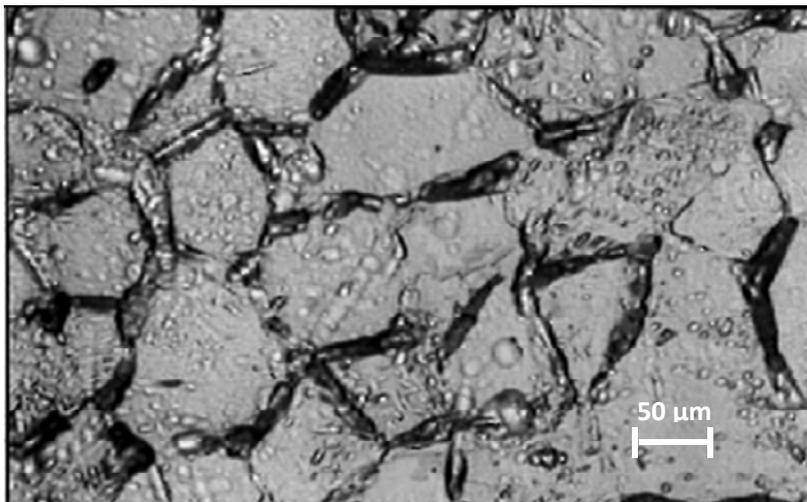


Figura 2.9. Muestra calentada hasta 950 °C, durante 150 minutos

En las micrografías 2.10 se observa cómo la formación de la fase  $\beta$  original se produce con un crecimiento de tipo acicular; dicha fase solo es estable a altas temperaturas y se transforma al realizarse el tratamiento de temple, que posibilita la aparición de la fase martensítica, la que evidencia la presencia de elevada dureza en las aleaciones, originadas por el proceso de temple, con dos estructuras cristalinas diferentes en función de la temperatura, implica la existencia de una transformación alotrópica. La transformación, con enfriamiento brusco, presenta las características específicas de la citada transformación martensítica. A esas temperaturas los procesos de difusión son relativamente lentos y se producen muchos núcleos de fase  $\alpha$ , que crecen lentamente. Se requieren tiempos de tratamiento entre 150 y 300 minutos para que aparezca un número significativo de agujas de dicha fase.

En la micrografía obtenida, después del temple, las agujas se transformarán en una placa casi única de martensita, notándose la transformación de fase en forma acicular, lo que

provocará la formación de dislocaciones en la fase  $\alpha$ , como consecuencia de la tensión generada en la punta de las agujas. Estas tensiones pueden haberse provocado o bien en la nucleación de la fase  $\gamma$ , o bien en el posterior tratamiento de temple como consecuencia de la formación de la fase martensítica.



Figura 2.10. Presencia masiva de martensita en acero Hadfield. Fuente Pérez, 1996

En la figura 2.11 puede apreciarse cómo la nucleación de dicha fase se produce con un crecimiento del tipo Widmanstätten, originándose, tanto en las fronteras de grano, como dentro de los mismos de fase  $\alpha$ , se observarán tres direcciones predominantes de crecimiento, las que pueden corresponder a los planos prismáticos de la estructura cristalográfica de la fase  $\alpha$  original, con nucleación de la fase martensítica.

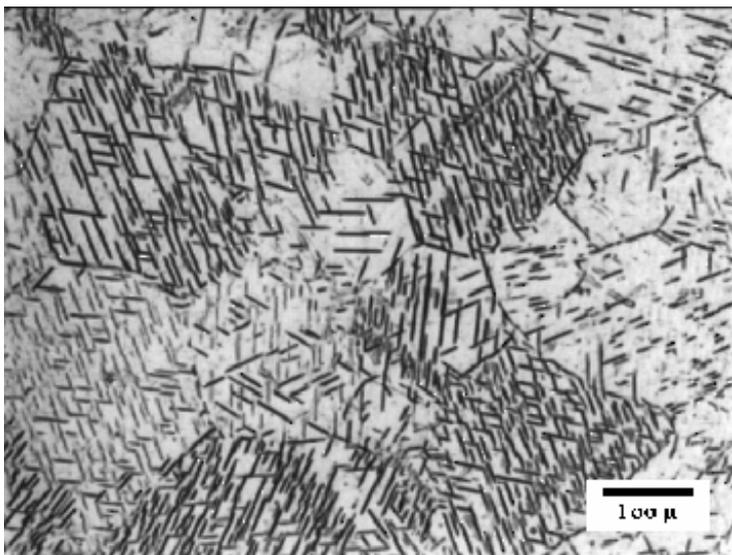


Figura 2.11 Agujas de martensita, con calentamiento de 1000 °C y enfriamiento en aceite. Fuente Pérez, 1996

## 2.8. Cálculo del volumen de la aleación

Es necesario determinar el volumen, de la mezcla de agentes erosivos en el medio acuoso, para una sección de árbol con el objetivo de determinar la carga que actúa sobre cada una de las piezas:

$$V = \frac{V_e - V_i}{4}; m^3 \quad (2.1)$$

$V_e$ .- volumen exterior:

$$V_e = \pi \cdot r_e^2 \cdot h \quad (2.2)$$

$V_i$ .- volumen interior:

$$V_i = \pi \cdot r_i^2 \cdot h \quad (2.3)$$

### 2.8.1. Determinación del peso del árbol

El peso del árbol depende del volumen que posee la masa del mismo y del peso específico del material del que está construido:

$$G = V \cdot \gamma; \text{kgf} \quad (24)$$

$\gamma$ : densidad del acero empleado en la fabricación del árbol; kgf/m<sup>3</sup>

$V$ : volumen del eje; m<sup>3</sup>, para los árboles huecos:

$$V = \left( \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right) \cdot l \quad (2.5)$$

Con:

$d_1$ : diámetro exterior del eje; m

$d_2$ : diámetro interior del eje; m

$l$ : longitud del eje; m

Peso de trabajo del eje:

$$G = G_1 - G_2; \text{kg} \quad (2.6)$$

$G_1$ : suma del peso del eje, paletas y soportes; kgf

$G_2$ : peso que pierde el eje sumergido en el agua; kgf

Se determina la presión que actúa (Budynas y Nisbett, 2008) en el área de trabajo de las piezas:

$$P = \frac{G}{A} ; \text{MPa} \quad \dots \quad (2.7)$$

G.- peso; N

A.- área;  $\text{m}^2$

## **2.9. Comprobación de la resistencia por el método de elementos finitos**

El método de elementos finitos es un proceso de aproximación de problemas continuos de tal forma que el continuo se divide en un número finito de partes, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

### **2.9.1. Trabajo con programas de elementos finitos**

Etapa de preprocesamiento: se prepara el modelo para el cálculo. En él se realizan las operaciones de dibujo del modelo, selección del tipo de elemento o elementos a emplear y de los materiales, asignación de elementos y propiedades de materiales a las diferentes componentes del modelo y la aplicación de las cargas exteriores.

Etapa de cálculos: es la parte del programa que realiza todo el cálculo y genera las soluciones. En esta parte se selecciona el tipo de cálculo a realizar, configuración de los parámetros de cálculo y el inicio de este.

Post-procesamiento: herramienta que permite la representación gráfica de los resultados así como las soluciones indirectas que se puedan obtener operando las soluciones del modelo.

En la figura 2.12 se muestra una sección de una pieza, con las condiciones de frontera y cargas que actúan sobre la misma, se consideró que hay una presión debido a la interacción con el fluido y los materiales abrasivos en la superficie, la que conduce al desgaste, también

el método permite verificar si las tensiones que actúan toman valores peligrosos, que pudiera presumir la pérdida de resistencia mecánica de la aleación analizada.

Se realizó el correspondiente mallado (ver figura 2.13), con elementos tetraédricos de nodos intermedios, con una fineza que posibilitara la mencionada modelación, sin que se comprometieran los resultados, de acuerdo a los recursos de cómputos disponibles, lo que permitirá realizar el estudio de las tensiones, los desplazamientos, así como el coeficiente de seguridad, con una precisión adecuada.

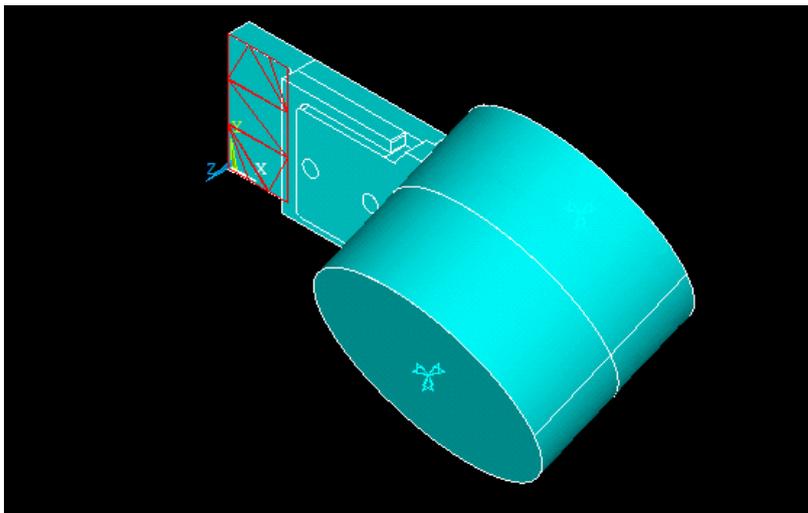


Figura 2.12. Condiciones de frontera y cargas actuantes sobre el conjunto árbol-paleta

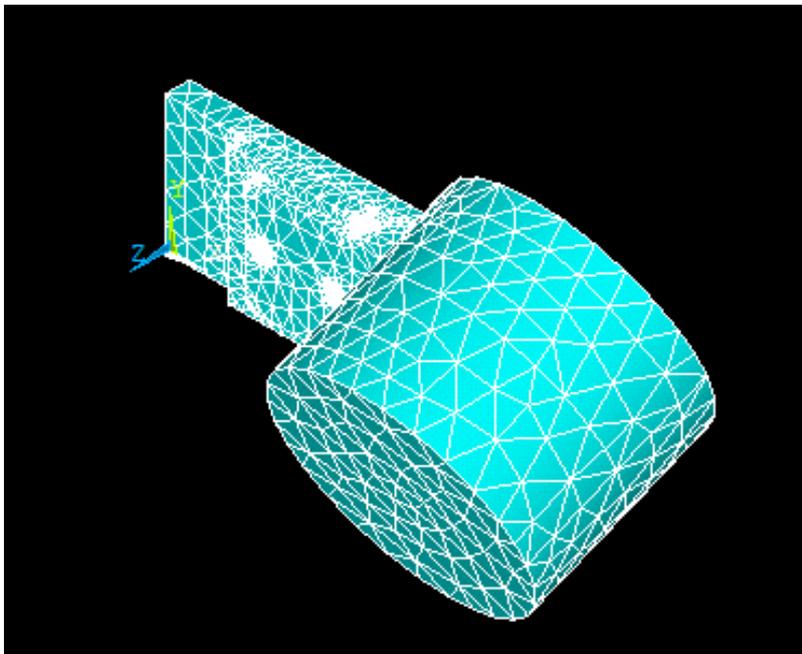


Figura 2.13. Sección mallada del conjunto árbol

## 2.10. Determinación del desgaste producido en el material

En la práctica industrial los elementos de máquinas pueden presentar características dinámicas diferentes debido al tipo de unión, condiciones del medio y tipo de desgaste. El esquema más sencillo es el lineal, en este caso el desgaste con relación al tiempo de trabajo se determina (Álvarez, 1995):

$$W = K \cdot t \quad (2.8)$$

Donde:

$W$ : Desgaste lineal por fatiga; mm

$t$ : Tiempo de trabajo; h

En el desgaste para cada material existe una cierta relación entre la dureza del material abrasivo y la del material desgastado por encima de la cual, el desgaste alcanza un valor estable y es independiente de un posterior incremento de esta relación. Márquez (2002) halló que esta relación en los aceros es de 0,6. Hasta este valor se observa una dependencia lineal entre el aumento de la dureza del abrasivo y el desgaste, que sufre la superficie del material desgastado.

$$k = \frac{H_a}{H_g} \leq 0.6 \quad (2.9)$$

Siendo:

$K$ : coeficiente del desgaste

$H_a$ : dureza del material abrasivo; mm

$H_g$ : dureza del material desgastado; mm

Conociendo el desgaste lineal se determina la intensidad lineal del desgaste.

Con:

$$W_h = h$$

$W_h$ : desgaste lineal; [ $\mu m$  o mm]

$I_h$ : intensidad lineal del desgaste; mm

$$I_h = \frac{W_h}{S_f} \quad (2.10)$$

$S_f$  : recorrido de fricción (mm<sup>2</sup>)

h: espesor del material desgastado;  $\mu m$  o mm

El desgaste volumétrico se fundamenta en la medición del volumen antes y después del proceso. Es también usado con frecuencia y al indicador anterior requiere de medios de medición de alta precisión. Este generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste.

$$W_V = W_h \cdot A_n \quad (2.11)$$

La Intensidad volumétrica del desgaste se mide cuando la relación que existe entre el desgaste volumétrico, el área nominal y el recorrido de la fricción se conoce.

$$I_V = \frac{V}{S_f \cdot A_n} \quad (2.12)$$

Donde:

$I_v$  : intensidad volumétrica del desgaste; mm

V : volumen del material desgastado; mm<sup>3</sup>

$A_n$  : área de fricción nominal; mm<sup>2</sup>

La velocidad o razón de desgaste se mide el ritmo del proceso y es la relación que existe entre el desgaste y el tiempo en que ha tenido lugar.

$$W^I = \frac{Wh}{t} \quad (2.13)$$

$W^I$  : elocidad o razón del desgaste; mm/hr.

La existencia del microcorte se puede determinar por las siguientes recomendaciones que depende del grado de penetración de las asperezas o partículas abrasivas:

$$D_p = R \left( \frac{\pi \cdot HV}{2 F_n} \right)^{0.5} - \left( \frac{\pi \cdot HV}{2 F_n} R^2 - 1 \right)^{0.5} \quad (2.14)$$

Siendo:

Dp: grado de penetración;  $\mu m$  o mm

HV: dureza del material más blando; kg/ mm<sup>2</sup>

R: radio de la aspereza o abrasivo; μm o mm

El microcorte se produce cuando el grado de penetración  $D_p > 0,27 \mu\text{m}$ :

$$0,10 < D_p < 0,27$$

$D_p = 0,09$  deformación plástica por rayado.

## **Conclusiones del Capítulo**

1. Se definió la metodología para la preparación de las probetas, de acuerdo con las normas, para evitar alteraciones en los ensayos a realizar.
2. Se establecieron los métodos y procedimientos para la realización de los ensayos, que posibilitarán determinar el comportamiento microestructural, así como las causas de la pérdida de resistencia al desgaste de la aleación del tipo Hadfield.
3. La propuesta de análisis, con el método de los elementos finitos, posibilitará identificar si hay pérdida de resistencia mecánica del material, para enfrentar el trabajo a la que está destinado

## CAPITULO III: RESULTADOS Y SU VALORACIÓN

### 3.1. Introducción

El establecimiento de los criterios que respaldan las teorías y la veracidad de la hipótesis planteada, como resultado del procesamiento y análisis de la información obtenida a través del desarrollo de los experimentos y ensayos, son de vital importancia para llegar a conclusiones acertadas.

**Objetivo:** realizar el análisis y valoración de los resultados y a través de ello, explicar los fundamentos que permitan proponer soluciones para reducir el desgaste que se produce en las piezas, de acuerdo con la interpretación de las regularidades observadas.

### 3.2. Determinación de la dureza de las muestras

Como se explicó en epígrafe 2.4 del capítulo 2, se aplicó el procedimiento descrito para la determinación de la dureza de las muestras, las mediciones se replicaron 3 veces cada una, separadas a una distancia de 1 cm, ello permitió calcular los valores medios de la misma, como se observa en la tabla 3.1. Para las muestras sin trabajar, la dureza no sobrepasó los HRC 28, lo que evidencia que no hay presencia de estructuras capaces de soportar el desgaste, cuando son sometidas a ambientes erosivos.

La dureza promedio del material de las probetas retiradas del proceso fue de HRC < 20, valor demasiado bajo recomendado para enfrentar las condiciones severas del desgaste a la que están sometidas las piezas.

Tabla 3.1. Dureza del acero Hadfield para las muestras tomadas

Muestras	Probeta	Dureza (HRC)	Dureza promedio(HRC)
1	1.1	< 20	< 20
	1.2	21,7	
	1.3	< 20	
	1.4	< 20	
2	2.1	25,7	< 20
	2.2	< 20	
	2.3	< 20	
3	3.1	< 20	< 20
	3.2	< 20	
	3.3	< 20	
	3.4	25,2	

Como se evidencia, la dureza promedio de la aleación, para ninguno de los casos, tanto las muestras de materiales sin trabajar como las retiradas del proceso, fue superior a los HRC 20, valor demasiado bajo, que no cumple con lo recomendado para enfrentar las condiciones severas del desgaste a la que están sometidas las piezas, las que debían poseer según las exigencias de diseño durezas entre HRC 55 – 60.

### 3.3. Composición química de las probetas

En la tabla 3.2 se expone el resultado de la composición química de la muestra 1, la misma tiene un 0,934 % de carbono, el cual se encuentra por debajo del que presenta el acero Hadfield, el porcentaje de manganeso está dentro del rango de la composición estándar y el contenido de Cr es mucho menor que el 2 %, establecido para la misma. Aunque el Mo aparece en dicha composición química, no influye de manera significativa en los cambios de fase que presenta la microestructura de la aleación sin trabajar.

Tabla 3.2. Composición química de la muestra 1

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Fe
0,934	0,094	12,97	0,034	0,188	Balance

Para las aleaciones seleccionadas de piezas trabajadas, retiradas de servicio, también se determinó la composición química de las mismas que se muestran en las tablas 3.3 y 3.4. En el caso de la muestra 2 el porcentaje de carbono y manganeso se encuentran dentro del rango que tiene el acero ASTM A 128, mientras que el cromo, como en la muestra 1, se encuentra por debajo de lo establecido en la aleación estándar, al igual que el porcentaje de carbono y cromo de la muestra 3, mientras que el manganeso está dentro del rango definido para el acero del tipo Hadfield.

Tabla 3.3. Composición química de la muestra 2

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Ni	% Fe
1,040	0,527	12,130	0,034	0,001	0,053	Balance

Tabla 3.4. Composición química de la muestra 3

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Ni	% Fe
0,989	0,686	12,100	0,075	0,001	0,134	Balance

Se observa que el porcentaje de manganeso, obtenido en las probetas, para las tres muestras, se encuentra dentro del rango de 10 -14 %, que es el establecido para la aleación ASTM A 128, sin embargo el contenido de cromo es muy bajo, por lo que puede decirse que el material utilizado para la realización de estas piezas carece del contenido necesario para el acero tipo Hadfield.

### 3.3.1. Caracterización microestructural de las piezas fundidas no trabajadas

La muestra que se observa, en la figura 3.1, es una fundición del acero al manganeso cercanas al tipo Hadfield, de colada en bruto y sin estar expuesta a ningún trabajo, con una composición química de 1,4 % de carbono y de un 13 % de manganeso aproximadamente, composición establecida por la norma ASTM A 128. La microestructura está basada en una matriz austenítica, con carburos precipitados y pequeñas colonias de perlita, lo cual es el resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita, durante el enfriamiento. Dichos carburos han nucleado en los límites de grano y en las áreas interdendríticas dentro de los granos de austenita. Los mismos no tienen carácter masivo y presumiblemente sean del tipo  $M_xC$ .

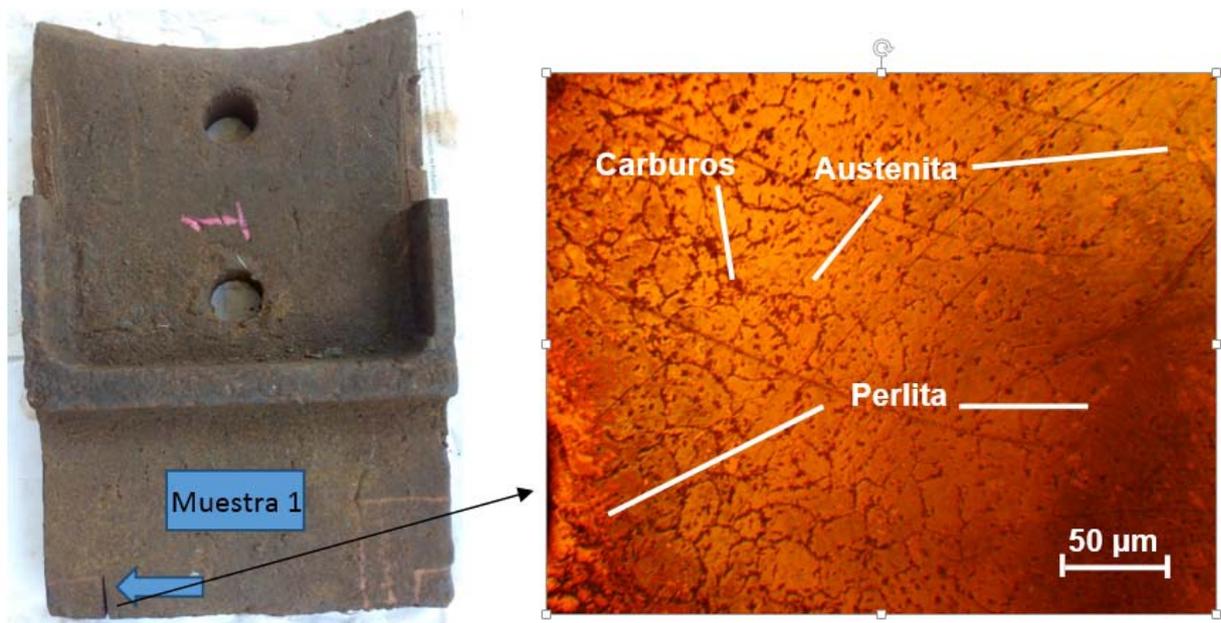


Figura 3.1. Microestructura de la muestra de la pieza sin usar

Las propiedades mecánicas de los aceros austeníticos se ven modificadas, tanto por el contenido en manganeso como por el contenido en carbono. Según aumenta el carbono de

la aleación, se hace más difícil su retención en solución, lo cual implica que la resistencia a tracción no aumente y la ductilidad disminuya. Por el contrario, la resistencia al desgaste se incrementa cuando lo hace el porcentaje de carbono, por lo que las cantidades de este elemento que se emplean, frecuentemente, no son las óptimas en cuanto a características mecánicas, sacrificando, en parte, la resistencia a tracción y la ductilidad a favor de la respuesta frente al desgaste. Contenidos superiores a 1,4 % de carbono se utilizan con poca frecuencia, puesto que es complicado obtener, con esa composición, una estructura austenítica libre de carburos precipitados en el borde del grano, lo que también influye en el descenso de resistencia y ductilidad, expuesto por García *et al.* (2010).

### **3.3.2. Caracterización microestructural de las piezas sometidas a desgaste**

Las microestructuras observadas se corresponden con una aleación luego de retirada de servicio y que laboró durante un tiempo, bajo las condiciones de fricción abrasión. Las mismas están precedidas por una matriz austenítica, la fase ferrítica y la presencia de carburos, presumiblemente del tipo  $M_xC$ , típico en estas aleaciones en bruto de colada y por la temperatura de enfriamiento durante su obtención, resultados similares a los obtenidos por Sebon (2018).

En el acero austeníticos al manganeso, por el trabajo en frío, la austenita tiende a transformarse, en la superficie, a causa de la fricción. La aleación, está expuesta a los fenómenos combinados de abrasión fricción, los mismos causan la presencia de la ferrita.

Independientemente de los microconstituyentes observados, en la muestra 3, los carburos se ubican en los límites de los granos de la austenita y la presencia masiva de una estructura ferrítica. Al igual que en la muestra 2, que es menos perceptible a la formación de esta fase, sin embargo, en la muestra 3, existe un área de mayor ocupación de la ferrita, lo cual puede estar asociado a que en esta porción de la aleación, exista mayor contacto con el mineral que se debe procesar, por lo que trae la ocurrencia del cambio de una fase a otra.

Cuando la temperatura es inferior a 950 °C, precipita la fase secundaria  $M_xC$ , la que coexiste con la austenita hasta aproximadamente 400 °C. A partir de 680 °C, aparece la solución sólida  $\alpha$ . El endurecimiento por trabajo del acero Hadfield disminuye a temperaturas por encima y por debajo del intervalo del envejecimiento dinámico por deformación. A baja temperatura, < - 25 °C o a tasas más elevadas y temperaturas más altas, los átomos de

carbono están inmóviles, tanto en los núcleos de las dislocaciones como en la red de modo que no ocurre anclaje, de acuerdo al criterio de Lee y Chen (2002).

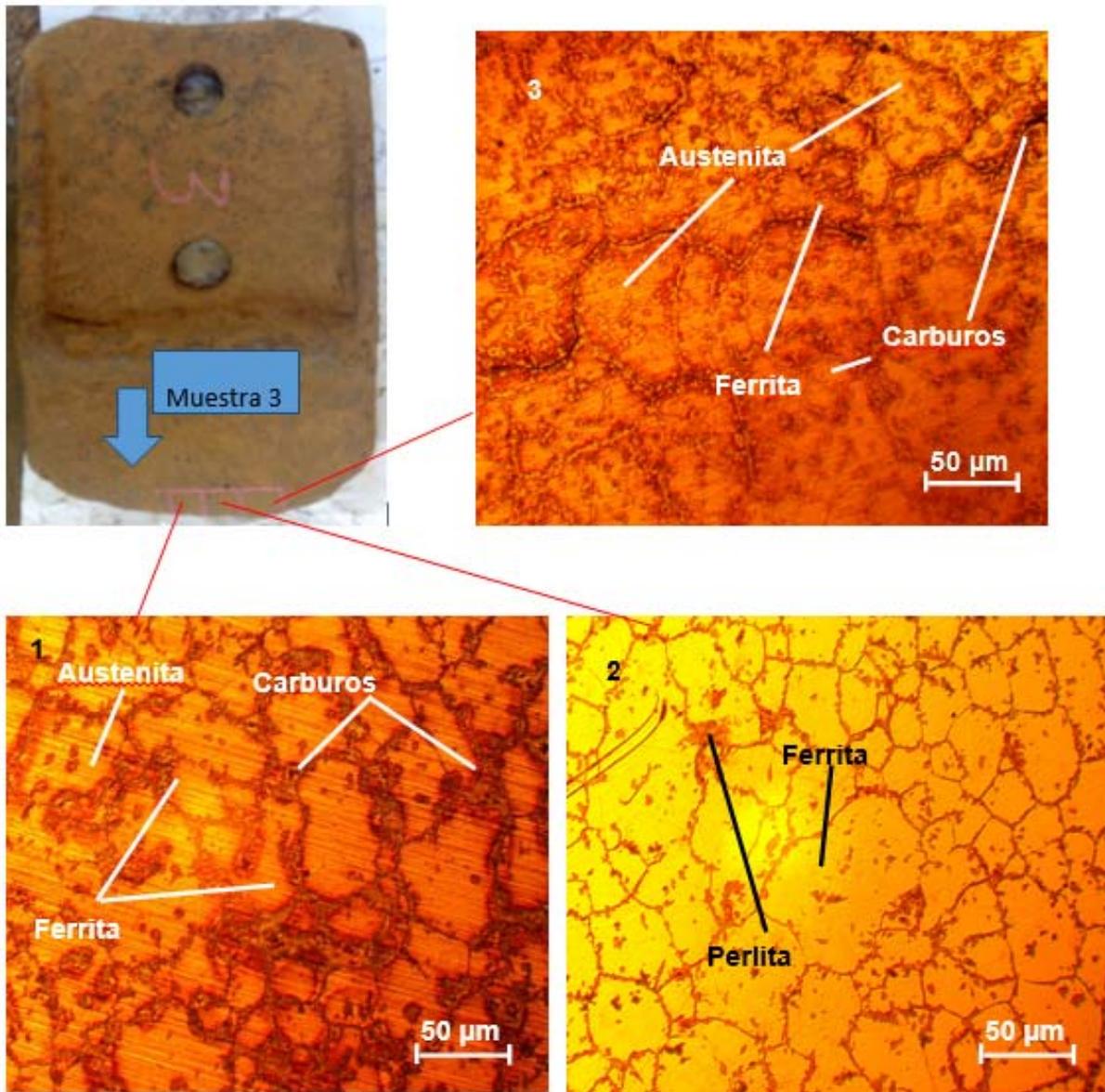


Figura 3.2: Microestructura de la muestra de la pieza fuera de servicio.

En ninguna de las muestras se evidenció la presencia de martensita como resultado de algún tratamiento térmico que garantiza la aparición de la misma, hecho reforzado por los ensayos de dureza que tampoco evidenció valores por encima de los HRC 27 (obtenido para una sola muestra), en todos los casos la dureza promedio fue inferior a los HRC 20.

### 3.4. Determinación de los tamaños de grano

Los tamaños de grano se calcularon como se explicó en el epígrafe 2.6 del Capítulo II, para la aleación que no fue puesta en explotación y para las dos muestras tomadas de materiales retirados del proceso, una vez que fue expirada su vida útil.

#### 3.4.1. Tamaños del grano para la aleación no trabajada

La determinación de los tamaños del grano para la muestra 1, aleación sin usar, se realizó teniendo en cuenta el área (ver figura 3.3), el número de campos y la calibración desarrollada.

Los tamaños del grano (ver tabla 3.5) para esa muestra fueron de 2 micrones, dimensiones grandes para una matriz con tratamiento térmico, lo que evidencia entonces la carencia de este último en todo el volumen del material analizado y la ausencia de la fase martensítica en la microestructura, como elemento que garantiza la dureza necesaria para estos tipos de aleaciones, expresado también por Higuera (2007).

Tabla 3.5. Datos de la microestructura para la obtención del tamaño del grano

<b>Customer:</b>					
<b>Date:</b>	05/04/2018 15:55:11	<b>Mag:</b>	1	<b>Calibration:</b>	1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
<b>Unit:</b>	microns	<b>Area:</b>	0.842	<b>No of Fields:</b>	1
<b>Specimen Name:</b>		<b>Specimen Id:</b>		<b>Supplier:</b>	



Figura 3.3. Zona identificada para determinar el tamaño del grano (muestra 1)

Tabla 3.6. Tamaño del grano de la muestra 1

<b>ASTM Standard:</b>	<b>E112</b>
<b>Avg Grain Size:</b>	<b>2</b>

### 3.4.2. Tamaños del grano para las aleaciones retiradas del proceso

Los tamaños del grano para las muestras 2 y 3, aleaciones retiradas del proceso, se realizó de manera similar a la muestra trabajada, considerando los mismos elementos (figura 3.4).

Tabla 3.7. Datos para la obtención del tamaño del grano (muestras trabajadas)

<b>Customer:</b>					
<b>Date:</b>	05/04/2018 15:58:27	<b>Mag:</b>	1	<b>Calibration:</b>	1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
<b>Unit:</b>	microns	<b>Area:</b>	0.842	<b>No of Fields:</b>	1
<b>Specimen Name:</b>		<b>Specimen Id:</b>		<b>Supplier:</b>	

Las dimensiones obtenidas de los cristales (ver tabla 3.8) para las muestras trabajadas, retiradas del proceso, fueron superiores a la de la muestra no trabajada ( $3 \mu\text{m}$ ), dimensiones excesivamente grandes para una matriz que debe tener dureza superior a HRC 50, también evidencia la carencia de una estructura martensítica, como resultado de un tratamiento térmico.

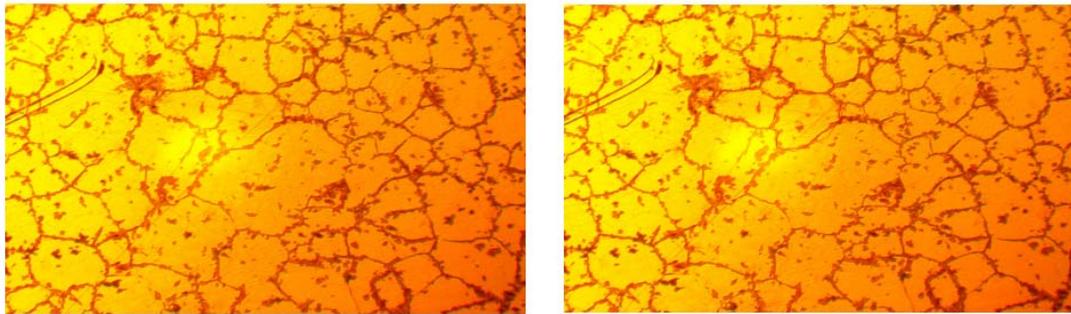


Figura 3.4. Zona identificada para determinar el tamaño del grano (muestra 2 y 3)

Tabla 3.8. Tamaño del grano de la muestra 1

<b>ASTM Standard:</b>	<b>E112</b>
<b>Avg Grain Size:</b>	<b>3</b>

### 3.5. Cálculo del volumen de la aleación

En el cálculo del volumen de la aleación primero se determinó el de la mezcla de agentes erosivos, en el medio acuoso, para obtener su peso a partir de las sustituciones de los radios y la distancia de la sección escogida para el análisis, despejando en las ecuaciones 2.2 y 2.3 con  $r_1 = 0,513 \text{ m}$ ;  $r_2 = 0,178 \text{ m}$ ;  $h = 277$  por lo que:

$$V_1 = 0,228 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,028 \text{ m}^3$$

Con estos volúmenes se obtiene el de la mezcla de los agentes erosivos en medio acuoso a partir de la ecuación 2.1 con:

$$V = 0,05034 \text{ m}^3$$

### **3.5.1. Determinación del peso de los árboles**

Para calcular el árbol es necesario determinar el volumen del mismo, el que se calcula por la ecuación 2.5, con  $d_1 = 356 \text{ mm}$  y  $d_2 = 292,1 \text{ mm}$ , por lo que sustituyendo:

$$V = 0,34 \text{ m}^3$$

Como el volumen obtenido en la ecuación 2.5 se despeja en 2.4 para  $\gamma = 7850 \text{ kgf/m}^3$  con lo que:

$$G = 2669 \text{ kgf}$$

A este se le suman el peso de las aleaciones (1879,9 kg) y los soportes (738,5 kg) para determinar el peso total del conjunto árbol-paleta.

#### **3.5.1.1. Peso de trabajo en el árbol**

Para determinar el peso de trabajo se analiza el volumen del árbol con el peso específico del agua, a fin de obtener el peso que pierde el árbol al sumergirse, dando como resultado  $G_1 = 5287,05 \text{ kgf}$  (51 865,96 N);  $G_2 = 170 \text{ kgf}$  (1 667,7 N), despejando estos valores en la ecuación 2.11:

$$G = 5117,046 \text{ kg} \quad (50333,95 \text{ N})$$

Para el cálculo del peso de la mezcla de los agentes erosivos se tomó el resultado del volumen, sustituyendo en la ecuación 2.4 para  $\gamma = 1065 \text{ kg/m}^3$  se obtiene:

$$G_m = 53606,775 \text{ kgf} \quad (525882,46 \text{ N})$$

### **3.5.2. Presión actuante**

En la determinación de la presión se despeja en la ecuación 2.4 el peso determinado anteriormente y el área de la sección transversal donde actúa dicho peso para un área:

$$A = 0,02156 \text{ m}^2$$

Con:

$$P = 0,24 \text{ MPa}$$

### 3.6. Modelación por el método de elementos finitos

La simulación se realizó empleando el software ANSYS, para lo que se consideró un análisis estructural con el objetivo de obtener las tensiones actuantes (ver figura 3.3). Como se observa los máximos esfuerzos se localizan en la base del soporte de las paletas, con valores que van desde los 28 hasta los 81,14 MPa, por tanto no son las condiciones de carga, a las que están sometidas las paletas, las causas de la rotura de las mismas.

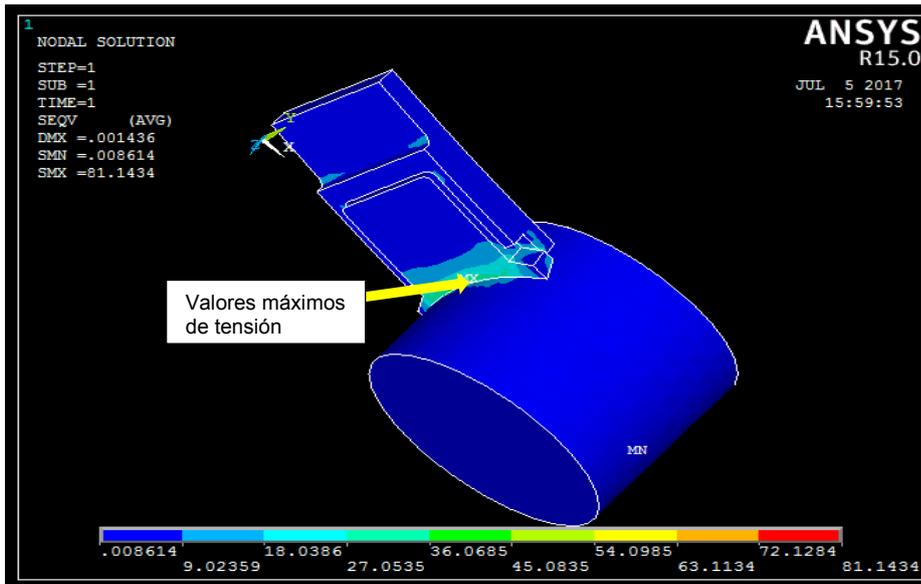


Figura 3.6. Distribución de tensiones sobre el conjunto árbol-paleta

### 3.7. Cálculo del desgaste

En el cálculo se determina el coeficiente de desgaste a partir de ecuación 2.9 para  $H_g = 200$  y  $H_a = 150$  HB por lo que:

$$K = 0,75$$

Con el resultado anterior se sustituye en la ecuación 2.8, para  $t = 8$  h, con lo que se obtiene que el desgaste lineal por fatiga es:

$$W = 8 \text{ mm}$$

Mediante la ecuación 2.10, con un espesor de 35 mm y  $S_f = 21\,560 \text{ mm}^2$ , se determina la intensidad lineal de desgaste, obteniendo como resultado:

$$I_h = 0,0016 \text{ mm}$$

Se calcula  $W_v$  a partir de ecuación 2.11 y sustituyendo los valores de  $h$  y  $A_n = 21\ 000\ \text{mm}^2$  con lo que:

$$W_v = 735\ 000\ \text{mm}^2$$

La intensidad volumétrica se determina para  $V = 0,05034\ \text{m}^3$ , y con los valores de área y  $S_f$  anteriores se obtuvo:

$$I_v = 111,18\ \text{m}$$

$$I_v = 111\ 180\ \text{mm}$$

Para el cálculo de  $W^I$  se utiliza la ecuación 2.13 obteniéndose

$$W^I = 4,375\ \text{mm/h}$$

### 3.9. Valoración económica

Las paletas de las lavadoras se desgastan con una frecuencia mensual que provoca que se tenga que detener el proceso de mezclado de mineral ya que hay que cambiar de tres a cuatro paletas todos los meses.

Para la valoración económica se tuvo en cuenta lo que se gasta mensualmente al tener que sustituir las paletas con regularidad, considerando que se averían 4 elementos de estos al mes, ver tabla 3.9.

Tabla 3.9. Costos por concepto de cambios de paletas

Cant. de paletas	Precio de una paleta	Precio total, CUC	Precio total al año, CUC
4	82,76	331,04	3972,48

Al aplicar el tratamiento térmico, al material de las paletas, estas aumentarían su vida útil con lo que solo se cambiarían de 5 a 6 paletas cada 2 años, lo que reduciría el gasto a 413,8 CUC, por lo que el impacto económico sería de 3558,68 CUC/año.

### 3.10. Valoración ambiental

Los materiales como el acero Hadfield por su resistencia se utilizan fundidos, este proceso es altamente generador de residuos sólidos y gaseosos, en el que se producen gases nocivos, los que van a parar a la atmósfera de la UEB Fundición, afectan así el medio circundante y la flora y fauna de las zonas aledañas. La arena de moldeo que se derrama posee varios componentes como aglutinantes y melaza, las que de cierta manera inciden en los suelos.

La arena de sílice, empleada para la fundición de las paletas, con una granulometría muy fina pasa a formar parte de los contaminantes, por polvo, en el aire, los que son inhalados tanto por los operarios como los vecinos que viven en las áreas circundantes de empresa.

Las aleaciones desgastadas y rechazadas de la fundición, pasan a formar parte en la acumulación de desechos que afectan el medio ambiente de la región al ser materiales muy difíciles de reciclar.

## **Conclusiones del Capítulo**

1. Se evidenciaron dificultades, en el cumplimiento de las normas para la composición química estándar del acero ASTM A 128, tanto para la aleación no trabajada como las muestras tomadas de piezas retiradas del proceso.
2. Las microestructuras obtenidas, de la aleación estudiada, muestran la prevalencia de una matriz ferrítica, con durezas inferiores a HRC 20, lo que demuestra la ausencia de algún tratamiento endurecedor, de las mismas, para garantizar resistencia al desgaste.
3. Los tamaño de grano, en todos los casos, fueron superiores a los 2  $\mu\text{m}$ , dimensiones muy grandes para la dureza recomendada (entre HRC 50-60).

## **CONCLUSIONES GENERALES**

- Se identifica como principales causas del desgaste prematuro en aleaciones empleadas para la fabricación de paletas para el lavado de menas lateríticas, la presencia de una microestructura basada en un microconstituyente de baja resistencia como es la ferrita.
- Los materiales estudiados carecen de una estructura martensítica, con tamaños de grano excesivamente grandes, que evidencian la ausencia de tratamiento endurecedor para enfrentar las condiciones de desgaste a que están sometidos.
- La modelación por elemento finito realizada al conjunto árbol-paleta demostró que el mismo es capaz de soportar las cargas que se producen como resultado de la interacción de los materiales erosionantes, en medio acuoso, sobre la superficie de trabajo.
- La valoración económica realizada permitió demostrar que de aplicarse un tratamiento endurecedor las paletas fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel pudieran tener una longevidad cercana a los 2 años, con un impacto económico de 3558,68.

## RECOMENDACIONES

- Sugerir a la Empresa Mecánica del Níquel, aplicar los resultados obtenidos en este trabajo, para la fabricación de aleaciones del tipo Hadfield sometidos al desgaste.
- Proporcionar a la aleación ASTM A 128 un tratamiento térmico de temple volumétrico, con el consiguiente revenido bajo, de alivio de tensiones, que conduzcan una dureza de entre HRC 50-60
- Evaluar la posibilidad de transformar el diseño de los elementos analizados en este trabajo, a fin de obtener una mayor superficie para enfrentar el desgaste.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, E. 1995. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. *Construcción de Maquinaria*. 20 (2) :69 - 76.
2. ASM 1992, ASM Handbook Vol. 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International. USA.
3. ASM. 1998. Materials Characterization. 9na. Ed. Metals Handbook. USA.
4. Ball, A. 1983. On the Importance of Work Hardening in the Design of Wear Resistant Materials, *Wear* 91 :201-212.
5. Belzunce, F. J. 2001: Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Asturias, España, 208 p. Disponible en: <http://www.aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>.
6. Bengton, U. 1991. Design requirements materials properties basics for materials selection. American Society for Testing Materials. USA: 230-250.
7. Bower, A.F; Johnson, K L. 1989. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact. *J. Mechanical Physics of Solids*. 37 (4) :471 - 493.
8. Budynas, R.; J.; Nisbett, K. 2008. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8va. Edición. Ed. Mcgraw-Hill Interamericana, México.
9. Castillo, A. 2006. Estadística y fiabilidad en el mantenimiento. La Habana: Pueblo y Educación.
10. Clauser. H. R. 1985. Diccionario de materiales y procesos de ingeniería. Editorial Labor S.A. Barcelona.
11. De la Torre, F. 2013. Monitoreado de Máquinas Industriales. La Habana: CEIM.
12. Díaz, A. 1992. Confiabilidad en mantenimiento. Caracas: IESA, C.A.
13. Deuis, R.L., C. 1998. Subramian, Three-body abrasive wear of composite coatings in dry and wet environments, *Wear* 214 : 12-130.
14. Dobrovolski, V. 1988. Elementos de máquinas. 3ra. Edición. La Habana. Cuba.

15. Gatzanis, E. 1993. The Abrasion and Abrasion-Corrosion Properties of 9 % Chromium Steel, *Wear* 165 :213 - 220.
16. FUNCA. S.A. 2017. Ni-Hard (Resistentes al desgaste). Presencia en la Web: [http://www.funcasa-mein.com/descargas/ni\\_hard.pdf](http://www.funcasa-mein.com/descargas/ni_hard.pdf). [Accedido: 14 feb. 2018].
17. Goyos, L.; Varela, A.; Verhaege, M.; García, A. 2012. Influencia del contenido de silicio y el tratamiento térmico en la resistencia al desgaste de fundiciones blancas al cromo. *Revista de Metalurgia*. 48 (4) :277-289.
18. Guliaev, A. 1983. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. :53 – 89.
19. Hutchings. Tribology. 1992. Friction and wear of engineering materials, Edit. Great Britain.
20. Kardec, A., y Nascif, J. 2002. Mantenimiento, Función Estratégica. Río de Janeiro. Brasil.
21. Kragelski I.V, Kombalov V.S. 1982. Fundamentos de los cálculos de fricción y desgaste. Mashinoestroyeniye. Moscú.
22. Lajtin, Y. 1973. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú :359 – 360.
23. Márquez M.A. 2002. Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México.
24. Martínez, C. R. 2006. Ingeniería de Lubricación y Tribología. Fundamentos de tribología :29-47.
25. Martínez, F.; Gordon, J. 1995. Teoría y tecnología del tratamiento térmico. 2da Ed. Ed. Pueblo y Educación La Habana. Cuba.
26. Mott L. R. 2012. Mecánica de fluidos aplicada. 4ta Ed. Universidad de Dayton. México. :327-352.
27. Nam P. 1986. Tribophysics, Edit. Prentice Hall, USA.
28. Neale, M.J. 2001. Guide to Wear Problems and Testing for industry, William Andrew Publishing, UK.

29. Palomino, E. (2001). Elementos de Medición y Análisis de vibraciones en máquinas rotatorias. La Habana: CUJAE.
30. Parts, Suitable for Low-Temperature Service. ASTM A352. 2013.
31. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los material. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. Pág 393-502. España.
32. Rojas-Fernández, M.V.; Velázquez-Del Rosario, A.; Rodríguez-González, I. 2015. Efecto de la adición de aluminio en la resistencia al desgaste abrasivo del hierro fundido aleado Ni-Resist. *Minería y Geología*.31 (4).pp: 38-50  
Raymond G. Bayer, Mechanical wear prediction and prevention, Edit. Marcel Dekker, 1994.USA.
33. Sebon, H. 2018. High Manganese Steel Castings. *ASTM A128*. Standard specification covers Hadfield austenitic manganese steel castings. Linked-in,
34. Standard Specification for Steel Castings ASTM A 352.
35. Schlachter, A. 1999. Medio ambiente: ¿Quién puede ignorarlo?. Artículo publicado en el periódico Granma. 23 de junio de. Cuba.
36. Stolarski T.A. 1991. Tribology in Machine Design. Ed. Industrial Press Inc. USA.
37. Tubielewicz, K., Jezierski, J., Znorko, D.A. 2000. Calculation pressures and the contact field in the contact zone of a burnishing roller and worked material, *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej*. Poland. 76 :93 – 99.
38. Wirojanupatump, P.H. 2000. Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus, *Wear* 239 :91 - 101.
39. Zum-Gahr, K. 1981 – 1982. Formation of Wear Debris by the Abrasion of Ductile Metals, *Wear* 74 :353 - 373.
40. Varela, A. 2003. Presentación de Metalurgia Física II. Disponible en la Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>.
41. Verdeja, L.; González R. 1996. El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: Conceptos generales. *Revista de Minas*. Madrid. 13 y 14 :16 – 23.
42. Verdugo, R. 2013. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. Universidad de Bío-Bío. Tesis de Ingeniería. Chile

43. Higuera, O. 2007. Fundamentos teóricos de los aceros auteníticos al manganeso (aceros Hadfield). *Scientia et Technica* XIII (34).