



Ministerio de la Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia

# Trabajo de Diploma

*Caracterización del material de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la planta de carbón activado de Baracoa*

*Addiel Quintero Orduñez*

*Moa, 2010*

*“Año 52 de la Revolución”*



Ministerio de la Educación Superior

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia

# Trabajo de Diploma

*Caracterización del material de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la planta de carbón activado de Baracoa*

*Autor: Addiel Quintero Orduñez*

---

*Firma*

*Tutor: Ing. Orleidy Loyola Breffe*

---

*Firma*

..

*Moa, 2010*

*“Año 52 de la Revolución”*

*Agradecimientos:*

*A Dios, por crear mi linda familia y permitirme ser parte de ella y por guiarme siempre por el buen camino.*

*A mis Padres, que ha puesto todo su amor y dedicación para ayudarme y apoyarme a alcanzar metas difíciles en la vida. Gracias por aconsejarme cada día y guardar para mí el mejor de los caminos a seguir, a mi familia que de una forma u otra lucharon tanto por ver este sueño hecho realidad.*

*A mi tutor Ing Orleidy, a los profesores del Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, los cuales han depositado su plena confianza en mí para la realización de este trabajo.*

*A todos mis profesores del Departamento de Metalurgia.*

*A los trabajadores de la estación sismológica por toda su ayuda y paciencia.*

*A mis amigos, compañeros de aula, a la Revolución Cubana y a nuestro invicto Comandante Fidel Castro Ruz, que nos ha dado la oportunidad a los estudiantes de formarnos como buenos profesionales para el mañana.*

**A TODOS MUCHAS GRACIAS**

*Dedicatoria:*

*Dedico este trabajo a la obra de la Revolución Cubana que ha hecho posible que tantos jóvenes como yo hayan tenido la oportunidad de formarse como profesionales y como hombres de bien.*

*A mis padres Manuel y Modesta, que han sido los máximos inspiradores en mi formación como profesional y como persona.*

*A mis hermanos Mariamnis, Adniel que tanto apoyo me han brindado.*

*A mi adorado hijo Hair Addiel para que le sirva de ejemplo en su vida y a mi esposa Zurella por todo el amor y la comprensión que me ha brindado.*

*A mis compañeros y amigos que han luchado a mi lado todo este tiempo y me han ayudado para alcanzar el éxito.*

*A mis demás familiares y amistades que con su ayuda me alentaron a continuar mis estudios.*



*“Todo es hermoso y constante, todo es música y razón. Y todo, como el diamante, antes que luz es carbón.”*

*José Martí*

## **RESUMEN**

Se determinaron las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material de construcción de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa. Para ellos se emplearon las técnicas de microscopía óptica, de emisión óptica y clasificación de material, de ensayos de dureza y de resistencia a la tracción y flexión. En las que se obtuvo que: el material se corresponde con un acero AISI 321 con un contenido de cromo de 18,31 %, el cual posee una Dureza Vickers de 170 HV, Dureza Brinell de 162 HB y Dureza Rockwell de 85 HRB. Se obtuvieron las curvas de resistencia a la tracción y flexión, las cuales reflejan la alta resistencia que posee este material al soportar una carga de 45 kN sin llegar a deformarse. Se pudo concluir que este material puede soportar las condiciones de trabajo del proceso de activación del carbón por un tiempo considerable y además se puede sustituir por un acero del tipo ACI HK 40 de producción nacional.

**Palabras clave:** Acero AISI 321; Composición química; Resistencia a la tracción y flexión; Microscopía óptica.

## **ABSTRACT**

The chemical, physical and mechanical properties of the construction equipment of the lifters and nozzles of the furnace of rotatory drum were determined of the activated charcoal company of Baracoa. For them the techniques of optical microscopy were used, of optical emission and classification of material, tests of hardness and tensile strength and flexion. In that it was obtained that: the material corresponds with a steel AISI 321 with a chromium content of 18.31 %, which has a Hardness Vickers of 170 HV, Hardness Brinell of 162 HB and Rockwell Hardness of 85 HRB. The curves of tensile strength and flexion were obtained, which reflect the high resistance that has this material when supporting a 45 load of kN without getting to become deformed itself. It was possible to be concluded that this material can support the conditions of work of the activation process of the coal by a considerable time and in addition can be replaced by a steel of type ACI HK 40 of national production.

**Key words:** Steel AISI 321; Chemical composition; Tensile strength and flexion; Optical microscopy

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Caracterización de la planta de carbón activado (UEB)</b> .....	<b>6</b>
1.1.1. Objeto social.....	7
1.1.2. Composición de la fuerza de trabajo.....	7
<b>1.2. Esquema tecnológico de la Planta de Carbón Activado de Baracoa</b> .....	<b>8</b>
1.2.1. Etapa. 1: trituración y clasificación primaria.....	8
1.2.2. Etapa No.2: activación.....	10
1.2.3. Etapa 3: clasificación secundaria y envase.....	11
<b>1.3. Características del carbón vegetal</b> .....	<b>11</b>
<b>1.4. Funciones de los levantadores</b> .....	<b>13</b>
<b>1.5. Funciones de las toberas</b> .....	<b>13</b>
<b>1.6. Comportamiento del material de los levantadores y toberas</b> .....	<b>13</b>
<b>1.7. Pruebas experimentales en el horno con diferentes tipos de acero inoxidable</b> .....	<b>14</b>
<b>1.8. Características de los aceros</b> .....	<b>15</b>
1.8.1. Clasificación de los aceros.....	15
1.8.2. Fabricación del acero.....	15
1.8.3. Aceros al carbono. ....	16
1.8.4. Aceros inoxidable. ....	16
<b>1.9. Caracterización de los aceros inoxidables de la serie 300</b> .....	<b>16</b>
1.9.1. Caracterización del acero AISI 310.....	17
1.9.2. Caracterización del acero AISI 321 .....	20
<b>1.10. Trabajo precedentes</b> .....	<b>21</b>
<b>1.11. Resistencia a la corrosión de los aceros</b> .....	<b>27</b>
1.11.1. Tipos de corrosión en los aceros inoxidables .....	28

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

**25**

<b>2.1.</b>	<b>Generalidades del proceso investigativo.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.</b>	<b>Método de emisión óptica y clasificación de material. ....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.</b>	<b>Preparación metalográfica de las probetas .....</b>	<b>27</b>
2.3.1.	Generalidades .....	27
2.3.2.	Selección de la muestra .....	28
2.3.3.	Toma o corte de la probeta .....	29
2.3.4.	Montaje de la probeta .....	29
2.3.5.	Operación de desbaste .....	29
2.3.6.	Pulido de la probeta .....	30
2.3.7.	Ataque químico a la pieza .....	31
2.3.8.	Tipos de reactivos utilizados .....	32
2.3.9.	Análisis microestructural.....	32
<b>2.4.</b>	<b>Estudio de la dureza del material.....</b>	<b>34</b>
2.4.1.	Dureza Vickers. ....	35
2.4.2.	Dureza Brinell. ....	36
2.4.3.	Dureza Rockwell. ....	37
2.4.3.1.	Ensayo de dureza Rockwell (HR). ....	39
<b>2.5.</b>	<b>Estudio de la resistencia del material .....</b>	<b>40</b>
2.5.1.	Ensayo de tracción.....	40
2.5.2.	Ensayo de flexión .....	41
2.5.3.	Herramienta de corte utilizada en el ensayo de resistencia.....	42

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

**45**

<b>3.1.</b>	<b>Análisis de la composición química de la pieza.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.</b>	<b>Análisis de la elaboración mecánica de las probetas .....</b>	<b>46</b>
3.2.1.	Corte de las probetas.....	46
3.2.2.	Análisis del desbaste y pulido para la observación micrográfica .....	48
3.2.3.	Análisis del lavado y del desgrasado .....	48

3.2.4.	Análisis del ataque químico.....	48
<b>3.3.</b>	<b>Análisis de la observación con microscopía óptica .....</b>	<b>49</b>
<b>3.4.</b>	<b>Análisis de los ensayos de dureza .....</b>	<b>50</b>
<b>3.5.</b>	<b>Análisis de la resistencia del material.....</b>	<b>51</b>
3.5.1.	Resultados del ensayo de tracción .....	51
3.5.2.	Resultados del ensayo de flexión.....	54
<b>3.6.</b>	<b>Valoración de los resultados obtenidos respecto a las condiciones reales del proceso de carbón activado .....</b>	<b>57</b>
<b>3.7.</b>	<b>Propuesta de otro material que pueda sustituir al AISI 321 .....</b>	<b>58</b>
3.7.1.	Características químicas del acero ACI HK 40. ....	58
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>60</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>61</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>62</b>



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo impetuoso del mundo actual impone al hombre sus retos, los cuales lo obligan a perfeccionar técnicas y a buscar formas novedosas que garanticen su supervivencia y den solución a los problemas que les son presentados por la vida. Debido a esto se trata de trabajar fuertemente, para que en nuestros días, dadas las condiciones que son impuestas por las necesidades de producir con más eficiencia y calidad, se debe resolver los problemas presentados en nuestros puestos de trabajo a como de lugar, con nuestras propias producciones.

Este trabajo está enmarcado en problemas existentes en la planta de carbón activado de Baracoa. El carbón vegetal no posee una textura porosa tan desarrollada como la de los carbones activados. No obstante, resulta simple y barato de producir, por lo que a pesar de ser un adsorbente relativamente mediocre, sí se compara con los carbones activados y se utiliza en determinadas aplicaciones que no requieren de una gran capacidad de adsorción. También se usa para adsorber moléculas de un tamaño relativamente grande (como los colorantes). Una de sus aplicaciones es en la clarificación de bebidas alcohólicas como el vino, cerveza, whiskey, etc. También se emplean: en envenenamiento; filtra naturalmente el agua, elimina las toxinas, indicado en el tratamiento de meteorismo y la diarrea, utilizado en el tratamiento de intoxicaciones por bioproductos bacterianos; es un gran coadyuvante de productos para el estreñimiento y espasmos abdominales, se usa para la calefacción de los hogares, los hornos y otros empleos industriales.

La planta de carbón activado de Baracoa fue diseñada desde sus inicios para suplir la demanda nacional de tan importante producto, pues el mismo no es más que un carbón poroso preparado artificialmente en el interior del horno de activación; con el fin que exhiba un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna, estas características son las responsables de sus propiedades absorbentes que son utilizadas ampliamente en muchas aplicaciones tanto en fase



gaseosa como en fase líquida. Esta planta utiliza como materias primas fundamentales la concha de coco pirolizado y el carbón vegetal que se obtiene a través de la carbonización de maderas duras como el Ácana, Caguairán, Júcaro, la Casuarina, entre otros.

En nuestro país se emplea el carbón activado en la industria química, para tratamiento de agua, así como la declorinación y para la purificación de gases, por ejemplo la empresa de gases industriales lo utiliza en el interior de los balones de acetileno como lecho filtrante; en la industria del ron se aprovecha para el destufado de alcoholes, también se aplica en la industria farmacéutica y en la industria azucarera, por citar algunos ejemplos.

La recuperación de piezas o parte de los equipos constituye una práctica muy importante y ha dado un nuevo campo en la ingeniería (la innovación tecnológica), donde se pone en uso toda aquella tecnología ya vieja por el pasar del tiempo, al aplicar algunas transformaciones, creadas por nuestros cuerpos de ingenieros que con pocos recursos dan solución a los problemas presentados.

Se ha tenido que aplicar cuidadosamente toda la tecnología que está en nuestras manos, incluso con la utilización de metales de los cuales se conoce poco sus características y aplicaciones.

En el proceso productivo para la obtención del carbón activado, desempeña un importante papel el horno de activación, porque en el interior de este equipo es donde ocurre la activación física del carbón. Este horno rotatorio de 1,6 m de diámetro por 12 m de largo está compuesto por varios elementos que determinan considerablemente el buen funcionamiento del mismo; por citar algunos ejemplos se tienen: los levantadores, las toberas, los termopares, el flear, un motorreductor, la obra refractaria, los manómetros y termómetros. La temperatura óptima de trabajo oscila entre los 850 - 950 °C, ocasionalmente se alcanzan temperaturas hasta de 1000 °C, por tanto los elementos metálicos que operan en el interior del



horno deben poseer propiedades especiales, fundamentalmente ser termo resistentes y resistentes a la oxidación a esta temperatura.

El horno de tambor rotatorio es muy versátil y está apto para trabajar con materiales sólidos preferentemente, la alimentación del horno se ajusta hasta lograr que la carga ocupe, aproximadamente un 20 % del volumen interior del horno. La función principal del horno rotatorio es que a través de su movimiento de rotación ocurran en su interior diversos procesos tecnológicos como son:

1. El secado en hornos destinados para la producción de Níquel
2. El secado, recocido y enfriamiento del carbonato básico de Níquel
3. Secado y calcinación en la fabricación de cemento
4. Para la obtención de Sal
5. Para la activación física en hornos cuya destinación es la producción de Carbón Activado.

Estos tipos de hornos permiten la variación de la velocidad.

En este horno (de activación de carbón) se tienen un conjunto de levantadores y toberas que son elementos metálicos de gran vitalidad. Estos a su vez, están contruidos por una aleación del tipo AISI- 310 que es, un acero refractario de alta resistencia, usado para trabajar a elevadas temperaturas. Los altos contenidos de níquel y cromo le dan al acero excelente resistencia a la oxidación así como gran resistencia a las altas temperaturas.

Como ya se mencionó anteriormente el horno de tambor rotatorio de Baracoa posee en su interior levantadores y toberas, cuyos elementos ejercen una función de alta responsabilidad en el proceso productivo. Estos elementos como diseño de origen están contruidos de una aleación de acero AISI 310; cuya aleación ha llegado a la culminación del tiempo de su vida útil en los últimos años, los cuales se han doblado, partido y se les han creado grietas, lo que dificulta el buen



procesamiento de la activación del carbón. La sustitución de estos elementos resulta muy difícil, ya que este tipo de acero no es de producción nacional. Lo que ha conllevado a la experimentación con otros materiales que se han conseguido a través de las relaciones con la industria del níquel.

En estos momentos está en utilización un material que se obtuvo de la empresa "Combinado Mecánico de Níquel" de Moa, el cual ha brindado buenos resultados, pero realmente no se conoce el tipo de material, ni su composición química y demás propiedades.

De aquí se desprende que el **problema** de esta investigación es:

El desconocimiento de las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material de construcción de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa, crea incertidumbre en la confiabilidad del uso del mismo.

Como **hipótesis** se puede plantear

Si se determinan las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material de construcción de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa; entonces se logrará operar con mayor confiabilidad en el tiempo de vida útil de este material.

Como **objetivo** de la investigación se puede plantear:

Determinar las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material de construcción de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa, con vista a predecir la confiabilidad en su uso.

### **Objeto de la investigación**

Los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa.



### **Campo de acción**

Son las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material de construcción de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa.

### **Objetivos Específicos**

1. Realizar el estudio de los trabajos precedentes referente al tema.
2. Determinar la composición química del material.
3. Realizar ensayo de microscopía óptica.
4. Determinar la dureza del material.
5. Determinar la resistencia a la tracción y flexión del material.
6. Evaluar la confiabilidad del material en cuanto a su vida útil en dependencia del tipo de acero.



---

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

En la planta de carbón activado de Baracoa, el horno de tambor rotatorio tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del carbón, por cuanto, es en ésta donde se crean las condiciones de activación del carbón de conchas de coco o el de vegetal, para la extracción del mismo en su forma final. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los levantadores y las toberas que están dentro del horno en el proceso de activación del carbón, de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de activación, en tal sentido el objetivo del capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos del proceso de activación del carbón y las investigaciones realizadas a los AISI de la serie 300, como base para realizar la caracterización microestructural del material de los levantadores y las toberas en el horno de tambor rotatorio en la empresa UEB PROVARI Carbón Activado de Baracoa.

### **1.1. Caracterización de la planta de carbón activado (UEB)**

La fábrica de carbón activado está ubicada en el asentamiento rural Rivera, Mabujabo del municipio Baracoa, provincia Guantánamo; esta ha sido subordinada a varias empresas; desde 1990-1991 perteneció a la Empresa del Cromo Moa, luego pasó a formar parte de la Salinera Caimanera hasta 1992, desde ese año hasta el día 30 del mes de abril del año 2009 se subordinó a la Empresa Geominera de Oriente y desde el 1ro. de Mayo de ese año y hasta la actualidad es dirigida por la Empresa de Producciones Varias del MININT (PROVARI).

Esta planta industrial de carbón activado es la única de su tipo en nuestro país y Latinoamérica. El carbón se obtiene mediante la activación física. La planta posee una capacidad de producción de 500-600 t por año, según intereses económico.



Las producciones realizadas en los últimos años han estado dirigidas fundamentalmente a los sectores industriales:

- ✓ Tratamiento de agua (eliminación de cloro residual).
- ✓ Gases industriales (almacenamiento de acetileno).
- ✓ Purificación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para bebidas y refrescos embotellados.

En estos momentos abre sus espectros hacia las producciones industriales, como vía para aumentar el rendimiento laboral y rentabilidad económica a favor de nuestro país.

#### **1.1.1. Objeto social.**

- ✓ Producción y comercialización de carbón activado a partir de materias primas de madera y conchas de coco.
- ✓ Producción y comercialización de filtros domésticos e industriales para el tratamiento de agua.

#### **1.1.2. Composición de la fuerza de trabajo**

Actualmente se cuenta con 39 trabajadores de ellos 2 ocupan la categoría de dirigentes, 10 técnicos, 18 obreros, 6 trabajadores de servicio, 1 administrativo, 1 contrato determinado y 1 contrato por período a prueba; de ellos 9 son técnicos superiores, 4 técnicos medios y hay 5 mujeres que representan el 12,8 % de la fuerza total. Esta fuerza responde a la siguiente estructura organizativa:

Dirección

Grupo de seguridad interna

Grupo económico laboral

Brigada de servicios

Brigada de planta de activación (3)



Grupo técnico

Brigada de mantenimiento

Laboratorio

## 1.2. Esquema tecnológico de la Planta de Carbón Activado de Baracoa

En todo proceso productivo, resulta de gran utilidad el flujo tecnológico, porque este refleja el orden de todas las etapas de la producción y lo que ocurre en cada una de ellas, dicho esquema se puede observar en el anexo N° 1. Para obtener como producto final carbón activado es necesario que la materia prima (carbón pirolizado) atraviese tres etapas fundamentales:

- ✓ Trituración y clasificación primaria.
- ✓ Activación.
- ✓ Clasificación secundaria y envase.

### 1.2.1. Etapa. 1: trituración y clasificación primaria

Se utilizará el carbón primario obtenido en los hornos brasileños, el cual se trasladará desde los puntos de concentración hasta la planta. De esta área se transporta hasta la tolva receptora de 8 m<sup>3</sup>. Adosado a la tolva, se tiene un desterronador de 300 x 300 mm para romper el material que se transportará por un sinfín alimentador (de 0,195 m de diámetro x 4,60 m de largo y 15 ° de inclinación) y esta a un elevador de cubos de 17 m de altura. Luego se descarga en un triturador de rodillos donde se obtiene una granulometría menor, posteriormente pasa a un triturador granulador. El carbón granulado pasa a una zaranda vibratoria de un paño, donde se obtienen dos fracciones, una fracción -4 mm y la otra +4 mm, esta última pasa por un segundo triturador granulador, y el material que sale se une a la primera fracción -4 mm y se descarga en una zaranda circular de tres paños. Se emplean las mallas 0,2 y 0,4 mm y se obtienen cuatro fracciones: la +4 mm se devuelve al elevador de cubos para ser triturada y



granulada nuevamente; la fracción  $-0,2$  mm pasa a un sinfín transportador (de  $0,195$  m de diámetro x  $4,0$  m de largo) que descarga a un silo intermedio de  $18$  m<sup>3</sup> donde se almacena. Las otras dos fracciones  $+0,2$  mm y  $-4$  mm se acumulan respectivamente en dos silos intermedios de  $18$  m<sup>3</sup> cada uno. Cada silo cuenta en su salida con una válvula de estrella de  $0,198$  m de diámetro.

La descarga de cualquiera de estos silos, o de ambos, es recogida en un sinfín común (de  $0,195$  m de diámetro x  $6,20$  m de largo) cuya función es la de dosificar la alimentación que llega al horno de activación por medio de una válvula de estrella de  $0,198$  m de diámetro, cuya función es la de servir de sello a la alimentación.

En esta área, debido a las operaciones de trituración, granulación y clasificación de carbón, tienden a producirse finos, por lo que se ha instalado un sistema de recuperación de polvos con una capacidad de  $0,7$  m<sup>3</sup>/s. El flujo de aire y polvo extraído pasa a través de un filtro de manga ( $A = 16,4$  m<sup>2</sup>) que cuenta con un compresor ( $320$  L/min.) para destupir las mangas periódicamente. El flujo de aire libre de polvo se expulsa a la atmósfera con el empleo de un ventilador extractor (de  $3000$  m<sup>3</sup>).

En esta área existe tomas para la extracción de polvo de las zonas siguientes:

- Zona de trituración y primer granulador
- Zona de la zaranda vibratoria
- Zona del segundo granulador
- Zona de la zaranda circular
- Zona de alimentación a los silos intermedios.

Esta sección trabajará un turno diario.



## 1.2.2. Etapa No.2: Activación

Esta operación es la de más importancia de la planta y se procesará en ella el carbón primario granulado proveniente de los silos para almacenamiento de los productos del área de trituración y dosificación primaria. El flujo de carbón primario requerido se regula por medio de un sinfín que descarga a través de una válvula de estrella en la cámara de combustión del horno, donde se establece un proceso de fluido concurrente. El horno rotatorio instalado tiene 1,6 m de diámetro por 12 m de largo.

En el proceso de activación empleado (método físico) el carbón entra en contacto con el agente activante que en este caso es el vapor de agua, el cual se inyecta en la cámara de combustión del horno con el control de su flujo por medio de un flujómetro de vapor.

El vapor de agua (saturado de 170-180 °C y 8 atm de presión) es producido en una caldera, la cual funciona en un sistema que cuenta con una cámara de combustión independiente y su quemador. En esta cámara se alimentan y queman los gases calientes (aproximadamente 800 °C) que salen, donde el calor desprendido se utiliza para la producción de vapor que se emplea en la activación.

Para suplir la energía requerida por el proceso, ya que el mismo se realiza a una temperatura de 850-900 °C se utiliza la combustión de los gases que se generan en el interior del horno (H<sub>2</sub>, CO) mediante la entrada el aire inducido y distribuido a través de cuatro tubos equidistantes colocados a lo largo del horno.

Para el calentamiento inicial del horno y para cualquier disminución ocasional de temperatura durante el proceso, el horno cuenta con un quemador de gas oil automático el cual está acoplado a la cámara de combustión del mismo.

Una vez transferido el calor de los gases en la caldera, los mismos se pasan a través de un ciclón lavador para eliminar el polvo y luego son expulsados a la atmósfera con el empleo de un extractor con una capacidad de 8000 m<sup>3</sup>/h.



El carbón activado sale del horno por medio de un serpentín enfriador de descarga que rodea la superficie exterior final del horno, y de aquí cae en un sinfín enfriador (0,134 m de diámetro por 2,600 m de largo) abierto, el aire sale por la parte superior y provisto por una cámara de enfriamiento por agua en la parte interna, es decir del centro hacia abajo del enfriador. El producto frío se descarga en un elevador de cubos de 8 m de alto que lo eleva a un silo de 5 m<sup>3</sup> de capacidad donde se almacena para su clasificación granulométrica y envase.

### **1.2.3. Etapa 3: Clasificación secundaria y envase**

El carbón activado almacenado en el silo se alimenta a una zaranda circular de dos paños por medio de la válvula de estrella (0,198 m de diámetro). En esta zaranda se obtienen tres fracciones que son: -2 +1,18 mm y -0,35 mm.

Estas tres fracciones serán embasadas independientemente en sacos multicapas. Cada saco llevará un peso de 20 kg. de carbón activado.

En esta área existen tolvas para la extracción de polvo en las zonas siguientes:

- \_ Zona de descarga del elevador al silo
- \_ Zona de la zaranda circular
- \_ Zona de envase de las fracciones finales.

El flujo de aire y polvo extraído va a un filtro de manga ( $A = 6,4 \text{ m}^2$ ) acoplado a un sistema que cuenta con un compresor (320 L/min.) para destupir las mangas periódicamente. El aire libre del polvo se expulsa a la atmósfera por medio de un ventilador extractor de 3000 m<sup>3</sup>.

Esta sección trabajará un turno por día.

### **1.3. Características del carbón vegetal**

El carbón vegetal es un material combustible sólido, frágil y poroso con un alto contenido en carbono, del orden del 80 %. Se produce por calentamiento de madera y otros residuos vegetales, a temperaturas que oscilan entre 400 y 700 °C,



en ausencia de aire. El poder calorífico del carbón vegetal oscila entre 29.000 y 35.000 kJ/kg, y es muy superior al de la madera, que oscila entre 12.000 y 21.000 kJ/kg.

Las reacciones de desvolatilización de la biomasa vegetal durante la pirólisis dan lugar a un residuo sólido, el cual es un substrato orgánico de carbono. El carbón vegetal se caracteriza por contener grupos funcionales, que incluyen estructuras aromáticas y olefínicas. Su área superficial es elevada y tiene un alto grado de reactividad, lo cual depende de la extensión de las reacciones secundarias de pirólisis en fase sólida.

El carbón vegetal que se ha obtenido durante el proceso de pirólisis de materiales lignocelulósicos contiene una superficie externa y dentro de su estructura porosa cierta masa de productos volátiles retenidos. El desarrollo de estas estructuras y grupos funcionales están relacionados con las condiciones de pirólisis, particularmente con la velocidad de calentamiento, el nivel de temperatura y la utilización o no de catalizadores.

El carbón vegetal puede ser considerado como un producto de calidad en dependencia de sus propiedades físicas y químicas, las cuales están altamente relacionadas con la materia prima y las condiciones operacionales de los procesos de pirólisis. Son muchos los parámetros que caracterizan el carbón, los más significativos son: rendimiento, contenido de volátiles, contenido de carbono fijo, contenido de cenizas y dureza. El carbono fijo es la cantidad de material combustible que permanece en la muestra carbonosa después de remover la humedad, materia volátil y ceniza; y es expresada como porcentaje del material original. Con el aumento de la temperatura los carbones emiten materia volátil que consiste en gases, aceites y alquitranes. La lignina de la biomasa es la que más contribuye a la producción de carbono fijo.



#### **1.4. Funciones de los levantadores**

La mayoría de los hornos de tambor rotatorio (HTR) poseen en su interior una gran cantidad de levantadores, el HTR de la planta de carbón activado de Baracoa presenta en su interior 28 levantadores ubicados en forma de zig-zag con un ángulo de curvatura de  $30^\circ$ , soldados en el revestimiento interior del horno, cuya función consiste en actuar sobre el coeficiente de agitación y contacto del proceso tecnológico y recolectar el carbón activado, ya sea carbón de conchas de coco o el carbón vegetal que se encuentra en procesamiento dentro del horno. Cuando estas piezas alcanzan el punto muerto inferior, recogen el carbón, y al aproximarse al punto muerto superior vierten el mismo en forma de lluvia o cascada; de esta forma se logra la activación del carbón con el vapor de agua inyectado al horno, en el que se tiene como resultado final el carbón activado.

#### **1.5. Funciones de las toberas**

La mayoría de los hornos industriales que trabajan con flujo de aire u otro tipo de gases, poseen en su estructura diversos tipos de toberas. En el caso del HTR de la planta de carbón de Baracoa se cuenta con 4 toberas ubicadas a todo lo largo del horno con una separación entre ellas de 2,5 m. Estas toberas poseen la función de suministrar la entrada de aire del medio ambiente al interior del horno, para lograr una mayor eficiencia y que exista una combustión más completa de los gases dentro del horno con vista a lograr una buena obtención del producto final (carbón activado).

#### **1.6. Comportamiento del material de los levantadores y toberas**

Los levantadores del horno de tambor rotatorio de la empresa de carbón activado de Baracoa están fabricados de un acero refractario austenítico de la serie 300, específicamente el AISI 310, ya que es un acero resistente a las altas temperaturas y con muy buena resistencia mecánica. Pero al pasar el tiempo de explotación, o la llegada del fin de su vida útil ha empezado a deteriorarse. El tiempo de explotación aparejado a las condiciones de trabajo reales en el proceso,



son las causas que han provocado el deterioro de este material; ya que en este proceso se trabaja de forma periódica, y están expuestos a cambios bruscos de temperaturas, lo que provoca los choques térmicos.

Para ello la empresa en coordinación con algunas entidades del estado se dio la tarea de reemplazar este material que no es producido en Cuba, por otro que no es de producción nacional de la misma serie 300, específicamente el AISI 321, el cual tiene características idóneas para su uso en el horno.

Las toberas del horno de la empresa de carbón activado de Baracoa, también han sufrido el paso del tiempo y llegaron al fin de su vida útil, por lo que también son remplazadas al igual que los levantadores, por el mismo acero inoxidable de la serie 300 que como el anterior es del tipo AISI 321.

### **1.7. Pruebas experimentales en el horno con diferentes tipos de acero inoxidable**

En la empresa de carbón activado de Baracoa, después de la ruptura de los levantadores y las toberas originales se llevaron a cabo una serie de pruebas de planchas de aceros inoxidables, para ver cual de ellas era la idónea para trabajar en un régimen de temperatura como el establecido allí. Para ellos se tomaron diferentes planchas de aceros en diferentes corridas, con el desconocimiento de las propiedades físicas, químicas y mecánicas y se realizaron pruebas aleatorias de la capacidad de resistencia de estos materiales a las condiciones de trabajo del proceso.

Los resultados que se obtuvieron en todas estas pruebas fueron negativos, ya que la durabilidad de estos materiales fue de un período de tiempo muy corto, incluso en algunos de los casos no se lograba terminar una corrida completa (máximo 24 horas), por lo tanto era necesario parar el proceso sustituir estas piezas, lo que provocaba una ineficiencia en el mismo y se elevaban los costos de producción de la planta de carbón.



De esta forma se realizaron varias pruebas con diferentes tipos de materiales, hasta que se encontró el que sería el más adecuado, que consiguientemente es el que está instalado en la actualidad, el cual ha logrado resistir más de tres corridas sin que se hayan alterado sus propiedades físicas; el tipo de material al que se hace referencia es el AISI 321.

## **1.8. Características de los aceros**

### **1.8.1. Clasificación de los aceros**

Los diferentes tipos de aceros se agrupan en 5 clases principales:

- Aceros al carbono
- Aceros aliados
- Aceros de baja aleación ultrarresistente
- Aceros inoxidables
- Aceros de herramientas.

### **1.8.2. Fabricación del acero**

El acero se obtiene al eliminar las impurezas del arrabio, producto de fundición de los altos hornos, y añadir después las cantidades adecuadas de carbono y otros elementos. La principal dificultad para la fabricación del acero es su elevado punto de fusión, 1400 °C, que impide utilizar combustible y hornos convencionales. En 1855, Henry Bessemer desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre y en el que el proceso de refinado del arrabio se lleva a cabo mediante chorros de aire a presión que se inyectan a través del metal fundido. En el proceso Martin-Siemens, o de crisol abierto, se calienta previamente el gas combustible y el aire por un procedimiento regenerativo que permite alcanzar temperaturas de hasta 1650 °C.



### **1.8.3. Aceros al carbono.**

Más del 90 % de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos de 1,65 % de manganeso, 0,60 % de silicio y 0,60 % de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóviles, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y hornillas o pasadores para el pelo.

### **1.8.4. Aceros inoxidables.**

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largo período a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones, o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos, los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

### **1.9. Caracterización de los aceros inoxidables de la serie 300**

Estos aceros inoxidables del tipo austenítico son los más difundidos en el mercado, se caracterizan por tener muy buena resistencia a los agentes atmosféricos, mayor resistencia a la acción corrosiva de los ácidos y tener además, en general, a elevadas temperaturas buena resistencia mecánica y muy buena resistencia a la oxidación. Se emplean para elementos decorativos, equipos e instalaciones de tipo sanitarias, elementos de hornos y calderas, y en general



instalaciones industriales. Los más usados son, 304, 304L, 310, 316, 316L, 317L y 321.

### 1.9.1. Caracterización del acero AISI 310

Es un Acero inoxidable austenítico antimagnético, no templable, que por su mayor contenido de cromo y níquel posee una gran resistencia a la corrosión a temperaturas de hasta 1100 °C. (2000 °F.), y lo hace recomendable para servicio intermitente.

#### APLICACIONES

Se utiliza como intercambiadores de calor, en partes de turbinas de gas, incineradores, hornos industriales, etc.

Este tipo de acero ha sido estudiado por diferentes investigadores, entre ellos García L.J et. al (2007), el cual realiza diferentes análisis a este material como los que se muestran más adelante. Este acero inoxidable a alta temperatura, austenítico por su contenido de cromo y níquel como elementos principales de aleación, posee la composición química que se muestra en la tabla N° 1.1 según norma.

**Tabla N° 1.1: Composición química del acero AISI 310, %.**

Muestra	C	Mn	Si	P	Mo	Cr	Ni	Resto
<b>AISI 310</b>	1,6	1,22	1,46	0,015	0,05	24	18	Fe

A este acero se le realizaron varios experimentos para determinar sus propiedades, para ellos se muestra más adelante una metodología experimental y los resultados obtenidos.

**METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El experimento consideró 5 muestras, las cuales se mantuvieron en el horno a temperatura constante y diferente tiempo de permanencia, las condiciones de trabajo y las pruebas realizadas se resumen en la tabla N° 1.2.

**Tabla N° 1.2: Condiciones experimentales y pruebas realizadas.**

Número de muestra	Temperatura; °C	Tiempo en el horno; h	Pruebas realizadas
Original	20	0	Tensión, Dureza, Microscopía óptica, Difracción de Rayos X Y Análisis químico.
1	780	300	
2	780	600	
3	780	900	
4	780	1200	

**RESULTADOS EXPERIMENTALES****a) Ensayo de tensión.**

La tabla N° 1.3, muestra los resultados obtenidos de las curvas esfuerzo, deformación de las muestras, obtenidos del ensayo de tensión.

**Tabla N° 1.3: Resultados obtenidos del ensayo de tensión.**

Muestra,	Carga máxima, (N)	Límite de cedencia, (MPa)
Original	88598,112	365,503
300	46585,98	251,479
600	56432,068	261,825



900	44273,71	269,771
1200	56097,44	341,559

El material presenta una disminución, en la carga máxima y el límite de cedencia, con respecto a la muestra original, esto es debido a que el material presenta una fragilidad por su alto contenido de cromo y níquel, además que está expuesto a tiempos largos de permanencia dentro del horno, este material puede presentar un precipitado rico en cromo en su estructura, la cual es cúbica centrada en el cuerpo, lo cual demuestra que hay cambios en la estructura y así mismo de sus propiedades, las que están asociadas a la fragilidad. La fragilidad que presenta el acero ocurre por el calentamiento a una alta temperatura de 780 °C, esto es debido a la precipitación de la fase sigma.

#### **b) Ensayo de dureza**

La tabla N° 1.4 muestra la dureza tomadas en las muestras originales y tratadas térmicamente.

**Tabla N° 1.4: Resultados de dureza del AISI 310**

<b>Tiempo; h</b>	<b>Dureza Brinell</b>	<b>Dureza Rockwell</b>
Original	289,5	28,5
300	260	24
600	255,8	23
900	262,8	24,4
1200	261,7	24



## Tratamiento térmico de homogenización

Muestras de este acero 310 se calentaron a 1050 °C durante 2 horas y enfriaron rápidamente en agua. Producto de este tratamiento térmico se obtuvo una disminución de la dureza superficial:

**Dureza promedio superficie: 153 (Hv30)**

## Ensayos de tracción

En la Tabla N° 1.5 se muestran los resultados de este ensayo de tracción:

**Tabla N° 1.5. Resultados de los ensayos de tracción**

Distribución Probeta	Reducción de área, %	Alargamiento, %	Límite de fluencia, (Mpa)	Esfuerzo último, (Mpa)
Longitudinal	57	35	256,8	575,8
Transversal	55	35	295,2	590,8

### 1.9.2. Caracterización del acero AISI 321

Es un Acero Inoxidable austenítico, antimagnético, no templeable, con una adición de Titanio que le confiere una excelente resistencia a la corrosión bajo procesos de soldadura y trabajo a temperaturas de hasta 920 °C. (1700 °F.). La dureza Brinell para este tipo de acero varía desde 160 hasta 190. Su aplicación principal es en equipos que no sea posible someter a recocido, ó que trabajen en el rango de temperaturas de 430 °C. (800 °F.) a 820 °C. (1 500 °F.) y posteriormente sometidos a enfriamiento lento.

## APLICACIONES

Este tipo de acero tiene aplicaciones en: sistemas de escape para aviones, tanques sometidos a soldadura, partes para hornos, turbocargadores, divisiones de fuego, etc.



Las experiencias que existen en la obtención de superaleaciones de base hierro y específicamente aceros inoxidable de matriz austenítica endurecibles por precipitación son numerosas; sin embargo, estas pertenecen a aceros inoxidable laminados (serie 300 de la ASTM) que se caracterizan por poseer bajos contenidos de carbono. La literatura consultada reporta muy escasa bibliografía sobre el incremento de la resistencia al creep de superaleaciones base Fe fundidas por efectos de elementos microaleantes.

### **1.10. Trabajos precedentes**

Según plantea Jesús García L. et. al (2007) los aceros inoxidable resistentes al calor tienen una amplia aplicación por sus propiedades en la industria alimenticia, química, farmacéutica, petroquímica y otros usos. Las características del acero inoxidable son impartidas por el cromo, y algún otro elemento como el níquel. En algunos aceros inoxidable, la inoxidable o pasividad es impartida solamente por la adición del cromo. A través de los tratamientos térmicos del acero inoxidable resistente al calor tipo 310, se pueden tener estructuras duras mediante el efecto del calor y enfriamiento del agua, esperándose una precipitación masiva de carburos y una variación de dureza, ya que la temperatura establecida y los intervalos de tiempo a los cuales se somete el material son elevados, obteniéndose así estructuras duras, impartiendo así a este acero una resistencia a la fluencia.

Según plantea Damián Gatica M. et. al (2003) el acero inoxidable 310 es uno de los aceros refractario que se emplean en ampliaciones a elevadas temperaturas, por lo que poseen mayores niveles de carbono que aquellos resistentes a la corrosión en medios acuosos. Uno de los problemas que puede presentar es la formación de fases frágiles como la fase sigma, cuando es sometido a temperaturas entre 540 y 900 °C. Con el propósito de determinar la posible presencia de esta fase y sus efectos, se sometieron muestras de este acero, de 10 mm de espesor, a tratamiento térmico de homogeneización (1050 °C durante 2



horas) y a 750 °C durante 65 horas. Las probetas obtenidas de las muestras se caracterizaron mediante ensayos mecánicos, de difracción de Rayos X, de microscopía óptica y electrónica de barrido.

Foster et. al. (1991) en el metro de Bilbao, se utiliza el acero inoxidable, junto con otros materiales como el hormigón y el vidrio, para el diseño de las estaciones. Aunque el acero inoxidable está presente en todos los espacios, cabe destacar las plataformas que conectan los andenes por medio de unas escaleras imperiales. Los aceros inoxidables empleados han sido el AISI 316L y el AISI 310 debido a sus buenas propiedades de resistencia a la corrosión y de resistencia al fuego.

Echeverría Revelo. (2009) caracteriza la microestructura del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” donde analiza el comportamiento microestructural del acero Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77). En el cual se utiliza el estudio del método de Elementos Finitos mediante el software COSMOS, así como también el desarrollo de las Técnicas de Análisis Químico, Microscopía Óptica, Ensayos de Dureza (HRB) y Microdureza (HVN), a través de los cuales se demuestran los cambios que existen en su estructura, y la distribución de tensiones por efecto del gradiente de temperatura al llevarse a cabo el proceso de enfriamiento de mineral.

Se analiza el desgaste y la temperatura como dos de las principales causas que provocan el deterioro del material.

Isandra Nicó Rodríguez (2009) trabaja sobre la capacidad de adsorción del carbón pirolizado a través de conchas de coco, debido a su capacidad de adsorción se utiliza en la recuperación de metales preciosos (oro), en la adsorción de sustancias radiactivas, en la potabilización del agua, purificación de aguas residuales, en el tratamiento de residuales textiles, en la biotecnología, en la adsorción de vapores orgánicos, en las máscaras antigases y en la purificación industrial de gases y vapores con vistas a la eliminación de sustancias



contaminantes, en la absorción de iones metálicos níquel y cobalto contenidos en soluciones de sulfatos de ambos metales con vista a la recuperación de los mismos. Pero también hay que plantear que el carbón activado producido a través de las conchas de coco y vegetal es muy utilizado en la industria de la medicina y la biotecnología para su uso en diferentes productos farmacéuticos y medicinales.

Pedro J. Villegas Aguilar. et. al. (2000) plantea en este sentido, la obtención de carbón activado a partir de los abundantes residuos fibrosos generados en el procesamiento de la caña de azúcar que es de gran interés, dado que permite simultáneamente disponer de los mismos y obtener productos de mayor valor agregado necesarios en la refinería. Sin embargo, la preparación de carbones activados a partir de residuos fibrosos de la industria azucarera ha sido poco investigada, considerándose solo el empleo de bagazo de caña de azúcar como precursor.

El AISI 321 SS se ha utilizado en la desulfurización en procesos en las plantas de petróleo debido a su buena resistencia a la corrosión y apropiada propiedades mecánicas a la temperatura de funcionamiento de 380 °C. Sin embargo, a pesar del hecho de que este acero contiene el titanio ha de combinar con el carbono para evitar la precipitación, un caso práctico estudiado previamente demuestra que el AISI 321 con un uso inadecuado después un año de operación, debido a la sensibilización severa, propuesto por (Kyung Seon et al. 2003).

En 1908 P. Monnartz (Alemania) estudió la influencia del contenido de carbono en la resistencia a la corrosión de los aceros hierro-cromo y los resultados de su investigación revelaron que el carácter de inoxidable de estos materiales era una función del fenómeno de la pasividad (Lefèvre, 1993).

Un lugar predominante dentro de la familia de los aceros inoxidables lo ocupan los aceros inoxidables austeníticos debido a las insuperables ventajas que proporciona la combinación de la estructura austenítica monofásica con las buenas propiedades mecánicas y tecnológicas según los distintos requerimientos.



Los aceros inoxidable fundidos usualmente se dividen en dos grupos principales: los termoresistentes, pertenecientes a la serie H y los resistentes a la corrosión, pertenecientes a la serie C.

Inicialmente, problemas presentados con el comportamiento ante la resistencia a la fluencia con algunos aceros austeníticos inoxidable laminados, especialmente del tipo 321 en tuberías de supercalentamiento, condujeron a investigaciones que determinaron el surgimiento de la serie H como resultado de las modificaciones realizadas por el American Casting Institute (ACI) al aumentar el contenido de carbono en aceros de la serie 300. Ello permitió garantizar buena rigidez y elevada resistencia mecánica en elementos muy cargados a grandes temperaturas (Peckner y Bernstein, 1994).

Dentro del total de la producción mundial de aceros inoxidable, el 52 % pertenece a los aceros austeníticos inoxidable al cromo-níquel. La selección de estos materiales para aplicaciones que implican resistencia a la corrosión a altas temperaturas requiere de un conocimiento profundo sobre los mecanismos y la cinética de la formación de capas superficiales, su composición química, estructura, mecanismos de difusión, etc. Todos estos factores y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas permiten la adecuación del acero para usos específicos (De Meyer et al., 2001).

Se denominan inestabilidades metalúrgicas a los cambios que ocurren en la estructura metalográfica originados por permanencias a altas temperaturas. Estas inestabilidades provocan focos que incluyen transiciones de fracturas transgranulares a intergranulares, recristalización, envejecimiento, precipitación o descomposición de fases, retardo de las transformaciones en el equilibrio de fases, oxidación, corrosión intergranular, agrietamiento por corrosión bajo tensión y contaminación por trazas de elementos, entre otras Saxena, (1998); Beddoes y Gordon, (1999). Cuando un material es muy propenso a estos cambios a elevadas



temperaturas, se modifican y disminuyen las propiedades que lo caracterizan por el surgimiento o aparición de estructuras anómalas.

La fragilización en caliente de aceros austeníticos es un fenómeno muy investigado desde la década de los 50. Roturas catastróficas producidas en tuberías, depósitos, recipientes a presión, equipos para el trasiego de fluidos y otros muy comunes en plantas químicas, energéticas y metalúrgicas, han dado lugar a que se destinen cuantiosos medios y recursos al estudio de la relación entre el carácter de la rotura de elementos fabricados de aceros austeníticos inoxidables y su microestructura (Lai 1992).

Muchas han sido las causas aparejadas a roturas de componentes de hornos industriales en condiciones de servicio, sin embargo, la más común encontrada en la literatura es la fragilización en caliente por procesos de solidificación, envejecimiento, fluencia, fatiga o corrosión bajo tensión.

Naumann (1998), realiza un análisis de la problemática planteando que la falla de componentes de hornos como bandejas, soportes y mecanismos agitadores está asociada a la fragilización por precipitación de fases producto del envejecimiento, pero sin llegar a realizar un estudio detallado del fenómeno.

Estudios de fallas de aceros austeníticos por precipitación de fases sigma bajo condiciones de operación en plantas petroquímicas, del cemento y hornos para tratamiento de metales fueron realizados por (Mazorra et al., 1989 b; Powell et al., 1995; Million et al., 1997 y Zhang, 1999); pero solo se refieren componentes fabricados con aceros de las series 200 y 300 del American Iron and Steel Institute (AISI).

(Hall et al., 1986; Hamano, 1988; Li, 1989; Shah et al., 1990; Brown, 1994 y Mannan et al., 1996), han estudiado las características de fracturas en aceros austeníticos de la serie 300. Sin embargo, a pesar de que estos autores caracterizan y asocian las fracturas a fenómenos de envejecimiento durante



ensayos de creep (fluencia) y a la presencia de fases sigma, sus resultados sólo se asocian a fallas ocurridas en uniones soldadas.

La precipitación de fases endurecedoras y sus efectos sobre las propiedades fueron estudiadas por Hiller y Qiu, (1991). Estos autores establecieron las propiedades termodinámicas de los sistemas Fe-Cr-C, Fe-Cr-Ni-C y Fe-Cr-Mn-N y propusieron modelos termodinámicos para energías de Gibbs de las fases individuales, prestando especial atención a la solubilidad y precipitación de carburos y fases sigma en la austenita bajo distintas condiciones.

Lai, (1992); Botella et al., (1997-1999) y Bilmes, (2000), obtuvieron relaciones estequiométricas de fases sigma empleando técnicas de microanálisis en aceros del tipo AISI 309, 310 y 316 sometidos a procesos de oxidación y envejecimiento en condiciones de atmósfera natural a escala de laboratorio durante tiempos de hasta 1000 horas.

Importantes contribuciones al conocimiento de algunas de las regularidades manifestadas en roturas de componentes fabricados con aceros fundidos de la serie H realizan Ebert, (1976) y Roach y Van Echo, (1981). Como aportes importantes, Ebert se refiere a problemas de agrietamiento en tubos de hornos de pirólisis fabricados de HK 40 durante procesos de recuperación por soldadura a la intemperie y los efectos de las fases de carburos en la reducción de la ductilidad de la aleación a temperatura ambiente como consecuencia de la exposición de la aleación a elevadas temperaturas durante tiempos prolongados.

Otro acercamiento al conocimiento de las características de los aceros de la serie H después de ensayos de fluencia lo proporciona Davis, (1997), al mostrar micrografías de aceros austeníticos fundidos del tipo HH y HK-40 después de ensayos de creep con tiempos de rotura de hasta 1000 horas. En este caso, sólo se reporta la presencia de fases sigma en la aleación HH sin profundizar en otras cuestiones esenciales como la estequiometría, composición y el mecanismo de precipitación, entre otras.



Independientemente de los progresos experimentados en el conocimiento teórico de la resistencia mecánica de los metales a altas temperaturas, no existe mejor recurso que seleccionar juiciosamente las tensiones de diseño a partir de los datos experimentales. Sin embargo, con frecuencia, es necesario disponer de datos de resistencia mecánica a temperaturas elevadas para condiciones no ensayadas experimentalmente (Kwon et al., 1999).

Al examinar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en frío se puede observar que a cada valor de tensión, le corresponde una determinada deformación. Sin embargo, en realidad cualquier material bajo la acción de una tensión constante puede, en determinadas condiciones, deformarse progresivamente con el tiempo. Este fenómeno recibe el nombre de fluencia (Boyle y Spence, 1989).

Han sugerido diversas expresiones tiempo-temperatura para predecir el comportamiento en fluencia lenta o rotura a largos plazos a partir de ensayos de corta duración, siendo la utilización del parámetro de Larson-Miller (LM) el método más difundido y utilizado (Diéter, 1979; Colangelo y Heiser, 1994; Peckner y Bernstein, 1994; Pero-Sanz, 1996 y Davis 1997). Matemáticamente, el parámetro LM tiene la forma

$$LM = T (C + \log t)$$

Donde:

T = Temperatura de ensayo, (K).

C = Constante experimental que depende del tipo de material ( $15 \leq C \leq 22$ ) para los distintos materiales metálicos.

t = tiempo de ensayo, (h).

### **1.11. Resistencia a la corrosión de los aceros**

En la actualidad se acepta que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables (que contienen siempre un elevado porcentaje de cromo), es producto a



la formación de una capa superficial de óxido de cromo muy fina, que impide que la corrosión de los aceros penetre del exterior hacia el interior. Para que un acero sea inoxidable, es necesario que estén presentes los factores de composición, estado del material y medio de ataque, convenientes para que se forme la capa de óxido protector.

Cuando actúan sólo los agentes atmosféricos, la presencia del 12 % de cromo es suficiente para que se forme la capa de óxido que impide la corrosión producida por el medio ambiente y la acción de agentes corrosivos débiles. Al aumentar la intensidad del ataque, para que se pueda formar una capa de óxido suficientemente protectora, es necesario mayor porcentaje de cromo, pero esto ocurre hasta un cierto límite a partir del cual ya no se aumenta la resistencia a la corrosión y es necesario adicionar otros elementos como níquel, molibdeno, titanio, etc, según sea el caso.

#### **1.11.1. Tipos de corrosión en los aceros inoxidables**

Los tipos de corrosión que pueden afectar a los aceros inoxidables son los siguientes:

- Corrosión generalizada
- Corrosión localizada
- Corrosión intergranular
- Corrosión por picaduras
- Corrosión galvánica
- Corrosión bajo tensiones
- Corrosión por grietas.



---

## CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Se demostró con los trabajos consultados que la durabilidad de los aceros que se someten a condiciones severas de temperatura depende de sus propiedades mecánicas; y que estas propiedades varían conforme al tiempo de permanencia de los materiales bajo la acción de las altas temperaturas.



## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Los diferentes tipos de aceros poseen diversas propiedades en dependencia de su composición química, y las propiedades que se les hayan atribuido mediante tratamiento térmico u otro tipo de tratado. En este capítulo se realizará el diseño de los métodos a utilizar para el estudio del material en cuestión, en correspondencia con lo planteado en el capítulo anterior. A través del empleo de técnicas microestructurales, así como la realización de ensayos de dureza que permita establecer la relación composición-estructura-propiedades de la aleación y sus efectos sobre la ocurrencia de roturas y el tipo de falla que se manifiesta en los mismos.

En este capítulo se plantea como objetivo:

Fundamentar los métodos, procedimientos y condiciones en las que se realizará el estudio químico físico y estructural del material utilizado en el horno de tambor rotatorio de la Empresa de Carbón Activado de Baracoa.

### **2.1. Generalidades del proceso investigativo**

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de un procedimiento general, no solo basta con la elección del material y su valoración física, química y estructural. También se requiere tener en cuenta la teoría de la toma de decisiones y el flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles y criterios tecnológicos en lo referente al comportamiento microestructural de materiales.

Se establece el diseño del plan experimental y se describen las normas y procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el comportamiento microestructural del material de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la planta de carbón activado de Baracoa.



## 2.2. Método de emisión óptica y clasificación de material.

Se seleccionó el material de construcción de los levantadores y toberas del horno, el cual está en análisis, debido a que es el material que ha resistido más la acción de las condiciones de trabajo del proceso después de haber probado por el método de tanteo varios tipos de aceros. El análisis químico se realizó con el empleo de un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, Moa, cuya foto se puede observar en la figura N° 2.1. En este análisis se determina la composición química mediante el método de emisión óptica para aceros de baja aleación, aceros aleados, hierro fundido y aleaciones de base níquel; donde se determina la presencia de más de 20 elementos químicos. Este método es empleado en barras, planchas y piezas mayores de 12 mm de ancho y no superiores a 70 mm de largo. Para este análisis se emplea el SPECTRO-LAB.

En este ensayo se suministra una intensidad de corriente a los electrones que conforman un átomo, estos se excitan y pasan de un nivel de energía inferior a otro superior con una emisión de luz y color. La luz de la cámara de chispeo es transmitida por una fibra óptica hasta la ranura de entrada, esta hendidura deja pasar la luz hasta la rejilla que transforma la misma en sus longitudes de onda. Las hendiduras de salida están posicionadas en el círculo de Rowland para dejar pasar solo las longitudes de onda de su interés, esta luz es captada por los fotomultiplicadores y la convierten en un flujo de electrones.

Dentro de las principales características del SPECTRO-LAB se encuentran: calidad del argón de 99,998 % de pureza, voltaje (v) de 220 a 230 de corriente alterna  $\pm 10$  %, frecuencia de 50 a 60 Hz, temperatura de trabajo de 6 a 40 °C, humedad del aire del 20 al 80 % y un peso de 400 kg.



**Figura 2.1. SPECTRO-LAB.**

Para el análisis químico se utilizó una pequeña probeta, cuya imagen representativa del material se puede observar en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Imagen del acero analizado**

## **2.3. Preparación metalográfica de las probetas**

### **2.3.1. Generalidades**

La metalografía microscópica estudia las características estructurales y de constitución de los productos metalúrgicos con la ayuda del microscopio metalográfico, para relacionarlos con sus propiedades físicas y mecánicas. La parte



más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta pulida y atacada con el empleo de aumentos, que con el microscopio óptico, oscilan entre 100 y 2000X.

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución del metal o aleación, donde se determinan características tales como: forma, tamaño y distribución de granos, inclusiones y microestructura metalográfica en general. La microestructura puede reflejar la historia completa del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal. La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de los granos, revenir un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características del metal.

Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

- Selección de la muestra
- Toma o corte de la muestra
- Montaje y preparación de la probeta
- Ataque químico a la probeta
- Análisis microscópico
- Obtenciones micrográficas.

### **2.3.2. Selección de la muestra**

La localización de la parte que va a ser examinada es de gran importancia, ya que ha de lograrse una probeta representativa del material a examinar. La probeta seleccionada debe ser de la característica del metal estudiado y servir para el fin a que se dirige tal estudio con la selección adecuada de la región de la zona que pueda dar el máximo de información para realizar con éxito el estudio propuesto.



El tamaño adecuado de la probeta debe ser tal que pueda sostenerse con la mano durante su preparación.

### **2.3.3. Toma o corte de la probeta**

La probeta se obtiene de un retaso de la plancha que se utilizó para los levantadores y las toberas. Para tomar la muestra se realizó el corte con una segueta, donde se tuvo la precaución de evitar el calentamiento que puede ocasionar alteraciones estructurales.

### **2.3.4. Montaje de la probeta**

Se hace en materiales plásticos sintéticos como bakelita, lucite, o acrílico isotérmico que después del moldeo son relativamente duros y resistentes a la corrosión y no causan empastamiento de los papeles abrasivos durante el desbaste y pulido.

### **2.3.5. Operación de desbaste**

Es la operación siguiente al corte y al montaje de la probeta y se efectúa en una desbastadora de cinta rotativa o sobre papeles abrasivos de diferentes grados, colocados sobre discos giratorios.

Al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la probeta 90 grados y desbastar hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, donde se tiene siempre el cuidado de lavar la probeta con agua abundante. Se aconseja pasar la probeta por toda la serie de abrasivos: 150, 220, 280, 320, 400, 500, y 600, pues eliminar algún abrasivo retarda la operación en vez de acelerarla.

Una presión excesiva sobre el papel abrasivo puede causar rayas profundas y difíciles de eliminar posteriormente, además se provoca una distorsión intensa sobre el metal de la superficie, con la alteración del aspecto de la estructura. Esta



distorsión no se puede evitar completamente pero puede reducirse mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido.

Conviene emplear un papel abrasivo nuevo para cada probeta, los papeles usados se emplean para finalidades específicas porque sus partículas abrasivas desgastadas tienden a producir distorsión del metal superficial. También debe tenerse en cuenta que la superficie opuesta de la probeta debe ser paralela para facilitar el soporte en el microscopio.

Al final del desbaste, deben lavarse con agua abundante tanto las probetas como las manos del operador para evitar que las partículas del abrasivo o del metal en la etapa del desbaste pasen a las pulidoras lo cual los haría inservibles.

Antes de atacar la probeta debe realizarse el pulido y luego desengrasarse con alcohol y secarse con aire frío o caliente.

### **2.3.6. Pulido de la probeta**

Tiene por objeto, eliminar las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento a espejo.

El éxito del pulido y el tiempo empleado en la operación, depende en gran parte del cuidado con que se haya realizado el desbaste. Si una probeta tiene rayas profundas que no se han eliminado en las últimas operaciones de desbaste, no podrán ser eliminadas durante el pulido con pérdida de tiempo y trabajo.

La forma de realizar el pulido es con el apoyo de la cara desbastada de la probeta sobre un paño con una suspensión del abrasivo y fijado a un disco que gira accionado por un motor.

Como paños pueden emplearse el paño de billar, el raso, la seda, el terciopelo, y otros que corresponden a nombres comerciales como Selvit, Gamal, Kansas, Microcloth. Como abrasivo puede usarse una suspensión acuosa de alúmina, óxido de cromo, óxido de hierro, óxido de magnesio, o para materiales muy duros una



suspensión de polvo de diamante en aceite mineral. El tamaño de la partícula abrasiva en suspensión oscila entre 100 y algunas décimas de micrón.

La presión a aplicar sobre la probeta, depende de la dureza de la aleación y debe disminuirse a medida que avanza el pulido, deberá ser tal que se logre hacer desaparecer en unos pocos minutos las rayas del último papel abrasivo (600) con el cuidado de no excederse en la presión debido al peligro de desgarramiento del paño.

Debe lavarse la probeta en un chorro de agua caliente, secar con ayuda de un secador, sin tocar la cara pulida, enjuagarla con alcohol y secarla finalmente con aire seco o caliente. Observar en el microscopio a 100 aumentos; si persisten las rayas provenientes del desbaste en el último papel abrasivo, continuar con el pulido en la forma ya descrita todo el tiempo que sea necesario para que estas desaparezcan.

La combinación adecuada de estas variables, permitirá alcanzar un adecuado pulido, aunque difícilmente se logre evitar algo de distorsión; para eliminar esta última no queda otro recurso que el de ataque y pulido alternados.

### **2.3.7. Ataque químico a la pieza**

Para el ataque químico, se toma la probeta con la pinza y se sumerge con la cara pulida hacia abajo en el reactivo de ataque contenido en el cristalizador. Se extrae, se lava con alcohol, se seca y se observa al microscopio, se registra el campo observado a diferentes aumentos. Se vuelve a pulir y se repite la operación descrita anteriormente con el mantenimiento sucesivo de la probeta sumergida durante 2; 10; 20; 40 y 80 segundos, se realiza el registro del campo observado después de cada ataque. Mediante el ataque es posible poner de manifiesto el tamaño, forma y distribución del grano (fases o microconstituyentes), las heterogeneidades en la estructura y las segregaciones.



### **2.3.8. Tipos de reactivos utilizados**

Para el ataque químico se utilizó el ácido nítrico con el empleo de 5 cc de este, en el que se realizaron cinco pruebas a diferentes tiempos de duración.

Otro de los reactivos utilizados fue el alcohol etílico para la limpieza de la probeta. Con la utilización de 95 cc.

### **2.3.9. Análisis microestructural**

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL, modelo NIM-100 (Figura 2.3) ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

Las especificaciones técnicas del microscopio se resumen en la tabla 2.1.2.

**Tabla N° 2.1.2: Parámetros de funcionamiento del microscopio.**

Sistema óptico	Sistema óptico infinito
Tubo de mirada	Tubo trinocular libre de compensación inclinado a 30 °, distancia intrapupilar: 48 - 75 mm.
Relación de división	20 % para una mirada binocular y 80 % para mirada de video y fotomicrografía.
Mirada ocular	Punto alto, mirada ocular de campo extra ancho con (100 X 20).
Objetivo	Plan acromático objetivo: 4, 10X; 80X.
Foco	Foco coaxial, rústico y fino, movimiento grosero de ataque: 37,7 mm refracción.
Por rotación, trazo fino	0,2 mm
Escenario	Área: 100 - 250 mm.
Regla mecánica	x/y control coaxial a la derecha, rango de movimiento: 120 (ancho) X 78 (longitud) mm.
Kohler	Lámpara halógena: 6V30N, intensidad continuamente ajustable.
Filtro	Azul, Amarillo, verde y violeta.

En la figura 2.3 se muestra la imagen del microscopio empleado para la observación de la probeta.



**Figura 2.3. Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM-100.**

### **Observación microscópica**

Permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas, y grafito.

### **2.4. Estudio de la dureza del material.**

El ensayo de dureza es realizado por un (durómetro modelo SOELAN. B. URSS - 198.), juntamente con el de tracción, uno de los más empleados en la selección y control de calidad de los metales. Intrínsecamente la dureza es una condición de la superficie del material y no representa ninguna propiedad fundamental de la materia. Se evalúa convencionalmente por dos procedimientos, el más usado en metales es la resistencia a la penetración de una herramienta de determinada geometría.

El ensayo de dureza es simple, de alto rendimiento ya que no destruye la muestra y particularmente útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material.

Los métodos existentes para la medición de la dureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada (penetrador), por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular (definir) la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como: tipo,



dimensiones de la muestra y espesor de la misma. El análisis se realiza en un equipo llamado durómetro, del cual se muestra una foto en la figura 2.4.



**Figura 2.4. Durómetro**

Existen varios tipos de dureza, las cuales se les pueden realizar a los materiales, tales como.

#### **2.4.1. Dureza Vickers.**

Este método es muy difundido ya que permite medir dureza en prácticamente todos los materiales metálicos independientemente del estado en que se encuentren y de su espesor.

El procedimiento emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. Tal penetrador es aplicado perpendicularmente a la superficie cuya dureza se desea medir, bajo la acción de una carga ***P***. Esta carga es mantenida durante un cierto tiempo, después del cual es retirada y medida la diagonal ***d*** de la impresión que quedó sobre la superficie de la muestra. Con este valor y con la utilización de tablas apropiadas se puede obtener la dureza Vickers, que es caracterizada por ***HV*** y definida como la relación entre la carga aplicada (expresada en kgf) y el área de la superficie lateral de la impresión.

El número de dureza (HV) se determina a través de la ecuación 2.1:



$$HV = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:

P: es la carga que actúa sobre la pirámide.

α: el ángulo entre las caras opuestas de la pirámide

d: el promedio aritmético de dos diagonales de la huella en mm, medidas con un microcopio especial después que la carga deja de actuar.

**2.4.2. Dureza Brinell.**

En el ensayo de dureza Brinell una bola penetradora de cierto diámetro D, es presionada a la superficie de la pieza de prueba, con el uso de una presión pre-estipulada F, y el diámetro de la penetración en el material (d) es medida después que la fuerza ha sido removida. El tiempo de la aplicación inicial de la fuerza varía de 2 a 8 segundos, y el ensayo de fuerza es mantenido por 10 a 15 segundos.

El número de la dureza Brinell se obtiene de dividir la fuerza del Test por el área del casquete esférico grabado por el penetrador y el diámetro de la huella impresa en la pieza de prueba. La fórmula para determinar la dureza brinell es como se muestra en la ecuación 2.2.

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

D: diámetro de la bola

P: la carga aplicada.



### 2.4.3. Dureza Rockwell.

El método se basa en la medición de la profundidad de penetración de una determinada herramienta bajo la acción de una carga prefijada. El número de dureza Rockwell (**HR**) se mide en unidades convencionales y es igual al tamaño de la penetración sobre cargas determinadas. El método puede utilizar diferentes penetradores (penetrador de bola), los cuales son esferas de acero templado de diferentes diámetros o conos de diamante. Una determinada combinación constituye una "escala de medición", caracterizada como **A, B o C**, etc. y siendo la dureza un número arbitrario será necesario indicar en que escala fue obtenida (**HRA, HRB, HRC**, etc.).

La carga total **P** es aplicada sobre el penetrador en dos etapas: una previa **P<sub>0</sub>** y una posterior **P<sub>1</sub>** tal que:

$$P = P_0 + P_1 \dots\dots\dots(2.3)$$

Inicialmente el cono penetra en la superficie una cantidad **h<sub>0</sub>** sobre la acción de la carga **P<sub>0</sub>** que se mantendrá hasta el fin del ensayo. Esta penetración inicial permite eliminar la influencia de las condiciones superficiales.

A continuación se aplica la carga **P<sub>1</sub>** y la penetración se acentúa. Finalmente la carga **P<sub>1</sub>** es retirada y la profundidad **h** restante (solamente actúa **P<sub>0</sub>**) determina el número de dureza **HR**. La escala de los instrumentos de lectura empleados en las máquinas está invertida para permitir una lectura directa.

En los certificados de calidad es común utilizar la escala **HRB** donde el cono de diamante es reemplazado por una esfera de 1/16" y la carga **P<sub>1</sub>** vale 100 kgf.

En casos de materiales muy finos donde la carga de 100 kgf es muy elevada, lo que puede inclusive perforar la muestra, es utilizada la escala Vickers con una carga de 10 kgf; y luego efectuada la transformación a la escala **HRB** con la



utilización de tablas de conversión adecuadas. Para determinar este tipo de dureza se utilizan las ecuaciones (2.4 y 2.5).

$$HR = 100 - e \dots\dots\dots(2.4)$$

Al medir en las escalas de B y C

$$HR = 130 - e \dots\dots\dots(2.5)$$

Donde:

$$e = \frac{h - h_0}{0,002} \dots\dots\dots(2.6)$$

$h_0$ : es la profundidad de la penetración de la punta en el material que se ensaya bajo la acción de la carga  $P_0$ .

$h$ : la profundidad de penetración de la punta en el material que se ensaya bajo la acción de la carga total  $P$ .



### 2.4.3.1. Ensayo de dureza Rockwell (HR).

En este ensayo se usó un penetrador de carburo de tungsteno como bola de 1/16 de pulgada y un cono de diamante cuyo ángulo en la base es de 120 °. El penetrador es forzado contra el material con una fuerza preliminar menor llamada  $F_0$  usualmente de 10 kgf. Cuando el equilibrio ha sido alcanzado, un dispositivo indicador, que sigue los movimientos del penetrador y también responde a los cambios en la profundidad de la penetración del indentador a una posición establecida. Cuando la carga menor preliminar es todavía aplicada, una carga mayor es aplicada lo que resulta un incremento en la penetración. Cuando el equilibrio es de nuevo alcanzado, la fuerza adicional se quita, pero la fuerza preliminar es todavía mantenida. El removimiento de la fuerza adicional mayor crea un recubrimiento parcial, que reduce la profundidad de la penetración. El incremento permanente en la penetración resulta de la aplicación y removimiento de la fuerza mayor adicional usada para calcular el grado de dureza Rockwell:

$$HR = E - e \dots\dots\dots(2.7)$$

Donde:

$F_0$ : fuerza menor preliminar

- $F_1$ : fuerza mayor adicional
- $F$ : fuerza total
- $e$ : incremento permanente en la profundidad de la penetración debido a la mayor fuerza  $F_1$ , medida en unidades de 0,002 mm
- $E$ : una variable dependiente de la forma del indentador: 100 unidades para el indentador de diamante, 130 unidades para la bola de acero
- HR: número de dureza Rockwell
- $D$ : diámetro de la bola de acero.



## 2.5. Estudio de la resistencia del material

Al material en cuestión también se le realizó ensayos de resistencia a la tracción y flexión. Para ellos se utilizó una porción del material en análisis, la misma posee las siguientes dimensiones de 25 x 90 mm de ancho y largo respectivamente, y un espesor de 5 mm, cuya muestra se observa en la figura 2.5.



Fig 2.5. Esquema de la pieza utilizada para el ensayo de resistencia.

### 2.5.1. Ensayo de tracción

Este tipo de ensayo se realiza en una máquina de marca (DNS 200) figura 2.6 con un motor de salida que utiliza un reductor del tipo 328L, Gear (345L, 525L), Serew Nose (HTD-1600-8M). La máquina puede realizar exámenes de tracción, compresión y doblado. Ella mide la deformación a través de extensómetros o foto celdas, la deformación es desde 0 hasta 25 mm. La información se obtiene a través de un software que obtiene las curvas de la deformación en función de la carga, además se registra el tiempo que demora en deformarse la probeta; y la data completa en excel. Para realizar el ensayo de tracción a la probeta, se fija en los cierres de la máquina mediante cuñas o casquillos. Los cierres en la máquina se proyectan de tal manera que eliminan la inclinación de la probeta y garantizan, dentro de ciertos límites, la transmisión central de la fuerza sin flexión suplementaria. Este ha obtenido amplia difusión para los aceros de construcción, metales no ferrosos y sus aleaciones. En las especificaciones para el acero de construcción y muchos metales no ferrosos y sus aleaciones, como regla general,



se prevén las exigencias a las propiedades mecánicas, obtenidas durante los ensayos de tracción.

Para los ensayos de tracción se usan muestras Standard (principalmente de sección circular o rectangular). Las máquinas de ensayo tienen un computador con un software que dibuja el diagrama de tracción, es decir, la variación de la longitud de la muestra en función del esfuerzo aplicado.



**Figura 2.6. Máquina de análisis de los ensayos de resistencia DNS 200**

### **2.5.2. Ensayo de flexión**

El ensayo de la flexión o deformación se puede realizar en la misma máquina figura 2.6, al mismo tiempo en que entre estos tipos de carga (la que origina solamente fuerzas normales en la secciones transversales de la barra, y en el caso de sistemas de cargas exteriores que se reducen a una resultante  $P$  dirigida a lo largo de la barra) pueden existir diferencias cualitativas, como por ejemplo, al estudiar los procesos de rotura de los materiales, o al investigar el comportamiento de barras largas y esbeltas, en las cuales la compresión va acompañada generalmente de la flexión o deformación.

Hasta ahora al hablar de los ensayos de probetas a tracción nos ocupamos solamente de la parte exterior del fenómeno, sin profundizar en los procesos



interiores que tienen lugar en el material. No obstante al carácter de la función  $P=f(\Delta l)$ , se le puede dar una interpretación física, partiendo de los conceptos sobre la estructura de los sólidos.

Para dar una valoración cuantitativa a las propiedades del material, se construye un diagrama de tracción  $P=f(\Delta l)$  en un sistema de coordenadas  $\sigma$  y  $\epsilon$ . Para esto se disminuye en  $A$  veces las ordenadas y en  $l$  veces las abscisas, donde  $A$  y  $l$  son, respectivamente, el área de la sección transversal y la longitud de trabajo de la probeta antes de ser cargada.

### **2.5.3. Herramienta de corte utilizada en el ensayo de resistencia**

Para seleccionar la herramienta de corte se debe tener presente la magnitud del trabajo a realizar, tipo de trabajo, así como las características de la pieza a elaborar (laminada, fundida, forjada), profundidad de corte, velocidad de corte, avance. Estos parámetros relacionados definirán los ángulos principales de la fresa a emplear.

#### **Parámetros geométricos de la fresa**

Diámetro de la fresa:  $D_f = 70 \text{ mm}$

$$\alpha = 15^\circ$$

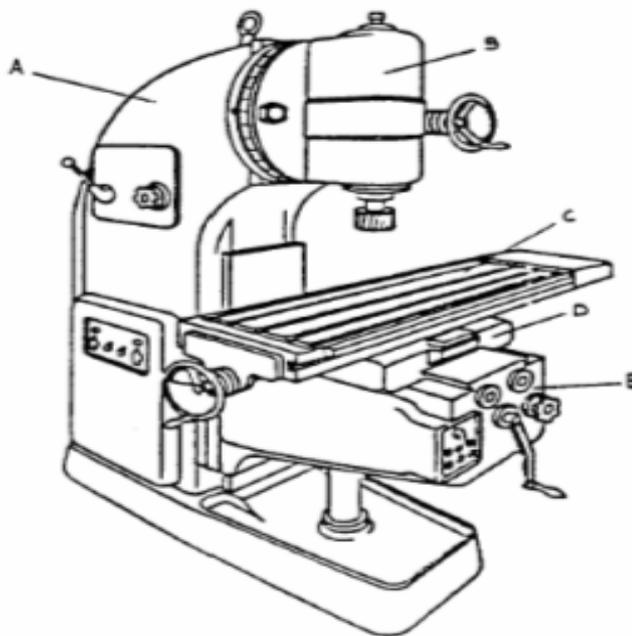
Número de dientes:  $Z = 40$

#### **Características de la fresadora**

Es una máquina herramienta donde el movimiento de corte, que es circular, corresponde a la herramienta fresadora, estas máquinas poseen su movimiento principal en la herramienta. En la figura 2.7 se detallan las características principales de la fresadora 6 H 12  $\Gamma$ , cuyas características principales se muestran a continuación:

Fresadora vertical modelo. . . . . 6 M 12  $\Gamma$

Superficie útil de mesa. . . . .	320 x 1250 mm.
Potencia del motor. . . . .	Nm = 7 kW.
Rendimiento de la fresadora. . . . .	h= 0,8.
Frecuencia de rotación del husillo. . . . .	100 (r/min)



**Figura 2.7. Representación de la fresadora 6 H 12 Γ:** A, columna; B, cabezal orientable; C, mesa longitudinal; D, carro transversal; E, ménsula.

## CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2

Con el estudio de los materiales y métodos utilizados en la investigación se puede concluir que:

- ❖ Se fundamentaron las propiedades a investigar para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación.



- ❖ La realización de los ensayos anteriormente señalados permite obtener una información detallada acerca de la composición química, la dureza y resistencia del material analizado.



---

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

En este capítulo se establece el conjunto de criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de la hipótesis planteada, como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la observación o realización de los experimentos y ensayos.

Se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, se describen las propiedades químicas, físicas y mecánicas del acero de la serie 300 (AISI 321), en las condiciones descritas en los experimentos. El análisis de estos resultados permite evaluar las propiedades de este tipo de acero.

El objetivo del capítulo es:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

### **3.1. Análisis de la composición química de la pieza.**

Al material de construcción de los levantadores y toberas del horno, se le realizó el análisis químico con el empleo de un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, este ensayo fue realizado en el laboratorio del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, en un equipo como el descrito en el capítulo 2.

De dichos experimentos se pudo obtener la composición química que se muestra en la tabla N° 3.1.

**Tabla N° 3.1: Composición química de la muestra AISI 321 obtenida en el análisis.**

<b>Elementos</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
<b>Composición química; %</b>	0,06	0,51	0,21	0,030	0,018	18,31	0,18
<b>Elementos</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
<b>Composición química; %</b>	9,96	0,060	0,10	0,19	0,5293	0,04	0,11
<b>Elementos</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Fe</b>	<b>Fe3int</b>	
<b>Composición química; %</b>	0,003	0,001	0,022	<0,001	69,68	CHECK	

Con el resultado de la tabla se confirma que el material a emplear en los experimentos es un acero del tipo AISI 321 con una estructura metalográfica austenítica. Esto pudo ser identificado por el contenido de cromo que es de un 18,31 % y carbón de 0,06 %, los cuales están en el rango de la norma establecida para este tipo de acero, y es el componente principal que determina la resistencia a la corrosión de los aceros a elevadas temperaturas. Además se corrobora con las informaciones que se poseen de las investigaciones realizadas a los aceros de la serie 300.

### **3.2. Análisis de la elaboración mecánica de las probetas**

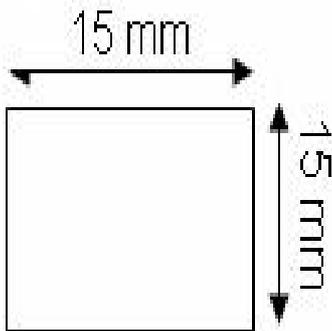
#### **3.2.1. Corte de las probetas**

Para la realización de los análisis del material hubo que cortar varias probetas, para el análisis de microscopía óptica se realizó el corte de tres probetas de 15 X15 mm con una segueta manualmente. Además se realizó el corte de otra probeta con el objetivo de realizar los ensayos de tracción y flexión con una

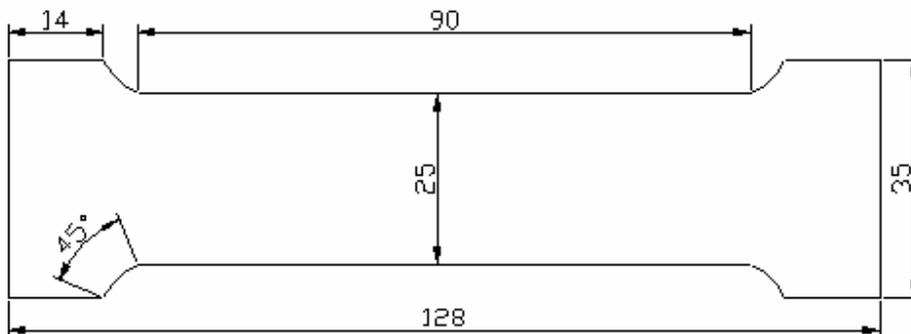


fresadora vertical modelo 6 H 12 Г a una longitud, con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad. Todo esto tomando en cuenta que el acero AISI 321 es un material de buena maquinabilidad y permite un buen acabado superficial.

En la Figura 3.1 se observa la dimensión de las probetas utilizadas para el análisis metalográfico, estas se prepararon según la norma ASTM E 3-95, y en la figura 3.2 se pueden ver las dimensiones de la probeta utilizada en los ensayos de resistencia. En cada una de estas probetas se puede observar la dimensión exacta de cada parte de la misma. Específicamente en la figura 3.2 se puede observar el ángulo de curvatura que debe poseer la probeta que va a ser analizada, por exigencia del tipo de ensayo.



**Figura 3.1. Dimensiones de la probeta del experimento.**



**Figura 3.2. Dimensiones de la probeta utilizada en los ensayos de resistencia.**



### **3.2.2. Análisis del desbaste y pulido para la observación micrográfica**

Para la realización de este análisis se tuvo en cuenta las características de las probetas en cuanto al espesor de las mismas, el montaje en un dispositivo de fibra previamente maquinado, con el objetivo de lograr la mayor uniformidad posible en el desbaste y pulido.

En el desbaste primeramente se obtuvo una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de la máquina pulidora y papeles abrasivos del tipo No. 180, 400 y 600 (ISO 9001), lo que varía la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, donde se monta la lija sobre una placa de vidrio, lo que cambia el sentido del lijado  $90^{\circ}$  al pasar de un pliegue a otro y se elimina la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

Por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL (ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM). Para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usado como sustancia abrasiva de óxido de cromo.

### **3.2.3. Análisis del lavado y del desgrasado**

Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, y secada con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono para eliminar todo vestigio de grasa y pastas de pulir.

### **3.2.4. Análisis del ataque químico**

El ataque químico se realizó con el objetivo de resaltar la estructura metalográfica del acero. Para este ataque se utilizó ácido nítrico con vista a eliminar las impurezas, residuos o agentes contaminantes que puedan quedar en la superficie de la pieza que permitan entorpecer o distorsionar la visión óptica al material, además la acción de este ácido permite resalta los diversos constituyentes



estructurales y el contorno de los granos del acero 321, y según AISI-ASTM pone en manifiesto las uniones de los granos de la austenita los cuales se ennegrecen y la cementita se mantiene blanca.

Además se utiliza el alcohol etílico para eliminar las grasas y la pasta abrasiva, que también pueden entorpecer el proceso del pulido de la probeta. Algunos datos de este reactivo se puede observar en la tabla 3.2.

**Tabla N° 3.2: Reactivos de ataque para examen microscópico.**

<b>Reactivos</b>	<b>Composición</b>	<b>Usos</b>
Ácido Nítrico (Nital)	5 cc	Hierros y aceros
Alcohol etílico	95 cc	Hierros y aceros

### **3.3. Análisis de la observación con microscopía óptica**

Para la observación se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 (Inverted metallurgical microscope), ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. La observación se realiza con el empleo de distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas.

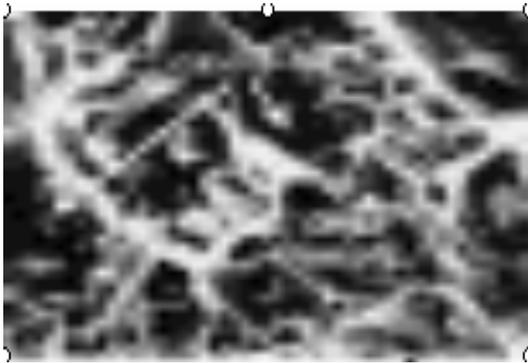
Para colocar las probetas en el microscopio se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió una nivelación adecuada de estas.

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero, y según AISI-ASTM.



Fueron observadas las probetas en el centro, y en los bordes, de acuerdo con el diseño expuesto en el capítulo anterior, con rangos de aumento de 100X y 300X para cada probeta.

Se analizará el comportamiento de las probetas en correspondencia con lo observado en la superficie de la misma. En la figura 3.3 se puede observar la muestra de la microestructura de la probeta analizada.



**Figura. 3.3. Imagen de la probeta observada en el microscopio.**

A partir del análisis representado de la probeta, se pueden observar los granos de austenita y cementita que son las fases principales del acero austenítico AISI 321. En la cual además se puede observar que los granos de austenita es la parte ennegrecida de la probeta, mientras que la cementita está representada por los contornos blancos que refleja la imagen.

#### **3.4. Análisis de los ensayos de dureza**

En consideración con los resultados obtenidos del comportamiento del material (AISI 321), las muestras fueron sometidas a varios tipos de ensayos, donde a las mismas se le encontraron diferentes tipos de dureza (dureza vickers, dureza brinell y dureza rockwell), los resultados aparecen reflejados en la tabla N° 3.3.

**Tabla N° 3.3: Resultados obtenidos en el método de dureza.**

<b>Tipos de durezas</b>	<b>Resultados</b>
Dureza Vickers	170 HV
Dureza Brinell	162 HB
Dureza Rockwell	85 HRB

En las mediciones efectuadas, el análisis de las durezas, según comprobaciones, se determina que la muestra presenta dureza elevada, las que se corresponden con la dureza del acero AISI 321, cuya dureza (Brinell) varía en un rango desde 160 hasta 190, y como se puede observar en la tabla 3.3 este tipo de dureza está enmarcada en el rango mencionado. Las otras durezas también están dentro del rango que le corresponde para el material en análisis.

### **3.5. Análisis de la resistencia del material**

Al material, además, se le realizó los ensayos de resistencia a la tracción y a la flexión, debido a que los elementos en que se encuentra ubicado este acero están sometidos constantemente a las altas temperatura y a la acción de cargas, que aunque estas últimas no presenten una densidad muy elevada, sí pueden provocar roturas al material de los levantadores del horno de tambor rotatorio. Una muestra de la probeta utilizada para este análisis es la que se mostró en la figura 3.2.

#### **3.5.1. Resultados del ensayo de tracción**

Para el ensayo de tracción se colocó la probeta de la figura 3.2 en los cierres de la máquina mediante cuñas o casquillos, y se fijó de tal forma que no se desprendiera al aplicar la fuerza. Luego de ejecutar el ensayo quedó registrado en el software del computador la base de datos obtenida, la cual se corresponde con la fuerza aplicada a la probeta, la deformación mostrada por la misma y el tiempo de duración del



ensayo. Luego con la utilización del excel se confeccionaron los gráficos que se muestran en las figuras. 3.4, 3.5 y 3.6.

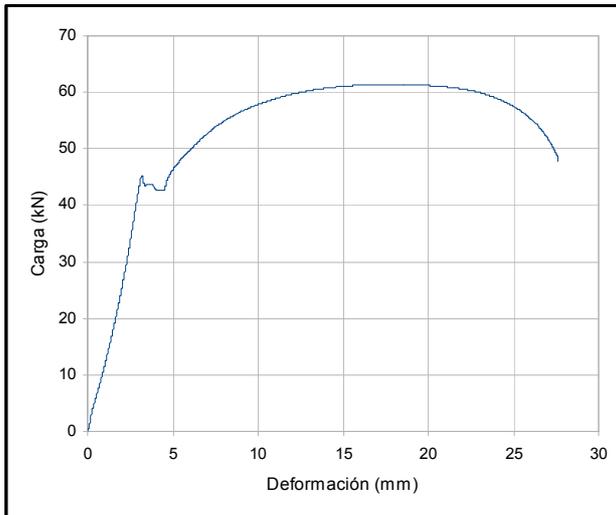
En la figura 3.4 se muestra la deformación sufrida por la probeta en función de la carga aplicada. Según la trayectoria descrita por la misma y la teoría existente de los ensayos de tracción a los materiales Feodosiev (1965), esta curva se puede dividir en 4 zonas:

En la **zona 1**, la carga va de manera ascendente, conjuntamente con la deformación desde 0 hasta 45,34 kN y desde 0 hasta 3,21 mm, la que se puede llamar *zona de elasticidad*. Aquí tiene lugar un aumento insignificante de la longitud de la probeta, con un incremento apreciable de la carga, lo que quiere decir que para este material, aplicar una fuerza por debajo de 45 kN solo se logra la deformación elástica de la misma.

En la **zona 2**, se aprecia un descenso de la carga hasta 42,64 kN, en la que la probeta sigue sufriendo una constante deformación hasta 4,45 mm cuya zona se le denomina *zona de fluencia general*. En esta zona, como ya se explicó la probeta sufrió una deformación considerable sin el aumento de la carga.

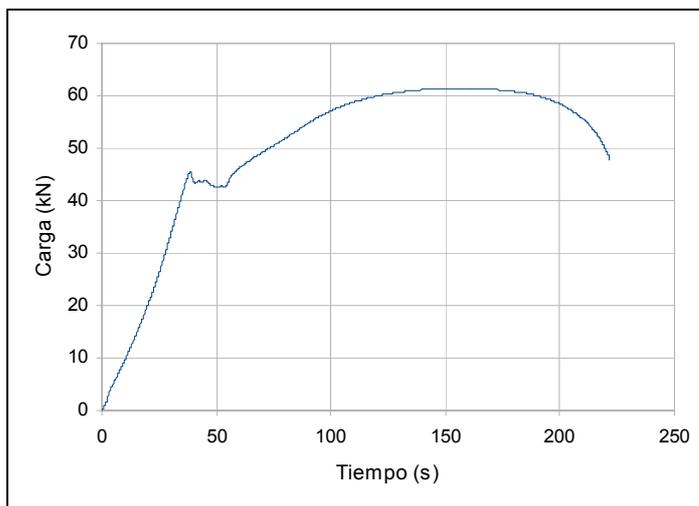
En la **zona 3** se vuelve nuevamente a aplicar la carga de manera ascendente, conjuntamente hasta una fuerza de 61,4 kN, lo que provoca una deformación hasta 18,29 mm, en esta zona ocurre un aumento de la resistencia del material, y la deformación que se produce es una deformación plástica, a cuya sección de la curva se le denomina *zona de aumento de resistencia*. En el estado de aumento de resistencia en la probeta, aparece el lugar de la futura rotura, y comienza a formarse lo que generalmente se le llama cuello, o sea, un estrechamiento local de la probeta.

En la **zona 4**, la carga va de manera descendente conjuntamente con un alargamiento de la probeta; este alargamiento lo explica, que a pesar que la carga desciende, en el centro de la probeta sigue un incremento de la tensión. A esta zona se le llama, zona de fluencia local, y es donde ocurre la rotura de la probeta en el descenso de la carga hasta 47,84 kN y la misma se pudo deformar 27,61 mm.



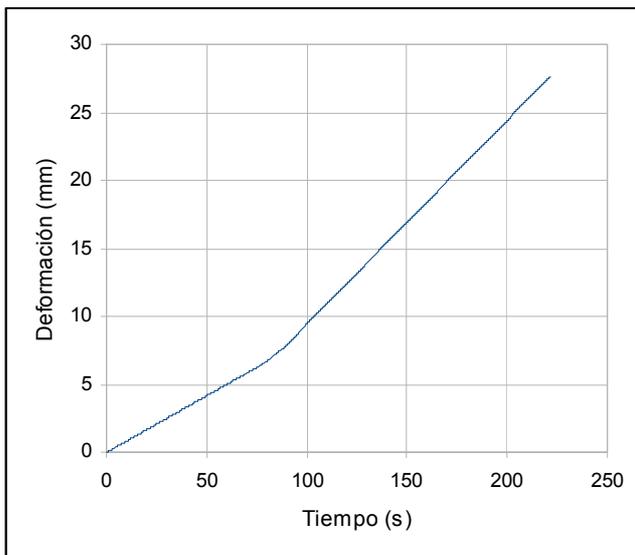
**Figura. 3.4. Resistencia a la tracción del acero AISI 321**

En los datos obtenidos del ensayo de tracción se pudo determinar la variación de la carga en función del tiempo. En la figura 3.5 se puede observar como en la zona 2 existió un significativo descenso de la carga en un intervalo de tiempo desde 38,7 hasta 53,6 s, que fue el tiempo que duró en transcurrir la zona de fluencia de la deformación. De forma general se puede observar que el tiempo que duró en deformarse la probeta es solo de 221,3 s.



**Figura. 3.5. Variación de la carga en función del tiempo**

Además se pudo graficar la dependencia de la deformación de la probeta en función del tiempo, cuya curva se muestra en la figura 3.6. La irregularidad mostrada en el espacio de tiempo de 75 a 85 s corresponde a la zona de deformación plástica, en la que se observa un incremento de la velocidad de deformación de la probeta; esto se debe a que en esta zona ya comienza el reblandecimiento del material y comienza a ceder.



**Figura. 3.6. Variación de la deformación en función del tiempo**

### **3.5.2. Resultados del ensayo de flexión**

En los resultados de este ensayo se puede decir que las curvas se dividen en dos **zonas (1 y 2)**, las mismas se pueden ver representadas en las figuras 3.7, en las que se reflejan la deformación en función de la carga aplicada en el ensayo; y en la figura 3.8 que se reflejan valores de carga en función del tiempo, en los que se observan a simple vista como fue variando la carga en cierto espacio de tiempo.

También en la figura 3.9 se pudo representar la curva que refleja la deformación en función del tiempo, en la que se puede apreciar que la deformación fue ocurriendo linealmente con el transcurso del tiempo.

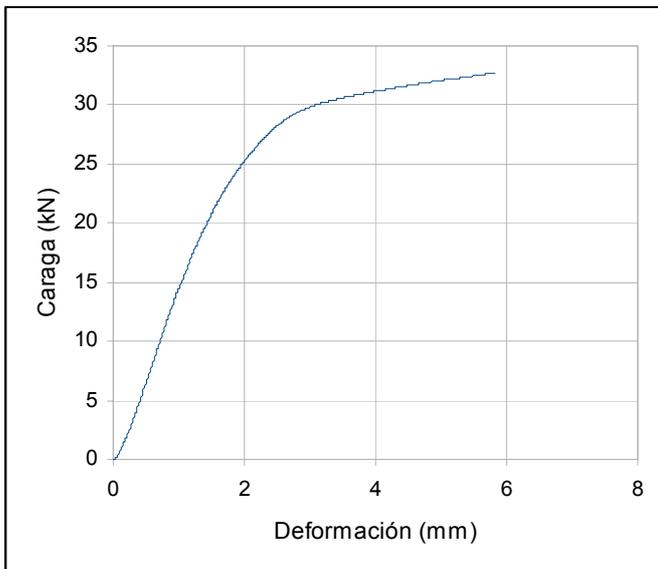


La figura 3.7 (deformación en función de la carga) se puede dividir en dos zonas para realizar un pequeño análisis.

En la **zona 1** se muestra un aumento de la deformación que va desde 0 hasta aproximadamente 2,5 mm conjuntamente con la carga que aumenta desde 0 hasta 27,5 kN. Hasta este punto se ha alcanzado la máxima carga que puede soportar la probeta sin llegar a flexionarse, es decir la probeta puede volver hasta su estado de origen y recobrar la forma que inicialmente poseía, esto corresponde a la deformación elástica de la probeta.

Aquí tiene lugar un aumento significativo de la carga aplicada sin lograr un aumento apreciable de la deformación de la probeta.

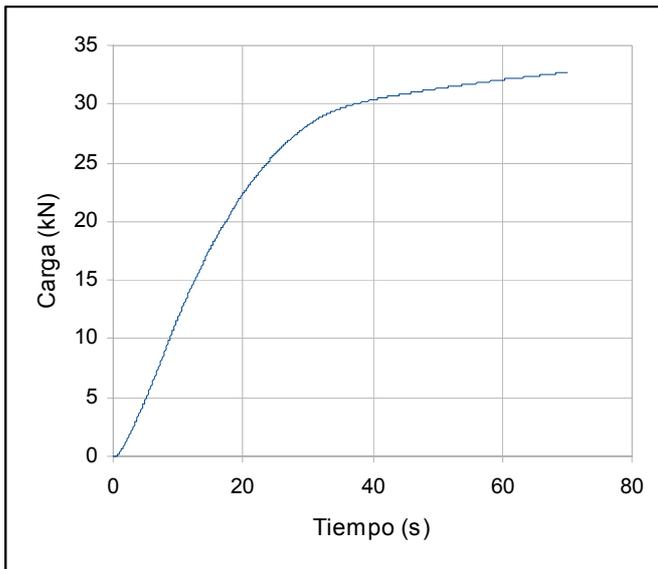
En la **zona 2** se observa que la deformación continúa en aumento de manera considerable solo con un pequeño aumento de la carga. Lo que significa que se ha llegado al límite elástico y ocurrió la deformación permanente de la pieza.



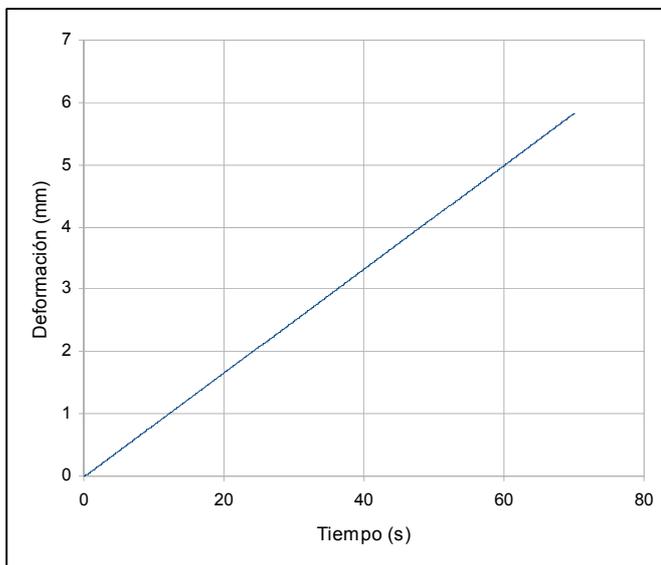
**Figura 3.7. Variación de la carga en función de la deformación**



En la figura 3.8 se muestra un aumento en la carga casi linealmente desde 0 hasta 30 kN en solo 37 s, que fue el tiempo que duró la probeta en doblarse. A partir de aquí y hasta 33 s más tarde solo se aprecia un incremento de la tensión de aproximadamente 2 kN.



**Figura 3.8. Variación de la carga en función del tiempo**



**Figura 3.9. Variación de la deformación en función del tiempo**



### **3.6. Valoración de los resultados obtenidos respecto a las condiciones reales del proceso de carbón activado**

Como ya se dijo anteriormente en el horno de tambor rotatorio de carbón activado de Baracoa se utilizó como material de construcción de los levantadores y toberas por diseño, un acero AISI 310. Luego de haberse cumplido el tiempo de vida útil a este material, fue necesario sustituirlo por otro resistente a las condiciones de trabajo. Para ello, como también se mencionó, está en utilización el material en estudio; el mismo fue puesto arbitrariamente, obtenido de los rechazos del taller de recortaría del combinado mecánico.

Después de haber realizado los análisis químico, físico y mecánicos a una muestra de este material, se pudo confirmar (con el análisis químico) que es un acero del tipo AISI 321, y según lo encontrado en las bibliografías, este material tiene como una de sus aplicaciones, "utilización en partes de los hornos que trabajan a temperaturas de más de 1000 °C".

Con los ensayos de dureza y de resistencia realizados, este material, se puede decir que posee una elevada resistencia y buena dureza, que los mismos están aptos para resistir la acción del material en su movimiento de traslación y deslizamiento por todo lo largo del horno, así como la carga que pueda aplicarle el material en procesamiento a los levantadores, y la abrasividad de la misma.

Por lo tanto después de lo analizado se puede confirmar, sin especificar un determinado tiempo de vida útil, que el acero AISI 321 está en condiciones para resistir un determinado tiempo de explotación considerable.

La principal ventaja del mismo es que se obtuvo gratuitamente en la institución antes mencionada. Como desventaja fundamental es que, al igual que el AISI 310 no se puede obtener en producción nacional, lo que resultaría muy costosa la renovación de estos materiales por uno de los mencionados anteriormente.



Para ellos se puede decir que el precio que poseen estos materiales es muy considerable, el cual se puede observar en la tabla N° 3.5. Aunque el correspondiente al AISI 321 es menor que los restantes, resultaría de todas formas muy costoso importarlo de otros países productores de acero.

### 3.7. Propuesta de otro material que pueda sustituir al AISI 321

Basado en estudios realizados por investigadores, Velázquez (2002), existen otros materiales que soportan las condiciones de trabajo severas en los hornos metalúrgicos, ejemplo de estos materiales es el acero ACI HK 40. Este tipo de acero posee propiedades muy resistentes a las altas temperaturas. Debido a esto, en la actualidad está siendo utilizado en parte de los hornos de reducción de la Empresa niquelífera "Comandante Ernesto Che Guevara", en la que es sometido a los esfuerzos mecánicos y la acción de la temperatura, ya que está presente principalmente en los brazos de los hornos.

#### 3.7.1. Características químicas del acero ACI HK 40.

La composición química de la aleación ACI HK-40 de composición nominal se muestra en la Tabla 3.4, según ASTM A 297-95 y ASTM A 351-95 Velázquez (2002).

**Tabla N° 3.4: Composición nominal de la aleación ACI HK40 (% de masa)**

Ni	Cr	C	P	S	Si	Mn	Fe
20–22	22–26	0,35–0,45	≤ 0,04	≤ 0,04	≤1,75	≤ 1,75	Balance

Cada elemento de aleación obedece a un requerimiento en específico: el níquel le confiere carácter monofásico a la aleación, lo que incrementa la resistencia a la corrosión; el cromo garantiza excelente resistencia a la corrosión por formación de cascarilla en caliente; el carbono proporciona la elevada resistencia al creep por formación de gruesas franjas de carburos en los bordes de los granos; el fósforo y el azufre provienen de la materia prima y se consideran como impurezas, mientras



que el silicio y el manganeso se introducen a la carga como desoxidantes y el aluminio se añade para incrementar la resistencia al creep por el efecto reforzador por precipitación de partículas en la matriz metálica, lo que unido a su relativamente bajo costo, baja densidad y disponibilidad posibilitan el desarrollo de una tecnología poco costosa. El balance es hierro.

A diferencia de los de la serie 300, analizados en el trabajo, este material (ACI HK-40) es de producción nacional, lo que quiere decir que su obtención no está muy limitada; además el precio de este metal está en el rango de los analizados, incluso más económico que el AISI 310 tabla N° 3.5.

**Tabla N° 3.5: Precio de los materiales**

<b>Tipo de acero</b>	<b>Grosor, mm</b>	<b>Precio, USD</b>
AISI 310	12 - 20	12118,00 - 15207,00
AISI 321	8	9445,00
HK40	8	12154,74

### **CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3**

Después de haber realizado el análisis de los resultados obtenidos se concluye que:

Los métodos utilizados ofrecieron resultados que confirman que el acero en análisis puede ser utilizado como material de construcción de los levantadores y toberas del horno de tambor rotatorio de la planta de carbón activado de Baracoa, por un tiempo considerable.



---

## CONCLUSIONES

Después de haber realizado el estudio de las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material de los levantadores y toberas del HTR se puede concluir que:

- ✓ Los ensayos de emisión óptica y clasificación de material y el de microscopía óptica, determinaron que el metal en estudio es un acero del tipo AISI 321, con un contenido de cromo de 18,31 %.
- ✓ Los ensayos de la dureza del material arrojaron que posee una Dureza Vickers de 170 HV, Dureza Brinell de 162 HB y Dureza Rockwell de 85 HRB.
- ✓ Se obtuvieron las curvas de resistencia a la tracción y flexión, en las que se aprecia la alta resistencia que posee este material, el cual puede soportar una carga de 45 kN sin llegar a deformarse.
- ✓ Se pudo concluir que el AISI 321 puede garantizar un tiempo de trabajo considerable sin que halla que sustituirlo.
- ✓ Se propuso además la posible utilización del acero ACI HK 40 de producción nacional como material de construcción de los levantadores y toberas, debido a sus propiedades y aplicaciones en partes principales de los hornos.



---

## RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la construcción de los levantadores y toberas con el material ACI HK 40, cuando sea necesario. Ya que este es de producción nacional y cumple con las propiedades necesarias para los requerimientos del proceso en los hornos de activación.



---

## BIBLIOGRAFÍA

- BEDDOES, J.; J. GORDON. 1999. Introduction to Stainless Steels. Hitchin: ASM International.
- BILMES, P. 2000. Análisis de falla de una estructura de acero inoxidable AISI 310 de un horno de tratamientos térmicos. En: Memorias del IV Taller Científico Internacional TECNOMAT' 2000. La Habana, 2000.
- BOYLE, J.; J. SPENCE. 1989. Stress analysis for creep. Londres: Butterworths.
- BROWN, R.S. 1994. How to select the right stainless steel. Advanced Materials & Processes 145 (4): 20-24.
- DAVIS, G. 1997. Cracking Failure Analysis. Ohio: ASM International.
- EBERT, H. (1976). Fabrication of HK 40 in the Field. Welding Journal, 55 (11): 37-43.
- ECHEVERRÍA REVELO, W.J. 2009: Caracterización microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 76 p.
- EMRICH, W. 1985. Handbook of Charcoal Making. Boston: R. Rendez Publishing Company.
- Feodosiev, V. I., 1965 "Resistencia de materiales" Tomo I. Pueblo y educación. 300 P.
- FOSTER; [et.al.]. 1991. Specification for the Design of Cold-formed Stainless Steel Structural Members". New York: American Society of Civil Engineers, ANSI/ASCE-8-90.
- GARCÍA, L.J.; [et al.]. 2007. La precipitación de carburos intergranulares y su efecto en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable austenítico tipo 310. En:



8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Perú: Universidad católica del Perú.

KWON, O.; [et.al.]. 1999. Crack Growth in the Presence of Limited Creep Deformation. *Engineering Fracture Mechanics*, 62: 33-46.

KYUNG SEON MIN 2003 Department of Materials Science and Engineering, Korea: Advanced Institute of Science and Technology. P. 305-701

LAI, G.Y. 1992. Heat Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. *ASM Handbook*. Ohio: ASM International. V. 1. P. 510-518.

LEFÉVRE, J. 1993. *Stainless Steels*. París: Edit. Les Editions de Physique. P. 919-937.

MANNAN, S. L.; M.D. MATHEW. 1996. Creep of austenitic stainless steel welds. *Bulletin of Materials Science*, 19 (6): 985-1007.

MAZORRA, L.; [et.al.]. 1989. Fragilización por envejecimiento de aceros inoxidables moldeados. *Revista de Metalurgia*, 25 (5): 344-349

MEYER, M. de; D. TOCH; B.C. DE COOMAN. 2001. The characterization of retained austenite in trip steels by X-Ray Diffraction. En: *Proceedings of 41<sup>th</sup> Mechanical Working and Steel Processing Conference*. Baltimore, MD. 2001. Vol. XXXXVII. P. 483-491.

NAUMANN, K. 1998. *Failure Analysis, Case Histories and Methodology*. Stuttgart: Riederer - Verlag GmbH.

NICÓ RODRÍGUEZ, I. 2009: Estudio preliminar de la adsorción de níquel y cobalto utilizando carbón vegetal de conchas de coco. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 65 p.

PECKNER, D. ; I. M. BERNSTEIN. 1994. *Handbook of Stainless Steels*. Third Ed. Pittsburgh: McGraw Hill Book.

PERO-SANZ, J. A. 2000. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Madrid: DOSSAT.



- POWELL, G.W.; S.E. MAHMOUD; K. MILLS. 1995. Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook of ASM. Ohio: ASM International. Vol.11. P. 380-410
- SAXENA, A. 1998. Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers. Boca Ratón: Editorial CRC Press.
- VELÁZQUEZ, A. 2002."Fragilización de la aleación HH por precipitación de fases sigma". [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis de doctorado). 117 P.
- VILLEGAS AGUILAR, P.J.; [et. al.]. 2000. Producción de carbón activado mediante la gasificación de residuos de la industria azucarera. Centro Azúcar. La Habana: Universidad de La Habana.

