



INSTITUTO SUPERIOR MINERO  
METALÚRGICO DE MOA  
*Dr. Antonio Núñez Jiménez*  
FACULTAD METALURGIA  
ELECTROMECÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA

# *Trabajo de Diploma*

*En Opción al Título de Ingeniero Mecánico*

**Título:** *Selección del método de soldadura de los tramos de acero al carbono del transportador de mineral (Jacoby), de la Empresa Ernesto Che Guevara.*

*Autor: Leonardo Núñez Domínguez*

*Tutores: M Sc. Tomás Fernández Columbié  
M Sc. Isnel Rodríguez González*

**M o a , 2 0 1 0**



**DECLARACIÓN DE AUTORIDAD:**

**Yo:** Leonardo Núñez Domínguez.

Autor de este Trabajo de Diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Nuñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

-----  
Autor: Leonardo Núñez Domínguez.

-----  
Tutor: MsC. Tomás Fernández Columbié.

-----  
Tutor: MsC. Isnel Rodríguez González.



*Dedicatoria:*

*Dedico este trabajo de diploma de forma muy especial a mis padres Milagro Domínguez y Leonardo Núñez, a mis hermanos Walter y Leandro, a mi novia Aniuska y a toda mi familia en general.*



*Agradecimientos:*

*Primeramente quisiera agradecer a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo.*

*A mis padres y hermanos, por ayudarme a alcanzar lo que deseo.*

*A mi novia por estar junto a mí en los momentos más difíciles con todo su amor y dedicación.*

*A todos mis amigos y compañeros de aula, que de una forma u otra encontré en ellos mucho apoyo.*

*A mis profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica, que me educaron y me enseñaron con mucha dedicación durante mi transcurso por la universidad, lo cual ha sido una gran herramienta para formarme como profesional.*

*A mis tutores, M.Sc. Tomás Fernández Columbié (profesor de Cañete), M.Sc. Isnel Rodríguez González y la Ing. Melba Fernández Olivares, los cuales han depositado su plena confianza en mí para la realización de este trabajo, siempre les estaré agradecido.*

*Al grupo de Tecnología de la UEB Construcciones Metálicas de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”. Finalmente agradecer a la Revolución Cubana, que nos ha dado la oportunidad de formarnos como profesionales.*

*A todos Muchas gracias.*



## **RESUMEN.**

En el trabajo se realiza un análisis del comportamiento de la unión soldada en los tramos del transportador de tornillo sinfín (Jacoby), de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, el cual transporta el mineral laterítico desde los hornos hasta los enfriadores. El análisis del agrietamiento en el cordón de soldadura se ejecuta con el apoyo de los ensayos de resistencia mecánica y espectral, así como la determinación de microscopía óptica. Con los resultados se estableció el método de soldadura más apropiado para la unión de la brida con el tubo, lo cual se logra empleando la combinación de los procesos SAW y SMAW. Utilizando el procedimiento mencionado la empresa ahorraría una pérdida de 280 896,00 CUC/transportador.

## **ABSTRACT**

In this work an analysis of the union by welding process of two parts of the screw conveyor (Jacoby) is carry out. It transports lateritic mineral from the reduction ovens to the coolers. The analysis of the cracking in the welding cord is executed with the support of the rehearsals of mechanical and ghastly resistance, as well as the determination of optic microscopy. With this results is settle down the most appropriate welding method.



## Índice

<b>Contenido:</b>	<b>Pág</b>
Introducción	1
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 Introducción.	4
1.2. Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura	4
1.2.1. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura	5
1.3. Agrietamiento en uniones soldadas	7
1.3.1. Grietas en caliente de las uniones soldadas	8
1.4. Tensiones residuales y distorsión	10
1.5. Transformaciones físico-químicas y estructurales que ocurren en la soldadura	12
1.5.1. Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)	13
1.5.2. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)	14
1.6. Soldadura manual por arco eléctrico (SMAW)	18
1.7. Operacionalidad de los transportadores de mineral del tipo Jacoby	19
1.7.1. Caracterización de los tubos averiados	20
1.8. Conclusiones del Capítulo I	22
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>23</b>
2.1 Introducción	23
2.2 Preparación metalográfica de la probeta	23
2.2.1. Desbaste y pulido	24
2.2.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar	24
2.2.3 Ataque químico	24
2.3 Análisis químico	25
2.4 Determinación de las propiedades mecánicas	26
2.4.1 Diseño experimento	26
2.4.2 Métodos empleados para soldar las probetas	27
2.4.3 Propiedades mecánicas de los electrodos a utilizar	28
2.5 Análisis microestructural por el método de examen microscópico	29
2.6 Cálculo del cateto de soldadura	30



2.7 Cálculo del carbono equivalente	31
2.8 Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura	32
2.9 Cálculo de resistencia mecánica	32
2.10 Cálculo de la productividad según Shubin. V. S. (1986)	33
2.11 Métodos de elementos finitos (M.E.F)	34
2.11.1 Pasos a seguir para la modelación por el MEF	35
2.12. Conclusiones del Capítulo II	36
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	<b>37</b>
3.1 Introducción	37
3.2 Análisis químico	37
3.3. Pruebas de Ensayos Mecánicos	41
3.4. Análisis Metalográfico	43
3.5. Resultados fractográficos	49
3.6. Cálculo del cateto de soldadura	50
3.7. Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura	51
3.8. Cálculo de resistencia mecánica	51
3.9. Resultados del Cálculo de la productividad	51
3.10. Resultados obtenidos en la producción a partir de la investigación	52
3.11. Valoración económica	42
3.11.1. Costo de fabricación de las probetas para los ensayos de resistencia	52
3.11.2. Costo de los ensayos de análisis químico	53
3.11.3. Costo de los ensayos de radiografía	53
3.11.4. Costo de los ensayos de tracción y doblado	53
3.11.5. Gasto de Energía consumida en la fabricación de un tramo	54
3.11.6. Precio establecido para la fabricación total de un tramo	54
3.13. Conclusiones del Capítulo III	56
<b>Conclusiones Generales.</b>	<b>57</b>
<b>Recomendaciones.</b>	<b>58</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>59</b>
<b>Anexos</b>	<b>63</b>



## INTRODUCCION.

La Industria Cubana del Níquel con 60 años de creada, a partir del año 2000 constituye la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, y con ello equipos y aparatos para su desarrollo, lo que permitirá ir incrementando su papel en la economía nacional.

La empresa Comandante Ernesto Che Guevara fue construida entre los años 1973 y 1985 como fruto de la colaboración bilateral entre los gobiernos de Cuba y la antigua Unión Soviética, con la finalidad de producir concentrado de níquel y cobalto. Actualmente la producción de níquel y cobalto constituye unas de las mayores posibilidades para el desarrollo de la economía cubana, ya que su precio cobra gran auge en el mercado internacional. Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, el mineral debe pasar por varios procesos dentro de ellos juega un papel importante la planta de Hornos de Reducción, donde encontramos varios transportadores de tornillo sinfín (Jacoby), encargados de transportar el mineral hasta los enfriadores.

El principio de acción del transportador de tornillo sinfín consiste en la transportación del material por un canalón a la acción de una espiral. Los Transportadores de tornillo sinfín o de espiral tienen un uso muy amplio para la transportación de materiales pulverulentos, calientes y de aquellas que pueden emanar gases. Estos transportadores pueden emplearse para la mezcla o la homogenización de los materiales, si así lo exige el proceso tecnológico. La productividad de los transportadores de tornillo puede alcanzar hasta 150 t/h; longitud hasta 60 m; y la inclinación de hasta 15 - 20°.

En el caso del transportador (Jacoby) este consta de 10 tramos acoplados con una longitud total de 30 867 mm, el diámetro interior del tubo es de 533 mm y el diámetro exterior del sin fin de 525 mm. El transportador gira alrededor de 27,7 revoluciones por minutos, impulsado por un reductor acoplado a un motor que transmite una potencia de 22,2 kW. El mineral entra alrededor de 650 a 700°C, una vez reducido, es descargado a los enfriadores de donde sale (con una temperatura alrededor de los 200°C) hacia las canales de contacto de la planta de Lixiviación y Lavado.



## **Situación Problemática**

Los tramos de acero al carbono del transportador están formados por tubos, unidos en sus extremos puntas en formas de bocina denominadas bridas o platillos, esta unión se realiza a través de cordones de soldadura. En los últimos tiempos la planta de hornos se ha visto afectada por las numerosas roturas de dichos tramos, principalmente por la zona soldada en los tramos 3 y 4. Las averías están relacionadas con el agrietamiento progresivo de los cordones de soldadura en toda la longitud del mismo. Todo esto trae como consecuencia pérdidas en la economía de la empresa, como resultado de los altos costos de mantenimiento y reparación. Además de afectar el plan de la producción, ocurren grandes daños al medio ambiente debido a las fugas de mineral y gases tóxicos.

## **Problema**

Insuficiente conocimiento del método de soldadura, más adecuado, para la unión del tubo con las bridas de los tramos de acero al carbono en el transportador de mineral (Jacoby) pertenecientes a la Empresa Ernesto Che Guevara.

## **Objeto de la investigación**

Tramos de acero al carbono en el transportador de mineral (Jacoby).

## **Campo de acción**

Unión soldada tubo-brida de los tramos *de acero al* carbono del transportador de mineral (Jacoby).

## **Hipótesis**

A partir de la caracterización del material a utilizar y de la resistencia mecánica en los tramos de acero al carbono, del transportador sinfín (Jacoby) de la Empresa Ernesto Che Guevara, se podrá establecer el método de soldadura más adecuado para la unión del tubo con las bridas.

## **Objetivo**

Establecer el método de soldadura adecuado para garantizar resistencia mecánica en los tramos de acero al carbono del transportador sinfín (Jacoby), de la planta de Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.



### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar el cordón de soldadura en los tramos del transportador afectados por el agrietamiento,
- Definir el método de soldadura más adecuado, que garantice mayor resistencia mecánica en la unión tubo-brida de los tramos elaborados de acero 25.

### **Tareas**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Caracterización del acero empleado en la fabricación de los tramos del transportador sinfín de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
3. Definición del diseño experimental.
4. Preparación de probetas y realización de la experimentación.
5. Análisis y valoración de los resultados.
6. Propuestas de soluciones tecnológicas.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

El estudio de fallas de elementos que operan a temperaturas elevadas constituye uno de los principales focos para las industrias del níquel en esencial a la planta de Hornos de Reducción de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales que implican para la humanidad.

El tipo de falla se establece mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos iniciales disponibles con las condiciones de operación del componente respecto a las cargas actuantes. En este caso, se requiere de un estudio más completo, ya que las temperaturas y el tiempo afectan la durabilidad de los mismos bajo la acción de los esfuerzos. Sin embargo, un análisis del tiempo de rotura o falla no está completo sin los consiguientes criterios metalográficos para establecer el mecanismo de la falla inicial.

En el presente capítulo se establece como objetivo.

- Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

### 1.2. Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura

Los aceros representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería (Lajtin, 1973; Guliaev, 1983; Pero-Sanz, 2000), (empleados con mucha frecuencia en las industrias cubanas como el MINBAS, MINAZ, SIME y el MICONS). Los aceros al carbono son aleaciones Fe-C donde el contenido de este último no supera el 1,00%, el manganeso no supera el 1,65%, el cobre y el silicio no superan el 0,60% y en los que el fósforo y el azufre aparecen solo como impurezas. La característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. En estos aceros, los principales factores que afectan a sus propiedades mecánicas son el contenido en carbono y la microestructura. Básicamente, la resistencia a la tensión, a la cadencia y la dureza, se incrementan al aumentar el contenido de carbono; por el contrario, la elongación, la reducción de área y la

tenacidad disminuyen notablemente con dicho incremento. Otro atributo del acero, el cual es seguramente de mayor importancia, es su capacidad para endurecer, cualidad que comúnmente se denomina templabilidad. Esta característica también se ve afectada con el aumento en el contenido de carbono.

Según Bengton (1991), son usados ampliamente para la construcción de estructuras y diversas partes de maquinaria, como pernos, tornillos, pasadores de baja resistencia. Son de Buena soldabilidad y no toma temple, además poseen favorables condiciones económicas como son su bajo coste y la garantía de abastecimiento. (Várela, 2003).

A pesar de tener buenas propiedades mecánicas en las uniones soldadas, se han adoptado una serie de prácticas como los tratamientos térmicos pre-soldadura de las piezas, tratamientos térmicos post-soldadura, mecanizado previo de las superficies a soldar, utilización de materiales especiales de aporte a la soldadura. Todos estos tratamientos logran atenuar los problemas relacionados con la soldadura, pero incrementan muy considerablemente la complejidad técnica y el coste de las operaciones. Por ejemplo: los tratamientos térmicos previos a la soldadura requieren el diseño de herramientas específicas para cada aplicación, bien sea el diseño de devanados (en el caso de calentamiento por inducción eléctrica) o de sopletes (si se trata de un calentamiento por llama).

Por otra parte, en otros casos es necesario el diseño y preparación previa de la unión, siendo preciso el mecanizado de las caras a soldar. Este mecanizado no es siempre una tarea sencilla, fundamentalmente cuando la geometría de la unión es complicada. (Taylor, 1975).

### **1.2.1. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura**

Según Rodríguez (1983); González (1978); García (1983); Callister (1999) plantean que la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico), también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono. El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuanto varían las propiedades del metal al soldar bajo

determinadas condiciones. Por ejemplo es posible establecer cuanto varían la resistencia, plasticidad, resiliencia y otras debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad en aceros es la ausencia de grietas.

Los elementos de aleación tales como el carbono, silicio, Manganeso, Cromo, Molibdeno, Níquel, entre otros, ejercen influencia en las propiedades mecánicas del material, entre ellas podemos encontrar las siguientes:

**Carbono:** Este elemento, como en los aceros al carbono, sigue siendo el fundamental para la determinación de las propiedades mecánicas tecnológicas. La temperatura de fusión y el peso específico, disminuyen con el aumento de este. Con su aumento, disminuye la soldabilidad, debido a que crece la templabilidad, por lo tanto la tendencia a la aparición de estructuras de mayor volumen específico en las uniones soldadas que ocasionan el surgimiento de tensiones internas y la disminución de las propiedades mecánicas.

**Silicio:** Es un elemento reductor (desoxidante), al igual que el manganeso. Para desoxidar determinados aceros para piezas fundidas se añade hasta 0,8 %. En las uniones soldadas, la cantidad de este elemento debe limitarse por el aumento de la fragilidad (debido a que los cristales mixtos de hierro y siliciuro de hierro FeSi son de poca plasticidad); no influyendo negativamente si no sobrepasa el 0,3. .

**Manganeso:** Es un elemento que actúa como desulfurante y desoxidante en la obtención del acero. Este no empeora la soldabilidad si su contenido no sobrepasa el rango de 0,3 a 0,8 %). En los aceros de mediano contenido de manganeso (1,8 a 2,5 %), aumenta la templabilidad y la tendencia a la formación de grietas.

**Cromo:** Dificulta la soldadura porque acelera la oxidación del metal, forma uniones químicas con el carbono, aumenta la dureza del metal en las zonas de transición. Cuando existe una correcta selección del régimen de soldadura, de los materiales de aporte y también con la observación del proceso tecnológico, no influye en la soldabilidad.

**Molibdeno:** Este elemento aumenta la templabilidad del acero durante los procesos de soldadura, generalmente su contenido está limitado a pequeños valores. En caso de los aceros de mediana aleación, la adición de una pequeña cantidad eleva la temperatura

de recristalización de la ferrita por lo cual aumenta la resistencia a elevadas temperaturas.

**Níquel:** En contenidos de 3 a 5 %, aumenta la resistencia sin aumentar la fragilidad de la unión soldada, sin embargo al superar estos valores, tiene tendencia al aumento de la templabilidad de la misma. Afina el grano, aumenta la plasticidad y no empeora la soldabilidad.

### 1.3. Agrietamiento en uniones soldadas

La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente. Las grietas constituyen los defectos más peligrosos en las uniones soldadas y se pueden presentar tanto como defectos externos o internos.

Algunos autores (Masubuchi, 1980; Susuki *et al.*, 1984; EL - Hebeary *et al.*, 2004; Satoh *et al.*, 1975), plantean que el fenómeno del agrietamiento en frío se conoce como agrietamiento retardado o agrietamiento por hidrógeno. Constituye un agrietamiento que se produce generalmente a temperaturas inferiores a los 930 °C inmediatamente después de culminada la soldadura, o luego de varias horas. Constituyen por su morfología roturas frágiles de poca abertura y poco ramificadas que se producen en la Zona Afectada por el Calor o en el metal de la costura y se orientan transversal o paralelamente al eje de la misma. En general las grietas en frío pueden ser externas o internas por su ubicación. La grieta en frío más frecuente se produce en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la zona de sobrecalentamiento o de grano grueso.

Este tipo de agrietamiento en general es característico de la soldadura de los aceros de medio y alto carbono y algunos aceros de baja aleación.

La fractura inducida por hidrógeno (FIH) es atribuible a tres factores principales: microestructura, hidrógeno y esfuerzo, (Oystein, 1994; Lancaster, 1999). Los factores causales que gobiernan la ocurrencia de la FIH, en las juntas de soldadura de aceros ferríticos son:

- Microestructura endurecida sensible a la fisuración, conteniendo productos de transformación martensíticos y/o bainíticos.
- concentración localizada suficientemente alta de hidrógeno en términos del contenido de hidrógeno difusible de la soldadura (Maroef *et al.*, 2002; Gedeon y Edgar, 1990).
- Esfuerzo elevado causado por la alta restricción estructural que es determinado por la rigidez del ensamble, es decir, espesores y altura del refuerzo del cordón de la soldadura.

La sensibilidad o susceptibilidad a la fractura inducida por hidrógeno de soldaduras se da por una combinación de estos tres factores primarios, (Pekka, 2003; Gangloff, 2003; Pitrun, 2004). El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta tasa de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla concentrador de esfuerzos. La ubicación de estas grietas, es decir si se presentan en el metal de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas, (Giraldo y Chaves, 2004).

El hidrógeno se disuelve fácilmente en forma atómica hacia el baño de soldadura en estado líquido y a muy alta temperatura, y de aquí puede permanecer en la costura, pasar a la zona afectada por el calor (ZAC) o difundirse hacia la superficie y finalmente salir al medio.

### **1.3.1. Grietas en caliente de las uniones soldadas**

Las grietas en caliente se forman en la zona fundida, o en la ZAC muy cerca de la línea de fusión, y a altas temperaturas (durante el período de cristalización del metal entre la línea de líquidos y la de sólido, donde el metal se encuentra en estado bifásico o por debajo de la línea de sólidos) (Weld Cracking, 2001; Ashby, 1996)

Los aceros propensos a este tipo de agrietamiento son fundamentalmente los aceros rápidos o de libre maquinado, que presentan grandes contenidos de S y P, los que forman eutécticos de bajo punto de fusión (Temp. de fusión) que se acumulan durante la cristalización en las fronteras de granos aún en estado líquido mientras los granos ya solidificaron y que bajo el efecto de las tensiones de tracción propias de la soldadura provocan la rotura del material. (Oriani, 1993; Park *et al.*, 2002; Kedzierzawski, 1985).

Fue Watanabe (1962), el primero en reportar grietas laminares en estructuras soldadas. Más tarde durante los años de la década de los sesenta aparecieron muchos trabajos al respecto, especialmente en Inglaterra, donde fue creado un Comité Nacional para atender este problema. Entre otros, se pueden destacar los trabajos de (Nangel, 1969; Meyer, 1968; Wormington, 1967; Nicholls, 1968).

El agrietamiento laminar se presenta en la mayoría de los casos, asociado al acto de la soldadura, en los primeros momentos fue considerado como un defecto de la misma. Sin embargo, en la actualidad está demostrado de que la causa fundamental parte de un defecto del metal base, específicamente relacionado con inclusiones no metálicas alargadas o en cadenas en dirección del laminado. Según lo planteado anteriormente, es importante conocer si existe el peligro de agrietamiento laminar, en el caso de la reparación por soldadura de componentes de calderas de vapor, que por las condiciones de explotación presentan problemas de degradación estructural.

Para medir la susceptibilidad al agrietamiento laminar se han usado diferentes métodos y técnicas. Así, en la literatura se pueden encontrar:

- Métodos metalográficos.
- Métodos de medición de propiedades mecánicas.
- Métodos de soldadura.

Se pueden usar procedimientos de soldadura apropiados para reducir las fisuras y el agrietamiento. Por ejemplo, un bajo amperaje resulta benéfico, también puede ser un ligero movimiento zigzagueante al soldar, con el fin de promover el crecimiento celular del grano. Se recomienda seguir los procedimientos adecuados al apagar el arco, a fin de evitar las grietas de cráter (Wilson, 1974).

#### 1.4. Tensiones residuales y distorsión

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta retícula interna, es necesaria la introducción de energía a la pieza.

Se denomina esfuerzos residuales ó internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico (James, 1996; Masubuchi, 1980). En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados (James y Buck, 1980 y Alfonso, 2002). La primera clase de esfuerzos residuales, denominados macroscópicos, son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material. La segunda clase de esfuerzos residuales son denominados micro esfuerzos estructurales, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas. La tercera clase de esfuerzos residuales se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano. Los esfuerzos residuales son siempre consecuencias de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica (Macherauch y Kloos, 1986).

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado (Mikliaev, 1986).

En la soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

Durante el proceso la situación se complica porque: 1) el calentamiento está muy localizado, 2) la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y 3) la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura

con arco eléctrico), (Meriño, 1999). Durante este proceso (figura 1.1), la operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto.

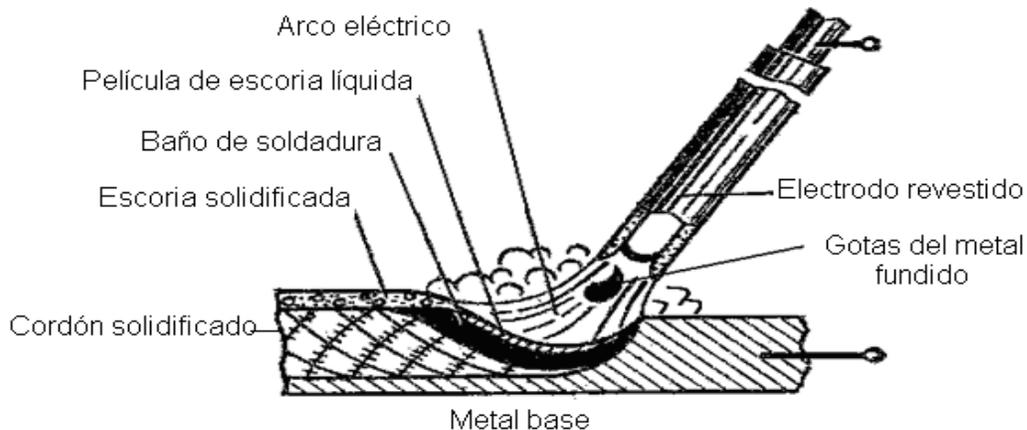


Figura 1.1. Esquema del proceso de soldeo SMAW

Como se puede observar en la figura 1.1, según avanza (Easterling, 1992) se forma un pozo fundido del metal base (y de metal de aporte), el cual se solidifica con rapidez detrás del arco en movimiento. Las partes del trabajo inmediatamente adyacentes a la gota de soldadura se vuelven extremadamente calientes y se expanden, en tanto que las porciones removidas de la soldadura permanecen relativamente frías. El pozo de soldadura se solidifica rápidamente en la cavidad entre las dos partes y, conforme el pozo y el metal circundante se enfrían y contraen, ocurre un encogimiento a través de lo ancho de la soldadura. La unión de la soldadura queda en tensión residual y se acumulan tensiones compresivas de reacción en las regiones de las partes lejanas a la soldadura. También ocurren tensiones residuales y encogimiento a lo largo de la gota de soldadura. Dado que las regiones exteriores de las partes base han permanecido relativamente frías y sin cambios de dimensión, mientras que la gota de soldadura se ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, las tensiones residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura. Es probable que el resultado neto de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, produzca una deformación en el ensamble soldado.

La unión soldada con arco eléctrico mostrada anteriormente es solo uno de los diversos tipos de uniones y operaciones de soldadura. Las tensiones residuales inducidas en

horma térmica y la distorsión implícita son un problema potencial en casi todos los procesos de soldadura por fusión y en ciertas operaciones de soldadura de estado sólido, en las cuales ocurre un calentamiento significativo.

A consecuencia de los procesos de fabricación de los materiales, de la mecanización de componentes, de las condiciones de servicio de estos últimos y el suministro de en uniones soldada (James, 1996) se generan en los agregados policristalinos campos de tensiones residuales. Tales tensiones residuales pueden llegar a condicionar negativamente la vida en servicio de los dispositivos y estructuras. Microscópicamente, las tensiones residuales actúan alterando las distancias entre los planos atómicos de los cristales.

En el caso específico de procesos de soldadura, los esfuerzos residuales son consecuencia de la interacción de procesos separados (Zinn y Scholtes, 2002; Schajer, 2001; Zinn y Scholtes, 2002) .

- a) Por la expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no homogénea.
- b) efectos de enfriamiento rápido (temple).
- c) transformaciones de fase. Consecuentemente, el tipo y cantidad de esfuerzos residuales en la pila de soldadura y zona afectada térmicamente dependen de la temperatura de transformación determinada por el diagrama tiempo – temperatura - transformación del material (TTT) y la velocidad de enfriamiento. Obviamente, la composición química local tiene un papel importante. En adición, la resistencia a la cedencia dependiente de la temperatura local y el grado de rigidez del elemento estructural son decisivos.

### **1.5. Transformaciones físico-químicas y estructurales que ocurren en la zona de la unión soldada**

Las variaciones en la composición química de la zona fundida pueden tener una influencia favorable o desfavorable sobre las propiedades de la unión.

Plantean (Mathar, 1934; James y Buck, 1980; Easterling, 1992), las pérdidas por oxidación de los elementos útiles como el carbono en los aceros, el silicio en las

fundiciones, modifican las características mecánicas. Así mismo, la fijación de un tanto por ciento exagerado de carbono, de fósforo o de azufre, así como la absorción de oxígeno y nitrógeno, producen una pérdida en las cualidades de la unión. Por el contrario, el aporte voluntario por micrometalurgia de ciertos elementos especiales conduce a una mejora de las características mecánicas o químicas.

La Pérdida de elementos por oxidación (Stout y Doty, 1971) son fenómenos bien conocidos por los metalúrgicos; en soldadura, se complican por la presencia de una atmósfera que rodea al metal fundido y cuya naturaleza depende del tipo de protección del arco y del baño fundido (tipo de gases de protección, fundentes o de la composición del revestimiento del electrodo). En el caso de los aceros, sabemos que estas pérdidas son en general consecuencia de la reducción del óxido de hierro por los elementos componentes del acero.

### **1.5.1. Modificaciones estructurales de la zona fundida**

Las modificaciones estructurales pueden agruparse en dos grupos (Rodríguez, 1983; Gular, 1978; Bailey, 1995) las que afectan el grano del metal, a su arquitectura interna. El estudio de esta estructura determina la forma, el tamaño y la orientación de los granos en la zona fundida y también en el metal de base hasta una cierta distancia.

Las que intervienen en el cambio de estado físico - químico de los constituyentes del metal. Estas modificaciones, para un acero de composición química dada, son función directa del ciclo térmico impuesto por la fusión, que determina el poder de templado en soldadura. El tamaño, la forma y la orientación del grano de solidificación, van a depender entonces de la temperatura a la que se ha llevado el metal, del tiempo que se hayan mantenido a esta temperatura y de la velocidad de enfriamiento al atravesar las líneas de transformación.

En soldadura eléctrica por arco, se procede en general con depósitos sucesivos de metal fundido de volumen muy pequeño con solidificación casi instantánea; como consecuencia, la estructura del metal fundido es más fina, alineada y acicular. Si la operación lleva varias pasadas, la influencia térmica de las pasadas producirá un refinamiento de grano en las estructuras (Ramírez, 1980).

### 1.5.2. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base

El crecimiento de los granos en el metal base, está ligado invariablemente al ciclo térmico de la soldadura, temperatura y velocidad de enfriamiento.

En la soldadura por arco, la zona de crecimiento de los granos está más localizada y sus dimensiones pasan por un máximo, en una zona muy próxima a los bordes, disminuyendo bruscamente en las capas próximas al bisel. Este aspecto de la curva se debe al normalizado que provoca en el metal base las sucesivas pasadas del depósito por arco. Estos cambios de estructura generalmente están ligados a cambios en las propiedades del metal en esta zona debido al tratamiento térmico a que está sometida esta zona. Según sea la potencia térmica aplicada en la zona fundida, así variará la zona influencia térmica (ZIT) en el metal base (figura 1.2), el cual será sometido a modificaciones alotrópicas dando origen a toda una serie de estructuras que pueden ir desde el semi - temple del tipo bainítico, hasta el hipertemple totalmente austenítico. Estas modificaciones variaran en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (Barreiro, 1966 y Bakker, 1968).

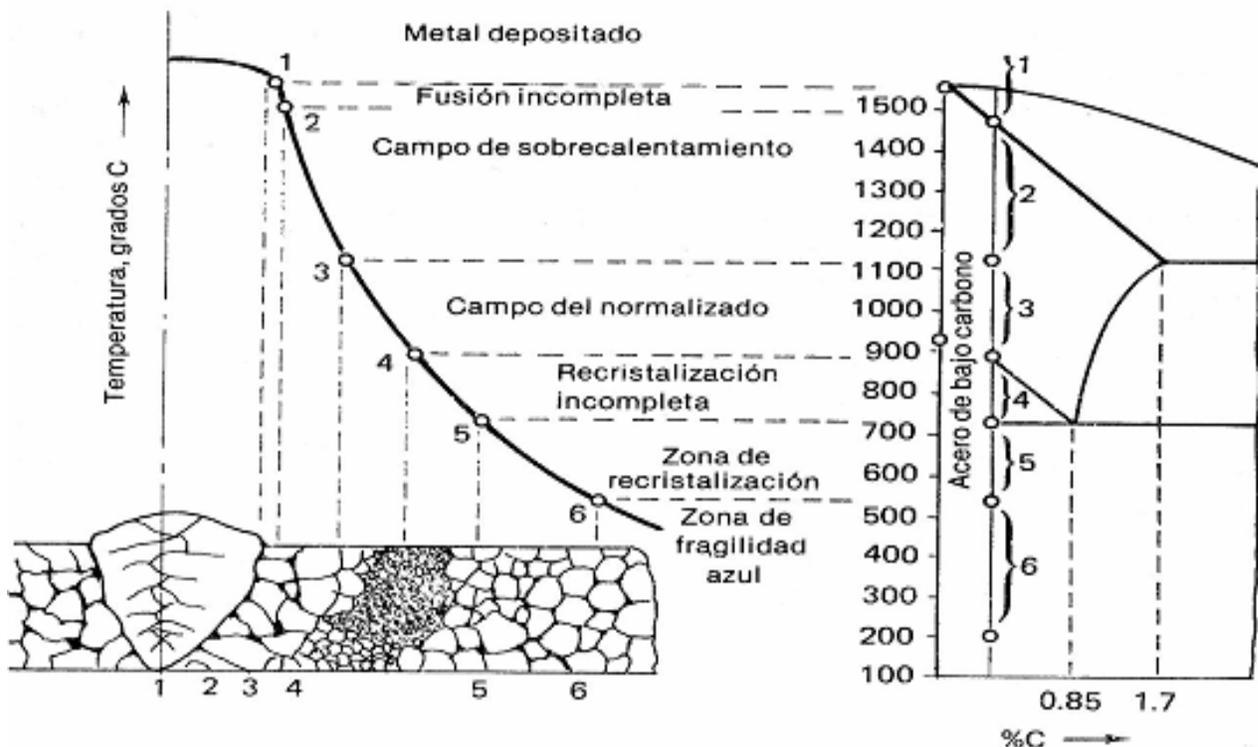


Figura 1.2. Zonas que se presentan en la soldadura, según el diagrama Fe – C. (Zuñiga, 1983)

- a) En la **zona fusión incompleta**, la temperatura alcanzada es la de fusión con velocidades de enfriamiento del orden de 350 a 400 °C/min, es la región de máximo temple; se caracteriza porque en ella ocurren la mayoría de los procesos difusivos de la soldadura, sin embargo el problema se complica por la superposición de una transformación química, en particular por la pérdida de elementos útiles: carbono, manganeso y silicio. Por esta razón, esta zona, a veces, se templea menos que otras zonas próximas del metal de base.
- b) En la **zona de recalentamiento** del metal base, que se produce a algunos milímetros del borde de la soldadura, se alcanza una temperatura muy elevada (entre 1100 y 1500 °C) y la velocidad de enfriamiento también es relativamente grande: 240 a 300 °C/min. Necesariamente tiene que haber crecimiento de los granos y una transformación estructural de importancia con un temple cuya naturaleza depende del tipo de acero. En esta región no existen transformaciones de tipo químico y por tanto, únicamente interviene el ciclo térmico de soldadura sobre la constitución de la estructura final.
- c) En la **zona de recocido** es calentada ligeramente por debajo de los 900 °C, el metal tiende hacia una estructura normalizada con afinamiento del grano, pero esta transformación no puede ser total a causa de la velocidad de enfriamiento que aún es grande 170 a 200 °C/ min.
- d) En la zona de **primera transformación** que se extiende entre los puntos de transformación  $Ac_1$ , y  $Ac_2$ , (720 a 900 °C), las modificaciones pueden adoptar distintos aspectos; en particular puede haber globulación del agregado laminar con tendencia a la coalescencia sin modificación sensible del grano de ferrita. Esta última zona de transformación puede extenderse en dependencia del espesor del metal soldado.
- e) Zona de metal base no afectado: en esta zona el ciclo térmico que genera el proceso, no afecta la estructura del metal originalmente empleada.

Si el metal base hubiese sido modificado preliminarmente por algún tratamiento térmico (temple, revenido) o mecánico (laminado en frío), las transformaciones de la zona de

recalentamiento o de la zona de recocido, prácticamente quedan como se ha dicho anteriormente, pero la zona de la primera transformación y una parte del metal de base no afectado, son asiento de nuevas transformaciones difíciles de prever.

A partir de las modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (Glizmanenko, 1965; Bakker, Y Horestreydt, 1968; Rodríguez, 1983; ANSI/AWS D1.1-96, 1996) realizan una clasificación de las diferentes zonas del cordón de soldadura, para poder determinar los cambios en la estructura en la zona de Influencia Térmica (ZIT).

1. **Zona de fusión incompleta:** Constituye la zona de transición entre el metal de la costura o zona fundida y el metal base no fundido. Es una zona estrecha del metal base que se calienta a temperaturas por debajo de la línea de líquidos y por encima de la línea de sólidos, o sea, a temperaturas que solo sobrepasan un poco la temperatura de fusión por lo que el metal se encuentra en estado bifásico sólido-líquido. El estado bifásico que se alcanza permite que ocurran procesos difusivos de algunos elementos entre las fases líquidas y sólidas de la zona de fusión incompleta, lo que provoca que esta zona se diferencie en cuanto a composición química tanto de la zona de la costura, como del metal base. El ancho de esta zona depende del carácter de la fuente de calor y de la composición química del metal y varía desde 0.1-0.4 mm. Las propiedades de esta zona en ocasiones ejercen una influencia decisiva en la resistencia de la unión.

2. **Zona de sobrecalentamiento:** Zona limitada a los puntos cuyas temperaturas máximas se limitan entre aproximadamente los 1100 °C (temperatura de crecimiento intensivo el grano austenítico) y la línea de sólidos. En esta zona el metal durante el calentamiento de soldadura sufre la transformación alotrópica de hierro- $\delta$  a  $\gamma$  y producto de que el metal se calienta a temperaturas bastante por encima de  $A_{c3}$  ocurre un sobrecalentamiento y crecimiento del grano austenítico. Luego del enfriamiento la estructura final de esta zona depende de la composición del metal y el ciclo térmico de soldadura, de forma que en algunos casos durante la soldadura SMAW con un sobrecalentamiento significativo del acero y un contenido de carbono elevado se forma una estructura de grano grueso, que no influye significativamente en la resistencia del metal, pero que si disminuye significativamente su plasticidad. En estos casos la

resistencia al impacto puede caer en un 25% y más. El ancho de esta zona oscila entre 1 y 3 mm. Por lo anterior se considera una de las zonas que más afectación pueden sufrir en la ZAC y donde ocurren la mayoría de las fallas en servicio.

3. **Zona de normalizado:** Está constituida por el metal calentado algo por encima de  $Ac_3$  hasta la temperatura de aproximadamente  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En esta zona se obtiene una estructura de grano fino muy favorable desde el punto de vista de propiedades mecánicas, siendo en algunos casos incluso superiores a las del metal base no afectado. El ancho de la zona varía de 1,2 a 4 mm.

4. **Zona de recristalización incompleta:** Se presenta en la zona calentado a temperaturas entre  $Ac_1$  y  $Ac_3$ , que en los aceros de bajo carbono va de  $725$  a  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El metal en esta zona alcanza solo una recristalización parcial.

5. **Zona de Recristalización:** Durante la soldadura de los aceros que han sufrido deformaciones plásticas previas, en la zona que se calienta en el intervalo de  $450$  a  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de partes de granos surgen y crecen nuevos granos equiaxiales. Si el metal no ha sido previamente deformado plásticamente la recristalización no ocurre.

6. **Zona Frágil Azul:** En esta zona se presenta una coloración azul de la superficie del metal, luego del enfriamiento. Se caracteriza porque durante la soldadura de aceros de bajo carbono con contenidos de más de  $0.005\%$  de  $O_2$ ,  $0.005\%$  de  $N_2$  y  $0.0005\%$  de  $H_2$  ocurre una brusca caída de la resistencia al impacto. Esta es causada probablemente por el envejecimiento del metal, durante el cual la solución sólida sobresaturada segrega los componentes en exceso, en este caso nitrógeno u carbono, los que en forma de nitruros y carburos muy dispersos se agrupan alrededor de las zonas defectuosas de la red cristalina aumentando la resistencia del metal, pero disminuyendo su plasticidad.

Estas dos últimas zonas hay autores que las denominan **zonas de revenido**.

Metal base no afectado: En los aceros al carbono por debajo de la temperatura  $Ac_1$  no ocurren transformaciones importantes que afecten de forma importante las propiedades mecánicas, por lo que por debajo de esta temperatura se considera metal base no

afectado térmicamente. Algunos autores extienden la ZAC por debajo de esta temperatura porque determinados aceros son susceptibles de sufrir modificaciones.

El ancho obtenido en la ZIT y sus diferentes subzonas, dentro de la soldadura por fusión, se diferencia grandemente en el proceso de soldadura a llama (OFW) respecto a los diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico (SMAW, GMAW y SAW) ya que el primero es un proceso que utiliza una fuente de calor (llama) menos potente y concentrada que el arco, que avanza mucho más lentamente, con un baño más voluminoso, por lo que el calor introducido en la pieza por metro lineal es mucho mayor, obteniéndose una ZIT muy ancha.

### **1.6. Soldadura manual por arco eléctrico (SMAW)**

Al principio del siglo XIX (1802), académico ruso V. V. Petroff, observó que al hacer pasar la corriente eléctrica a través de 2 electrodos de carbón entre sus extremos surgía un arco incandescente cegador (la descarga eléctrica) la cual poseía una temperatura muy alta. Indicó la posibilidad de aprovechar el calor del arco eléctrico para fundir metales (Glizmanenko, 1965). En 1808 Sir Humphry Davy demuestra que es posible conducir electricidad en el aire entre dos electrodos.

La clasificación del proceso lo define la American Welding Society (AWS), 1996, como Shielded Metal Arc Welding, SMAW (ANSI/AWS A3.0) o Soldadura por arco metálico con electrodo revestido, 111 (EN 24 063).

El surgimiento del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido esta ligado al ingeniero marítimo sueco Oskar Kjellberg y al Inglés A. P Strohmenger. En el año 1910 Oskar Kjellberg, patentó un sistema de soldadura por arco empleando un metal de aporte revestido por inmersión con una mezcla de carbonatos y silicatos y luego secado al aire. Mas tarde, en 1912 Strohmenger patentó un electrodo fuertemente recubierto, capaz de producir a escala industrial soldaduras con buenas propiedades mecánicas.

Este es un proceso en el que su energía se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma en el espacio o entrehierro comprendido entre la pieza a soldar y una varilla que sirve como electrodo. Por lo general el electrodo también provee

el material de aporte, el que con el arco eléctrico se funde, depositándose entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 5 500 °C.

La corriente que se emplea en este sistema puede ser continua o alterna, utilizándose en los mejores trabajos la del tipo continua, debido a que la energía es más constante, con lo que se puede generar un arco más estable.

La corriente alterna permite efectuar operaciones de soldadura con el objeto de trabajo en posición horizontal y preferentemente en materiales ferrosos, mientras que la corriente continua no presenta esas limitaciones de posición y material.

### **1.7. Operacionalidad de los transportadores de mineral del tipo Jacoby**

En trabajos de algunos autores como (Pérez, 2007; Castellanos, 2008), se pudo contactar que en la planta de Hornos de Reducción la materia prima, que es el mineral seco y molido, es sometido a transformaciones químicas, fundamentalmente con el objetivo de reducir el óxido de Ni a Ni metálico, para así hacerlo apto para el proceso de lixiviación amoniaca. Para realizar este proceso la planta cuenta con la instalación de 24 hornos y 12 enfriadores rotatorios.

Una vez que el mineral se encuentre en las tolvas, pasa a los dosificadores de pesaje automático, los cuales son equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que este realiza.

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador, el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero a través de la válvula doble de polvo. Esta válvula neumática, al mismo tiempo que permite la alimentación del mineral al horno, sirve como sello para evitar que los gases calientes retornen a través del sinfín alimentador y afecte el equipo de pesaje.

Cada tramo del transportador está formado por un tubo unido a una bocina a través de cordones de soldadura, luego es acoplado al otro tramo a través de bridas acopladas con tornillos y, por su interior el tornillo sin fin. En los últimos tiempos la planta de hornos se ha visto afectada por las numerosas roturas de dichos tramos principalmente por la zona soldada. Con este trabajo pretendemos realizar un estudio a los tramos 2, 3 y 4, por ser los que presentan roturas con mayor frecuencia, con el objetivo de encontrar

una solución al problema existente. Ya que cada avería trae como consecuencia grandes daños al medio ambiente debido a las fugas de mineral y gases tóxicos, así como pérdidas en la economía de la empresa producto a los altos costos que lleva la reposición o reparación de los tramos, además de afectar el plan de la producción.

La avería ocurre generalmente cuando se agrieta la zona soldada que une el cuerpo tubular con la bocina, lo que provoca que se deba parar el proceso en la línea donde ocurre la misma, afectando la producción. Actualmente no existe una respuesta fundamentada de las causas de las roturas, en este trabajo se pretende dar una respuesta a la problemática planteada.

### **1.7.1. Caracterización de los tubos averiados**

La forma de la falla en los tubos de los transportadores Jacoby está muy extendido en plantas de níquel puesto que de manera general se comporta de la misma manera (Lambert 2000; 2001; 2002; 2004; 2005 y 2006). El inicio de muchas roturas no son detectadas de inmediato, provocando grandes averías.

Plantean (Rodríguez, Fernández, Llaca, 2006), es necesario la observación visual y el empleo de microscopio óptico (500X) de los esenciales aspectos geométricos de tubos averiados y de las superficies de la fractura, para identificar la forma de propagación, tamaño y posición relativa del defecto iniciador, además de la posición relativa respecto a los extremos de los principales concentradores de tensión del tubo, entre otros aspectos. Se realizaron ensayos de dureza, análisis químicos y se construyeron probetas metalográficas para identificar las características microestructurales del material de construcción. De dichos ensayos se obtuvieron conclusiones que permitieron determinar, a partir de la morfología de los defectos y su interacción con las características geométricas, el origen de las grietas, su modo de propagación, y su relación con la acción combinada de efectos del medio y condiciones de carga. De este modo se pueden establecer medidas para la prevención de la aparición de la rotura.

El cuerpo de los tubos del transportador es de 565 mm de diámetro con una longitud de 2 500 mm con dos rodillos de apoyo como cojinetes de contacto plano y tres agujeros de 350 mm X 150 mm cada uno, situados radialmente a  $120^{\circ}$

Según (Kachanov, 1999; Changan *et al.*, 1999), existen muchos factores que pueden contribuir de manera aislada o conjunta en la disminución de la resistencia de los elementos provocando la aparición de roturas; sin embargo, existe uno que predomina y generalmente constituye un factor común en las fallas ocurridas a elevadas temperaturas: las inestabilidades metalúrgicas.

Las inestabilidades metalúrgicas son los cambios que ocurren en la estructura metalográfica originados por permanencias a altas temperaturas. 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.

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.

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en líneas fundamentales: la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y los trabajos que sobre el tema de la caracterización de la rotura del transportador desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Lambert y Herrero (2002), abordan el análisis de la estabilidad operativa y capacidad de los transportadores de tornillos sinfín (Jacoby), siendo este muy necesario en la realización de este trabajo. Se evaluó el comportamiento de los Jacoby en cuanto a su estabilidad operativa y capacidad, donde se encontraron algunos problemas que conspiran contra estos aspectos. Las causas que originan los mismos son muy diversas y no solo se circunscriben al Jacoby, si no también a los hornos, por lo que las propuestas de solución abarcan a ambos equipos.

Lambert *et al.* (2004) y Rodríguez *et al.* (2007), realizaron un reporte de avería del tramo número 5 del transportador (Jacoby), donde se demostró que la principal causa de roturas es la formación de grietas favorecidas por las irregularidades de la superficie cortada con electrodos de carbón y los radios inadecuados de los extremos, las cuales se forman en los puntos de concentración de tensiones y crecen con la presencia de la

fatiga del material debido a las condiciones de trabajos del mismo, más cuando sean violado las indicaciones del proyecto de fabricación 304.539. 13 .7. 1. 01.

Herrero (2005), comprobó las posibilidades de los transportadores (Jacoby), estableciendo una metodología de cálculo, en la cual se hace una estimación de la capacidad del Jacoby, capacidad de la cuchara, la reserva para una capacidad del Jacoby  $Q = 21$  t/h por hornos y la longitud de la cuchara.

### **1.8. Conclusiones del Capítulo I**

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

- ❖ La bibliografía consultada, aporta información sobre agrietamiento en los transportadores de mineral del tipo Jacoby, relacionada con los concentradores de tensión en los agujeros del mismo, pero en ninguna se aborda el tema relacionada con el agrietamiento en las uniones de soldadura de los tramos.
- ❖ La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente.
- ❖ Los transportadores Jacoby producto de las roturas en las uniones soldadas, están presentando inestabilidad operativa trayendo como consecuencia grandes daños al medio ambiente debido a las fugas de mineral y gases tóxicos, así como pérdidas en la economía de la empresa producto a los altos costos que lleva la reposición o reparación de los tramos, además de afectar el plan de la producción.

## CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Introducción

Es de gran interés para la economía de nuestro país asegurar el buen funcionamiento de los transportadores de tornillos sinfín en la planta de hornos de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, es por ello la necesidad de tener una metodología de cálculo que asegure los parámetros de la producción deseados, así como el buen funcionamiento y la resistencia del material a elevadas temperaturas. La realización de experimentos de los materiales ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de averías en elementos y equipamientos industriales. Como **objetivo** este capítulo pretende:

Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

### 2.2 Preparación metalográfica de la probeta

Se tomaron varias muestras del transportador de tornillo sinfín correspondientes a los tramos 3 y 4 por ser uno de los más afectados por numerosas roturas. Las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente pulidas para poder realizar la observación microscópica, por lo que se propone realizar un conjunto de operaciones que permitan lograr la calidad superficial deseada. Las operaciones se resumen en el siguiente orden (Norma NC 10 - 56:86 y ASTM E3 – 95).

- Corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico.

Las muestras para la observación metalográfica con longitud de 15 x 15 (norma ASTM E3 – 95) se prepararon en una fresadora del tipo 6 H 82 Г.

Se realizó con una fresa de vástago marca P6 M5 de diámetro 20 mm y 8 dientes. Las probetas se elaboraron con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial, para ello se calcularon los siguientes parámetros:

Velocidad de corte.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n}{1000} \text{ m/min.} \quad (2.1)$$

Donde:

Df – Diámetro de La fresa.

N – Número de revoluciones

Profundidad de corte:

$$t = h \quad (2.2)$$

Tiempo de maquinado.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s \log} \cdot i \text{ min} \quad (2.3)$$

### 2.2.1. Desbaste y pulido

El desbaste a grandes rasgos consiste en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El pulido se hizo siguiendo las normas (ISO 9001) con los papeles abrasivos (tipo 180, 400 y 600), se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. En el pulido fino se empleó pasta abrasiva (Pasta GOI), añadida sobre discos provistos de paños o motas.

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para obtener una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL (ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM). Con el objetivo de lograr el acabado final, se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo. Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades se lavó la superficie con agua.

### 2.2.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar

Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

### 2.2.3 Ataque químico

Una vez pulidas las muestras hasta alcanzar un brillo de espejo, estas deben ser atacadas químicamente con el objetivo de resaltar la estructura obtenida, para ello se empleó Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>) con 5ml y Alcohol (etanol) 100 ml (ASTM E – 262 - Practice A), formando una sustancia química conocida como Nital al 4 %.

El Nital al 4%, resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos del acero. Pone en manifiesto las uniones de los granos de ferrita, la perlita se ennegrece y la cementita se mantiene blanca.

### 2.3 Análisis químico

Se comprobó la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigar. El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro de masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el laboratorio del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel.

Las muestras analizadas fueron tomadas de diferentes secciones de los tramos (tabla 2.1), a cada una de ellas se le realizaron de 3 a 6 chispazos separados uno del otro. Finalmente se toma una media de los resultados obtenidos por las chispas y se realiza una comparación para verificar que los valores se encuentren dentro del rango establecido.

Tabla 2.1. Materiales de las muestras analizadas.

Designación del material analizado.	No. de muestras.
Material de los tubos agrietados.	4
Material del tubo fabricado por norma china.	3
Material del tubo fabricado por norma soviética	3
Material de la brida agrietada.	3
Material de la brida Ac - 35 fundida en el combinado.	6
Material de la brida Ac - 25 fundida en el combinado.	6
Material de la brida fabricada por norma soviética	3
Material del cordón de soldadura agrietada.	4
Material del cordón de soldadura por norma soviética.	3
Material del cordón de soldadura por el método SAW.	3
Material del cordón de soldadura por el método SMAW	3
Material del cordón de soldadura con CO <sub>2</sub> .	3
Total	44

Para determinar si las muestras analizadas se corresponden con los estándares establecidos para la fabricación de los transportadores, se estableció la composición

química del acero. Los valores estándar del acero 25 (key to steel, 1999) y según norma Gost, se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición química del acero 25.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,22 - 0,30	0,17 - 0,37	0,50 - 0,80	0,035	0,040	0,25	0,005	0,30

## 2. 4 Determinación de las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas pueden ser determinadas a partir de ensayos, dentro de ellos juega un papel importante los de tracción y doblado como métodos destructivos. Estos últimos permiten determinar entre otras cosas la resistencia del cordón de soldadura. Para realizar las pruebas se utilizó una máquina de ensayo universal modelo P50 ubicada en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”.

Para realizar los ensayos, se elaboraron las probetas utilizando dos métodos diferentes, según las tecnologías de soldadura que se emplean en los tramos, para ello se tuvieron en cuenta los requisitos del cliente y las condiciones reales del proceso.

### 2.4.1 Diseño de experimento

El diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos que una vez analizados mediante métodos estadísticos los convierte en información que permite producir conclusiones válidas y objetivas.

Los diseños experimentales factoriales se clasifican en completamente aleatorizado, factorial de bloques, factorial fraccionado, bloque aleatorizado, diseño de bloque, cuadrado latino, cuadrado de Youden, anidado, superficie de respuesta y diseños mixtos (Juran, 2000). Para realizar el trabajo se empleó el diseño experimental completamente aleatorizado, el cual es un experimento de un solo factor.

Este diseño es apropiado cuando se estiman y comparan los efectos de los tratamientos y se dispone de un total de N unidades donde han de investigar k tratamientos. En nuestro caso se realizó una investigación para determinar el efecto que tenían dos métodos distintos en la resistencia mecánica de uniones soldadas, empleando ensayos de tracción y doblado. El diseño experimento se recoge en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Matriz de planificación del experimento.

Unidades	Tensión máxima a tracción ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) en kgf/mm <sup>2</sup> .	
	A - método (CO <sub>2</sub> )	B - método (SMAW - SAW)
1	1a	1b
2	2a	2b
3	3a	3b
4	4a	4b
Total	4	4

Este es un ejemplo de experimento aleatorio de un solo factor experimental en estudio (Tensión máxima a tracción). Hay dos métodos, es decir, el valor de tratamientos  $k$  es igual a 2. El número de unidades  $n$  asignadas aleatoriamente a cada tratamiento es de 4, para un total de unidades experimentales  $N$  igual 8.

Para el caso de los ensayos de doblado se empleó la misma matriz del experimento, con la diferencia de que se analizó la longitud de las grietas ocurridas durante el ensayo para ambos métodos.

#### 2.4.2 Métodos empleados para soldar las probetas

Las probetas se prepararon utilizando dos métodos de soldadura diferentes, el primero emplea la combinación de los procesos SAW – SMAW y el segundo el proceso CO<sub>2</sub>, procediendo de la siguiente forma:

- 1- Se soldaron 8 probetas (4 de tracción y 4 de doblado), para ello se empleó el proceso SMAW utilizando electrodo E-7018 en el interior, y por el exterior el proceso SAW utilizando alambre EL-12 Ø 3,2 mm y fundente Flux 429.
- 2- El otro método de ensayo consiste en soldar completamente la unión con proceso CO<sub>2</sub> (GMAW) empleando electrodo ER - 70S – 6. Para este caso también se prepararon 8 probetas (4 de tracción y 4 de doblado).

A partir de los métodos mostrados anteriormente, se prepararon 16 probetas en total, 8 para cada técnica de soldadura, el objetivo es caracterizar el más apropiado. Los procedimientos aparecen descritos a continuación:

### Preparación de las Probetas de Tracción y doblado por el método No 1.

- Se cortaron dos planchas del mismo material del tubo (acero al carbono), de dimensiones 203 x 287 (Norma ASME V), luego son enderezadas y desbastadas (Fresadora 6 H 82 Г) hasta un espesor de 8 mm. Para la unión se realizó la preparación de los bordes con bisel en doble V.
- Se corta la plancha a la mitad y se unen los dos extremos biselados utilizando el procedimiento de soldadura explicado para el método 1, (SMAW – SAW).
- Luego se cortan las probetas en tirillas según la Norma (ASME V), para ello se emplea una cizalladora. Las dimensiones son de 203 x 32 para las de tracción (figura 2.1) y de 203 x 38 para las de doblado (figura 2.2), finalmente son maquinadas.

### Preparación de las Probetas de Tracción y doblado por el método No 2.

Se realiza el mismo procedimiento de preparación que el método anterior, solo que en este caso se emplea el proceso de soldadura  $CO_2$ .

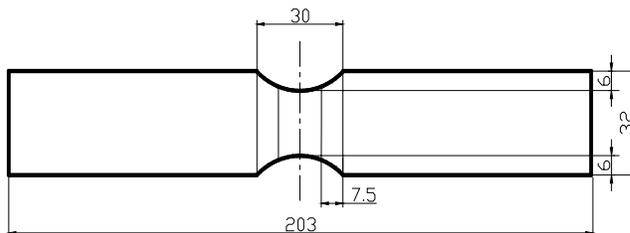


Figura 2.1. Probeta de ensayo a tracción.

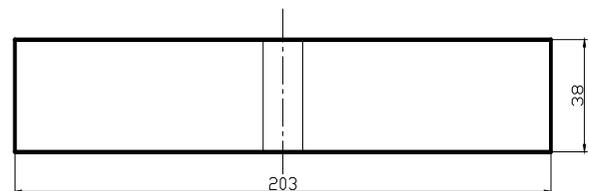


Figura 2.2. Probeta de ensayo de doblado.

#### 2.4.3 Propiedades mecánicas de los electrodos a utilizar

Durante el proceso de soldadura se emplearon tres tipos de electrodos con características similares recomendables para soldar aceros al carbono.

1- Electrodo desnudo (alambre) EL-12 empleado para la soldadura SAW.

Alambre sólido para uso en el proceso arco sumergido, el cual posee bajo contenido de carbono, manganeso y silicio. Adecuado para soldadura a tope y filete sobre aceros al carbono. Es usado con fundente, por lo tanto las propiedades del depósito son dadas por combinación de ellos, siendo sus aplicaciones más típicas la fabricación de vigas en todas sus formas, estanques, rellenos en general, recipientes a presión, etc.

- ❖ Pueden ser aplicados en múltiples pases en aceros que tengan un espesor menor que 25 mm.
- ❖ Escoria de fácil remoción.

2- Electrodo E-7018 utilizado para la soldadura SMAW.

Es recomendable para la soldadura de los aceros de bajo y medio carbono hasta 0.45% C, aceros al carbono- manganeso, aceros de baja aleación con resistencia a la tracción hasta 70000 Psi, aceros con alto contenido de azufre y fósforo considerados difíciles de soldar. Soldadura de aceros fundidos, aceros de grano fino.

Las aplicaciones específicas incluyen plantas de potencia, plantas petroquímicas, montajes de estructuras de acero, equipos de minería, soldadura en ambientes de baja temperatura donde las propiedades de impacto sean importantes, construcción de vagones de trenes, rieles, equipos pesados. Construcciones navales en aceros de los grados A, B, D, y E, erección de plataformas costa afuera, construcción de calderas, tanques, gasoductos y oleoductos.

3- Alambre de soldadura AWS ER - 70S – 6 empleado para soldar con  $CO_2$ .

Utilizado para el acero con poco carbono de la soldadura y las estructuras de acero poco aleadas, especialmente para la soldadura de placas finas y puede ser aplicado a los aceros de carbono, a los vehículos, a la construcción, a la construcción naval, etc.

Apto para soldadura de planchas, tubos conexiones y accesorios en aceros aleados con 0,5% de cromo y 0,5% de molibdeno, resistentes a la termofluencia lenta hasta temperaturas de servicio de 525 °C tales como A335.

## **2.5 Análisis microestructural por el método de examen microscópico**

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, 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. La figura 2.3 corresponde con la estructura metalográfica del acero 25 según norma soviética, (ferrita y perlita).

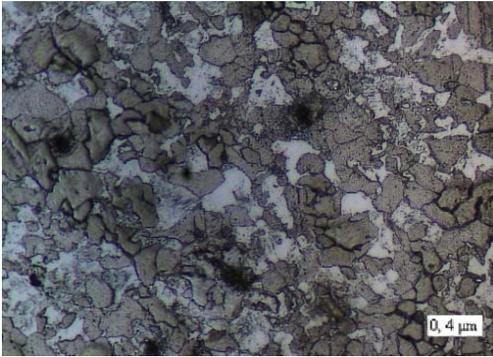


Figura 2.3. Microestructura del acero 25 según norma GOST.

Para el análisis se utilizaron diferentes muestras tomadas de los tramos y las uniones soldadas para observar el comportamiento de la estructura en las diferentes zonas señaladas a partir de la influencia del calor desprendido en el proceso de soldadura. Además del comportamiento en dos métodos de soldaduras diferentes, para ello se tomaron las siguientes muestras que se observan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Muestras seleccionadas para el análisis microestructural.

No	Muestras.
1	Material del tubo fabricado por norma china
2	Material del tubo fabricado por norma rusa.
3	Material de la brida fundida en el combinado.
4	Material de la brida fabricada por norma soviética.
5	Material del cordón de soldadura agrietada.
6	Material del cordón de soldadura por norma soviética.
7	Material del cordón de soldadura por el método SAW.
8	Material del cordón de soldadura por el método SMAW
9	Material del cordón de soldadura con CO <sub>2</sub> .
10	Material del tubo roto.

## 2.6 Cálculo del cateto de soldadura

Con el objetivo de comprobar que el cateto de soldadura obtenido en los tramos cumple con las dimensiones apropiadas, se decidió calcular el mismo. Para una barra de sección circular sometida a la acción de un momento torsional el cateto se puede calcular por la siguiente fórmula (Dobrovolkis, 1983).

$$K = \frac{2M_t}{0,7 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot [\tau_{Ciz}]} \quad (2.4)$$

**Donde:**

$M_t$  - Momento torsor al que está sometido el transportador.

$[\tau_{ciz}]$  - Tensión admisible de cizallamiento que soporta el material.

$d$  - Diámetro del tubo a soldar.

El transportador gira a 27,7 revoluciones por minuto bajo la acción de un momento torsor, este último depende de la Potencia (N) y la velocidad angular ( $\omega$ ) al que está sometido el Jacoby.

$$M_t = \frac{N}{\omega} \quad (2.5)$$

Los tramos del transportador están contruidos de acero al carbono, la Tensión máxima de cizallamiento que admite este material sin que ocurra la rotura depende de la tensión de fluencia ( $\sigma_f$ ), que para el caso del acero 25  $\sigma_f = 3020 \text{kgf} / \text{cm}^2$ , por tanto:

$$[\tau_{ciz}] = 0,4[\sigma_f] \quad (2.6)$$

## 2.7 Cálculo del carbono equivalente

En los aceros al carbono y de baja aleación la propiedad de templabilidad determina, en muchos casos, la propiedad de soldabilidad, (Fernández y Rodríguez, 2007). El contenido de carbono es el que más afecta esta propiedad, de ahí que la influencia de los elementos químicos que componen el acero sobre la templabilidad se acostumbra a cuantificar a partir de un parámetro conocido como carbono equivalente (Ceq).

Según (Fernández y Rodríguez, 2007) la siguiente expresión para determinar el carbono equivalente de un acero:

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%) \quad (2.7)$$

**Donde:**

Mn – Manganeso.

Cr – Cromo.

V – Vanadio.

Mo – Molibdeno.

Ni – Níquel.

Cu – Cobre.

## 2.8 Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura

Una de las medidas tomadas para evitar el agrietamiento en frío es utilizar un precalentamiento antes y después de la soldadura. Para determinar la temperatura de precalentamiento, primeramente se determina un Carbono Equivalente Total (CT).

$$CT = Ceq (1+0,005*S) \quad (\%) \quad (2.8)$$

**Siendo:**

CT - Carbono Equivalente Total.

Ceq – Carbono equivalente.

S – Espesor.

Luego se determina la Temperatura de precalentamiento.

$$T_{prec} = 350\sqrt{CT - 0,25} \quad (\text{Grados Celsius}). \quad (2.9)$$

**Donde:**

T<sub>prec</sub> – Temperatura de precalentamiento (Grados Celsius).

CT – Carbono equivalente total (%).

Nota: si el carbono equivalente (Ceq) es inferior a 0,45% el precalentamiento es opcional, mientras que si supera este valor entonces la temperatura de precalentamiento se determina por la expresión anterior.

## 2.9 Cálculo de resistencia mecánica

Para calcular la resistencia mecánica (Fernández, 1983), se aplican las siguientes fórmulas:

$$\tau_{\max} = \frac{Mt}{Wp} \leq [\tau] \quad (2.10)$$

En el que:

$\tau_{\max}$  - Es la tensión máxima al que está sometido el transportador.

Wp - modulo de la sección a torsión.

$[\tau]$  - tensión admisible, para acero 1020 la  $[\tau]=3020\text{kgf/cm}^2$

Mt - Momento torsor con que trabaja el transportador.

$$[\tau] = 0,5[\sigma] \quad (2.11)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{rest}}{n} \quad (2.12)$$

$$W_p = 0,2 * D^2 (1 - C^4) \quad (2.13)$$

$$C = \frac{d}{D} \quad (2.14)$$

Siendo;

n- El coeficiente de seguridad.

### 2.10 Cálculo de la productividad según Shubin. V. S. (1986)

Es necesario conocer si el transportador cumple con la productividad en t/h del mineral descargado que es demandada por la producción para saber si está siendo o no rentable.

Para determinar la productividad del transportador se tuvo en cuenta la siguiente fórmula que se denota para los transportadores de tornillos inclinados y horizontales con tornillo continuo de productividad:

$$Q = V \cdot \gamma_a = 60 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot s \cdot n \cdot \varphi \cdot \gamma_a \cdot C_\beta, \text{ [t/h]}. \quad (2.15)$$

Donde;

s- El paso

n- Número de revoluciones

$\varphi$  -coeficiente de llenado.

La magnitud del coeficiente  $C_\beta$  depende del ángulo de inclinación del transportador con respecto al horizontal,  $\beta$  (tabla 2.5).

Tabla 2.5. Relación entre  $C_\beta$  y  $\beta$ .

Angulo $\beta$	$0^0$	$5^0$	$10^0$	$15^0$	$20^0$
Coficiente $C_\beta$	1	0,9	0,8	0,7	0,65

La potencia requerida se determina prácticamente mediante datos empíricos, por la ecuación:

$$N_t = \frac{Q \cdot L}{367} \cdot (\omega \pm \text{sen} \beta), [\text{kW}] \quad (2.16)$$

$\omega$ : Coeficiente empírico de resistencia al movimiento, que depende del tipo de carga a transportar, para este caso hemos tomado...4.0.

Potencia del árbol del motor considerando el rendimiento del mecanismo de la transmisión

$$N = \frac{N_t}{\eta}, [\text{kW}] \quad (2.17)$$

### 2.11 Métodos de elementos finitos (M.E.F)

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

Actualmente el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física como un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, entre otros.

El método de elemento finito (MEF) consiste en la transformación de un sistema de ingeniería con infinitas incógnitas a un modelo de elementos finitos. En realidad es una idealización matemática de un sistema real cuyo comportamiento deberá, al menos, de ser intuitivo, pues de otro modo la modelación puede ser muy laboriosa o imposible.

### **2.11.1 Pasos a seguir para la modelación por el MEF**

Para poder desarrollar la simulación por el método de elemento finito (MEF), es necesario tener en cuenta una serie de pasos lógicos que permitan lograr un resultado satisfactorio durante la modelación.

1. Importar el elemento como Acis. Sat.
2. Crear el tipo de estudio.
3. Asignar las constante reales del elemento (Si son necesarias).
4. Asignar las propiedades del material.
5. Generar el mayado del modelo.
6. Aplicar las condiciones de contorno (Fuerzas y desplazamientos).
7. Asignar las condiciones para resolver el sistema (Solución).
8. Interpretar los resultados.



## 2.12. Conclusiones del Capítulo II

1. Se fundamentaron las propiedades a investigar, definiendo los principales parámetros a medir y obtener de las muestras a través del empleo de métodos científicos de investigación y ensayos mecánicos.
2. Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías, software y equipamiento novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se realizará un análisis de los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, y se establece un 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 la realización de los experimentos, cálculos y simulaciones. Se realiza además una valoración económica de la fabricación de los tramos en varios sentidos, así como el impacto medioambiental que trae consigo la rotura de los mismos.

El objetivo del capítulo es:

Analizar los resultados del desarrollo de este trabajo, contando con la valoración económica y el impacto medioambiental para explicar los fundamentos que dan la solución al problema planteado.

### 3.2 Análisis químico

Teniendo en cuenta la composición química del acero estándar, establecida en el epígrafe 2.3 del capítulo II, se comprueba, que los tubos rotos pertenecen a un acero 25 (tabla 3.1) y que la composición química realizada a los tubos de fabricados por norma china (tabla 3.2), así como los de fabricación soviética (tabla 3.3) poseen una composición similar a dicho acero.

Tabla 3.1. Composición química los tubos rotos de los tramos 3 y 4.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,17	0,20	0,85	0,022	0,014	0,05	0,01	0,04	98,49

Tabla 3.2. Composición química los tubos fabricados por norma china.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,17	0,22	0,93	0,017	0,001	0,06	0,01	0,02	98,48

Tabla 3.3. Composición química los tubos fabricados por norma rusa.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,19	0,24	0,64	0,014	0,029	0,03	0,005	0,04	98,76

Se puede observar que aunque existen algunas diferencias mínimas en el porcentaje de sus componentes, estas se encuentran en el rango establecido para la clasificación del acero dentro de los estándares.

Las bridas son fabricadas por la Empresa Mecánica Gustavo Machín Hoed de Beche. Se efectuó el análisis espectral de las mismas (tabla 3.4) y se comparó con la especificación de los planos.

Tabla 3.4. Composición química las bridas rotas.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,38	0,35	0,61	0,02	0,09	0,15	0,02	0,19	97,86

Como se observa, el porcentaje de carbono en las bridas rotas se encuentra elevado en comparación con el especificado en los planos, esto se muestra mejor en el gráfico de la figura 3.1.

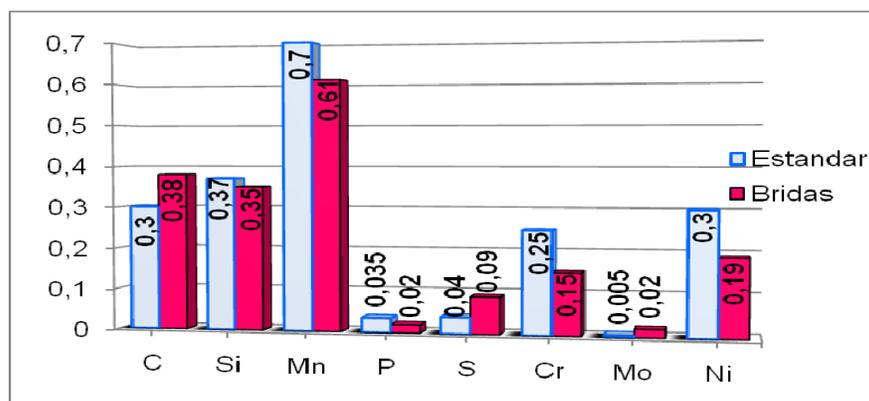


Figura 3.1. Comparación entre la composición química de las bridas rotas y el acero estándar.

La mayoría de los elementos, para el caso de las bridas rotas son elevados en comparación con el acero estandarizado. A pesar de que el porcentaje de carbono inicialmente no afecta la soldadura en el material, este elemento influye en la soldabilidad del mismo en la medida que se incrementa en los aceros, para medio contenido de carbono la soldabilidad es limitada, además provoca la aparición de fase martensítica.

Con el objetivo de verificar las bridas que se estaban fundiendo actualmente para el año 2009, se analizaron 5 de las fabricadas en el mes de octubre. Como se puede observar en la tabla 3.5 el porcentaje de carbono es elevado, siendo este un acero de medio contenido de carbono.

Tabla 3. 5. Composición química las Bridas fundidas en el Combinado (acero 35).

Muestras	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
1	0,37	0,41	0,44	0,019	0,02	0,02	0,01	0,14	98,08
2	0,32	0,24	0,46	0,025	0,013	0,13	0,01	0,10	98,37
3	0,33	0,24	0,54	0,032	0,014	0,17	0,02	0,14	98,14
4	0,39	0,45	0,81	0,018	0,012	0,08	0,01	0,08	97,84
5	0,32	0,29	0,45	0,017	0,012	0,08	0,01	0,07	98,50

Como resultado de lo anterior visto, se comenzaron a fabricar desde entonces las bridas de acero 25 como lo indicaban los planos. Para los meses de noviembre el taller 08 de fundición había fabricado alrededor de 6 bridas de bajo porcentaje de carbono (tabla 3.6) con las cuales se comenzarían a fabricar los tramos.

Tabla 3.6. Composición química las bridas fundidas de acero 25.

Muestras	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
1	0,23	0,29	0,54	0,022	0,010	0,26	0,02	0,14	98,04
2	0,26	0,37	0,64	0	0	0,14	0,02	0,10	98,11
3	0,22	0,28	0,47	0,013	0,012	0,11	0,02	0,12	98,38
4	0,22	0,33	0,53	0,012	0,013	0,12	0,02	0,13	98,26
5	0,22	0,31	0,47	0,015	0,011	0,09	0,02	0,10	98,35
6	0,26	0,33	0,57	0,017	0,012	0,09	0,01	0,09	98,29

Los primeros tramos fabricados por normas soviética duraron alrededor de 20 años, los mismos estaban fabricadas de acero de 0,25% de carbono tanto los tubos como los platillos o bridas, es por ello que se analizó la composición química del metal depositado en la soldadura realizada por norma soviética (tabla 3.7), donde el porcentaje de carbono obtenido es bastante aceptado.

Tabla 3.7. Composición química la soldadura obtenida en los tramos rusos.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,15	0,42	1,06	0,025	0,032	0,07	0,01	0,10	97,93

Los tubos empleados actualmente para la construcción de los tramos son comprados en China, los mismos se clasifican en tuberías con costura, ya que presentan una costura en toda su longitud. La composición química mostrada en la tabla 3.8, pertenece al cordón de soldadura de la tubería de fabricación china.

Tabla 3.8. Composición química del cordón de soldadura.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,13	0,7	1,33	0,039	0	0,05	0,01	0,02	97,58

Se compararon las soldaduras fabricadas por las normas rusa y china con la obtenida en los tramos rotos soldados en el combinado (tabla 3.9).

Tabla 3.9. Composición química de la soldadura de los tramos rotos.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,09	0,28	0,73	0,026	0,016	0,04	0,005	0,06	97,60

Se puede observar que el porcentaje de carbono de esta última es muy bajo, ya que se requiere que la composición química de la soldadura (metal depositado) sea similar en porcentaje y estructura al metal base o lo mismo que material del tubo (tabla 3.2).

El carbono no excede el 0,1% en todas las muestras obtenidas de la soldadura de los tramos rotos, Esto puede estar dado por el proceso empleado en la unión de los mismos. En el caso del cromo y el níquel también se mostraron inferiores, esto lo pudo haber provocado los bajos valores obtenidos en las bridas fundidas.

Con el objetivo de verificar e incrementar el contenido de carbono y la resistencia mecánica en los cordones de soldadura, se analizó el electrodo y alambre utilizado, así como la influencia del método de soldadura en la resistencia mecánica. Para ello se soldaron las probetas empleando diferentes procesos de soldadura (tablas 3.10, 3.11 y 3.12).

Tabla 3.10. Soldadura por el método SAW.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,15	0,45	1,09	0,018	0,013	0,04	0,01	0,04	98,08

Tabla 3.11. Soldadura por el método SMAW.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,13	0,22	1,14	0,048	0,019	0,05	0,02	0,04	98,13

Tabla 3.12. Soldadura por el método CO<sub>2</sub>.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,13	0,61	1,01	0,013	0,022	0,03	0,02	0,03	97,98

El por ciento obtenido inicialmente es casi el mismo, la diferencia no es muy significativa y el porcentaje es aceptable, sin embargo al analizar la soldadura de los tramos rotos (tabla 3.9), se observa que el carbono es muy bajo. La causa del bajo contenido de carbono puede estar dada por la descarburización, producto a las altas temperaturas que está sometido el Jacoby.

### 3.3. Pruebas de Ensayos Mecánicos

Con el objetivo de garantizar la mayor resistencia mecánica posible en la unión soldada, Se emplearon dos métodos de soldadura diferentes, ya explicados en el capítulo 2, epígrafe 2.4 y se prepararon probetas de ensayos de tracción mostrada en la figura 3.2 y doblado en la figura 3.3.



Figura 3.2. Probeta de ensayo de tracción. Figura 3.3. Probeta de ensayo de doblado.

En la figura 3.4 se muestra el comportamiento de la probeta después de ser sometida al ensayo de tracción.



Figura 3.4 Probeta después de realizarle el ensayo de tracción.

Los valores de la carga máxima soportada por las diferentes probetas durante los ensayos de tracción con soldadura SAW y SMAW, así como la soldadura CO<sub>2</sub>, se recogen en el anexo 3. En la figura 3.5 se muestra una gráfica de los valores de carga alcanzados por cada probeta, denotadas por azul las soldadas con CO<sub>2</sub> y por rojas las que se fabricaron empleando el método SAW y SMAW.

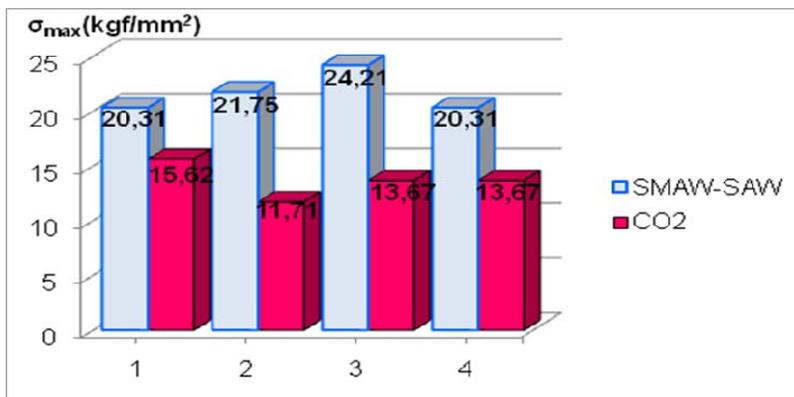


Figura 3.5. Gráfica de las cargas de tracción para cada probeta.

Estos resultados demuestran que el método más factible es el proceso de soldadura que emplea arco sumergido (SAW) por el exterior y electrodo E - 7018 por el interior, ya que las probetas de tracción por este método soportaron mayores tensiones para una media de 21,64 kgf/mm<sup>2</sup>, sin embargo las soldadas con CO<sub>2</sub> solo llegaron a obtener valores con una media de 13,66 kgf/mm<sup>2</sup>.

Los valores obtenidos en las pruebas de doblado para las cuatros probetas soldadas por los métodos SAW y SMAW se pueden observar en la tabla 3.13 y los ensayos de las cuatros probetas por el proceso de CO<sub>2</sub>, se recoge en la tabla 3.14. La condición para la evaluación de los procesos es de satisfactorios para aquellas probetas que no presentaran agrietamiento y no satisfactorios en caso contrario.

Tabla 3.13. Resultados de los ensayos de doblado (SAW y SMAW).

Ensayos	Resultados.	Electrodos
1	Satisfactorio	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
2	Satisfactorio	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
3	Satisfactorio	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
4	Satisfactorio	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018

Como se puede observar en los resultados de la tabla anterior, obtenidos de los diferentes ensayos se evaluaron de satisfactorios, lo que se cumple la condición de que este método presenta buenas propiedades de resistencia a la soldadura.

Tabla 3.14. Resultados de los ensayos de doblado (CO<sub>2</sub>).

Ensayos	Resultados.	Electrodos
1	No satisfactorio	ER-70S-6
2	No satisfactorio	ER-70S-6
3	No satisfactorio	ER-70S-6
4	No satisfactorio	ER-70S-6

Los resultados de las probetas sometidas al ensayo de doblado después de ser soldadas por el proceso CO<sub>2</sub>, son evaluados de no satisfactorios, debido a la aparición de grietas al ser dobladas. Según el reporte de esta prueba se recomienda el no empleo del proceso en la unión de los tramos. Se puede considerar que la causa fundamental está dado por el gradiente de temperatura que se genera durante el soldeo, lo cual provoca la aparición de estructuras desfavorables, además de la descarburación del material haciéndolo más susceptible al agrietamiento.

### 3.4. Análisis Metalográfico

Se realizó el análisis microestructural a cada una de las muestras seleccionadas en la tabla 2.4 del capítulo II, y se compararon con la estructura estándar seleccionada para la fabricación de los tramos (figura 2.3 en el epígrafe 2.5 del capítulo anterior).

Primeramente se analizó el material los tubos de fabricación China (figura 3.6) y se comparó con la estructura del acero 25 según norma soviética.

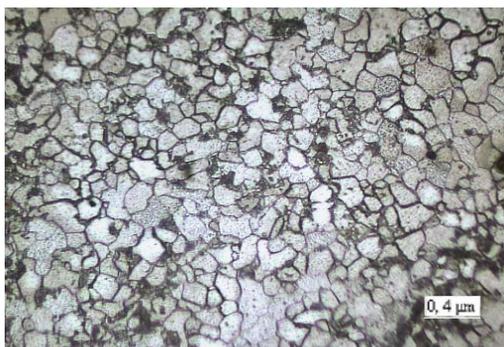


Figura 3.6. Microestructura del tubo fabricado por norma China, (400 X).

Como resultado se obtuvo una estructura homogénea de granos finos de ferrita y perlita, típico en los aceros recocidos o normalizados. La misma presenta características bastante similares a la muestra.

Cuando analizamos el material de los tubos de fabricación soviética empleados en los tramos que duraron casi 20 años, podemos observar que la estructura también es de ferrita y perlita (figura 3.7), por tanto el material de los tubos utilizado no presenta influencia perjudicial que pueda afectar la durabilidad de los tramos.

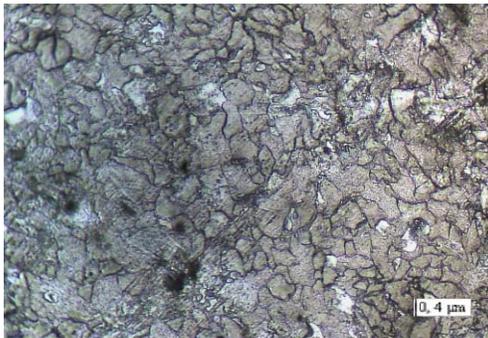


Figura 3.7. Microestructura del tubo de fabricación soviética. (400 X).

Teniendo como base la estructura de los tubos, se analizó el material de las bridas. En la figura 3.8 se puede observar la estructura que predomina en ellas. Las cuales fueron tomadas de los tramos rotos con medio por ciento de carbono, y de bridas sin usar.

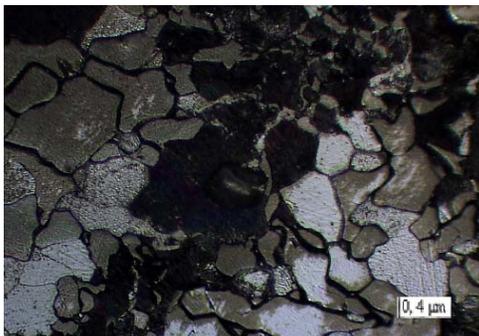


Figura 3.8. Microestructura de las bridas. (400 X).

Como se puede observar en esta última se forma una estructura de ferrita y perlita con granos más gruesos que la estandarizada.

Teniendo en cuenta que la parte tubular es unida con las bridas a través de soldadura y por tanto deben tener estructuras similares podemos deducir que el material de las bridas fundidas en el combinado no es muy favorable.

Cuando analizamos uno de los tubos rotos, ya sometidos a las condiciones de trabajo del Jacoby (figura 3.9), se puede observar que en la unión soldada la estructura del metal depositado (parte oscura) presenta un fondo de granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita, y la zona fundida del metal base (parte clara) presenta granos finos, alineados y aciculares, similar a la estructura basáltica.

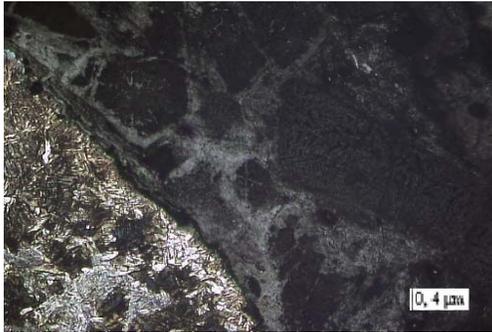


Figura 3.9. Microestructura en la unión del cordón de soldadura agrietada (400 X).

Según lo visto en la figura anterior se puede deducir que la unión soldada presenta falta de fusión y forma una estructura desfavorable para la soldadura. Además en varios tramos se puede observar la presencia de poros y grietas en la unión soldada (figuras 3.10 y 3.11) las figuras pertenecen a un tramo 3 y 4 respectivamente.



Figura 3.10. Presencia de poros en la soldadura de tramo 3, (100 X).



Figura 3.11. Presencia de grietas en la soldadura de un tramo 4, (100 X).

Las soldaduras que tienden a formar una estructura de Widmanstaetten, de ferrita (clara) y perlita (oscura) poseen la particularidad de tener una gran fragilidad, por lo que es desfavorable para las uniones soldadas. La figura 3.12 presenta una estructura similar a la mencionada anteriormente, La cual pertenecen a una muestra tomada de la soldadura que une el tubo con la brida de un tramo roto.

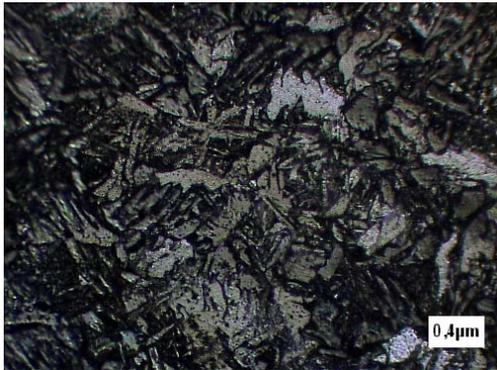


Figura 3.12. Estructura de la soldadura similar a la de Widmanstaetten, (400 X).

Otro de los tramos rotos analizados nos muestra una estructura basáltica que aparecer en la zona fundida (figuras 3.13 y 3.14).

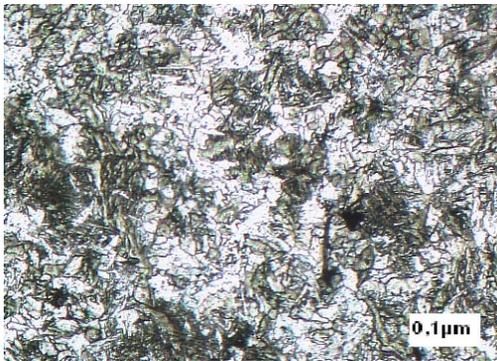


Figura 3.13. Microestructura basáltica en la soldadura, (100 X).

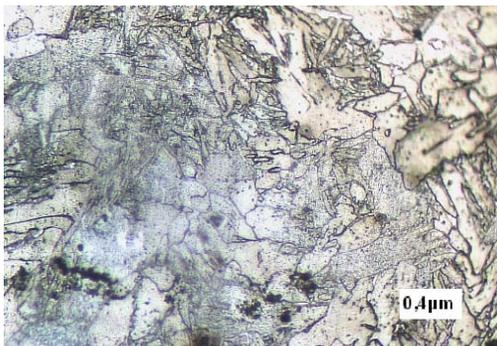


Figura 3.14. Unión de la soldadura, estructura basáltica,(400 X).

En varias muestras se observó que la estructura del metal base es de ferrita y perlita orientada, tal como lo muestra en la figura 3.15. Esto ocurre generalmente cuando la unión soldada se realiza sin precalentamiento.

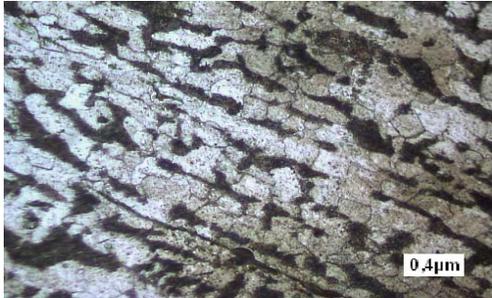


Figura 3.15. Microestructura del metal base, ferrita y perlita orientada (400 X).

Si observamos además el tamaño de grano de las figuras anteriores obtenidas en las uniones soldadas y lo comparamos con el material de la brida (figura 3.9), se observa una diferencia muy significativa, lo cual demuestra que la soldadura depositada es desfavorable, ya que para obtener una soldadura resistente, el metal de aporte así como el depositado debe tener características similares al metal base.

Con el objetivo de elegir el método de soldadura más apropiado partiendo de la estructura formada por el mismo, se prepararon probetas empleando soldaduras diferentes.

A partir de una soldadura con electrodo E-7018 por el método SMAW (figura 3.16), utilizando corriente directa con polaridad invertida y un amperaje de 120 A, empleando un voltaje de 40 V, se obtuvo una estructura fina y coalescida de ferrita y perlita.

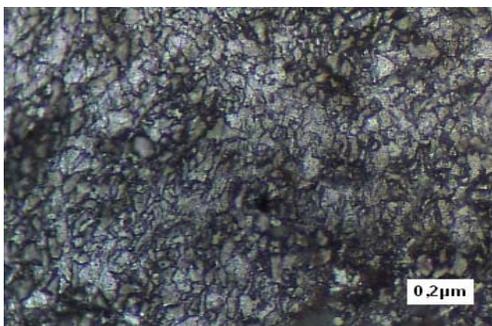


Figura 316. Soldadura con electrodo E-7018 (200 X).

A partir del método SAW empleando electrodo desnudo (alambre) EL-12 Ø 3,2 mm y fundente Flux 429, con un amperaje de 200 A, se obtiene una estructura de ferrita sobresaturada más bien bainita acicular (figura 3.17).

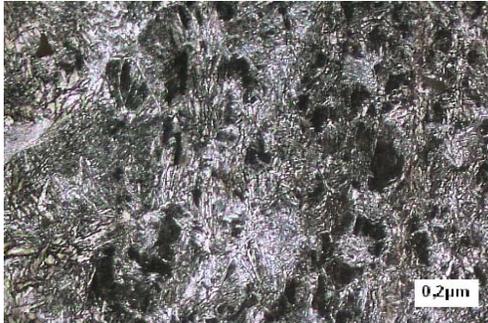


Figura 3.17. Soldadura por el método SAW (200 X).

En la figura 3.18 se observa la unión de las dos soldaduras mostradas anteriormente, obtenidas en las probetas de los ensayos de tracción y doblado, por el primer método (SMAW y SAW).

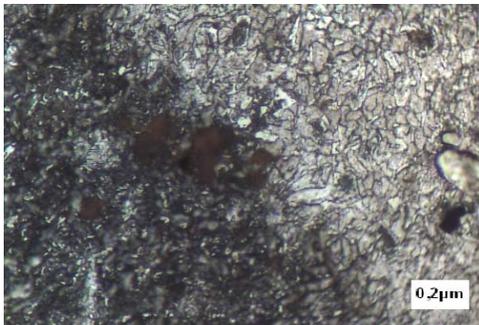


Figura 3.18. Soldadura por el método SAW (200 X).

Por último mediante la soldadura con  $CO_2$  (GMAW) empleando electrodo ER - 70S – 6 con un amperaje de 300 A, se obtiene una estructura de Widmanstaetten incompleta (figura 3.19), siendo menos recomendable, debido a su gran fragilidad.

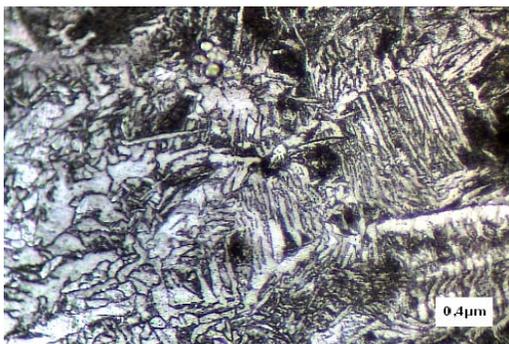


Figura 3.19. Soldadura con  $CO_2$  (400 X).

La estructura de Widmanstaetten está caracterizada por una simetría que sigue tres o cuatro direcciones, y se manifiesta como una estructura de fragilidad en los aceros. Su aparición depende de tres factores principales; (Composición química, sobrecalentamiento en la fase  $\gamma$  y la velocidad de enfriamiento a partir de esta fase, ver anexo 4). Esta estructura puede evitarse técnicamente, de manera tal que en la forma de soldar no se detenga mucho tiempo el electrodo en un punto, para evitar el sobrecalentamiento.

### 3.5. Resultados fractográficos

Existen varios factores que influyen en el agrietamiento y las roturas del cordón de soldadura en los tramos del transportador de mineral Jacoby. Durante la búsqueda de los mismos hemos podido observar una serie de elementos que damos a conocer a continuación que influyen de cierta manera en la durabilidad de la unión soldada.

1- La preparación de bordes tiene gran influencia en la resistencia de la soldadura. Para espesores de 16 mm, el bisel debe ser en doble V, (según American Welding Society, 1996), sin embargo, fotos tomadas a las muestras extraídas de los tramos rotos (figuras 3.20, 3.21 y 3.22), demuestran que el bisel realizado por el interior ha sido insuficiente, llevando consigo la falta de penetración y con ello el debilitamiento de la unión soldada.



Figura.3.20. Parte interior.      Figura.3.21. Parte exterior.      Figura.3.22. Ambos cordones

2- Las bridas fundidas en el taller 08 del Combinado Mecánico, como lo muestra la figura 3.23, presentan en la mayoría de los casos, defectos de fundición, entre ellos la presencia de poros que se pueden apreciar a simple vista. En ocasiones la soldadura se ve afectada por cavidades llenas de arenas que van apareciendo durante el proceso. En el mes de noviembre del 2009 se rechazaron por parte de dirección y tecnólogos del Taller 06 cerca de 5 bridas por defectos de fundición.



Figura.3.23. cavidades y presencia de poros en las Bridas.

3- El ensamble de las bridas con el tubo no se hace con la precisión requerida, ya que el taller no cuenta con un dispositivo donde se pueda montar, alinear y soldar de tal forma que el tramo quede perfectamente centrado. Realizando una simulación con el empleo del software Cosmos Design se puede observar que un tramo centrado (figura.3.24) soporta aproximadamente 70000 Nm, sin embargo uno descentrado (figura.3.25) solo soporta 7000 Nm, menos del doble de torsión. Demostrando que este puede ser otro problema de rotura, ya que el transportador gira alrededor de 27,7 revoluciones por minutos y la centralidad es fundamental.

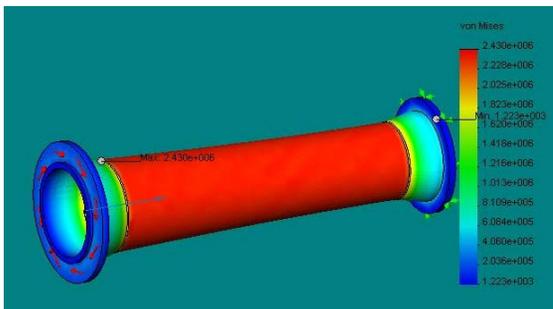


Figura.3.24. Tramo centrado.

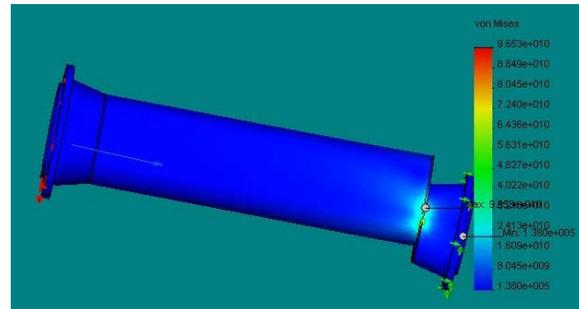


Figura.3.25. Tramo descentrado.

### 3.6. Cálculo del cateto de soldadura

Según la ecuación (2.5) el momento torsor al que está sometido el transportador es de 76816 kgf\*cm y la tensión de cizallamiento es  $[\tau_{ciz}] = 604 \text{ kgf} / \text{cm}^2$  para una tensión de fluencia del material  $\sigma_f = 3020 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ . Por tanto según la expresión (2.4) el cateto de soldadura debe ser  $K > 4 \text{ mm}$ .

### 3.7. Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura

Para el caso de las Bridas de acero 25 el carbono equivalente es  $C_{eq} = 0,32\%$  según la ecuación (2.7). Como el valor de ( $C_{eq}$ ) es menor de  $0,45\%$  el precalentamiento es opcional.

Teniendo en cuenta que algunas de las Bridas fundidas se hacen de acero 35 y son montadas por problemas de cumplimiento en la producción, se calculó el carbono equivalente para este acero, donde  $C_{eq} = 0,47\%$  según la ecuación (2.7), por tanto se requiere una temperatura de precalentamiento de  $180^{\circ} C$  según la expresión (2.9), con la cual se eliminan las tensiones internas del material.

### 3.8. Cálculo de resistencia mecánica

Según los cálculos realizados, la condición de resistencia se cumple, ya que la tensión máxima que genera el transportador es menor que la que admite el material de los tramos ( $\tau_{max} \leq [\tau]$ ). Según la ecuación (2.10) la  $\tau_{max} = 557 \text{ kgf} * \text{cm}^2$  para  $W_p = 137,9 \text{ cm}$  ecuación (2.13), y  $[\tau] = 755 \text{ kgf} * \text{cm}^2$  (ecuación 2.11). En resumen se puede decir que si el tramo está bien soldado y cumple con los requisitos de diseño, puede soportar las cargas y el torque al que está sometido el transportador.

### 3.9. Resultados del cálculo de la productividad

Para el cálculo de la productividad se empleó la ecuación 2.15 tomando los siguientes datos;

$$S = 527 \text{ mm}$$

$$n = 27,7 \text{ rev/min.}$$

$$\varphi = 0,35$$

$$\gamma_0 = 0,8$$

$$C_{\beta} = 1$$

Se obtuvo como resultado que la productividad **Q = 53 t/h**

La potencia requerida según la ecuación (2.16), para  $L = 30867 \text{ mm}$  y  $\omega = 4$  es de  $N_t = 17,8 \text{ kW}$

La potencia del árbol del motor considerando el rendimiento del mecanismo de la transmisión es de  $N = 0,64 \text{ kW}$  Según la ecuación (2.17).

### **3.10. Resultados obtenidos en la producción a partir de la investigación**

Partiendo de los resultados obtenidos en el presente trabajo se decidió fabricar cuatro tramos de prueba. En los meses de noviembre y diciembre del 2009 se prepararon los tramos empleando el proceso SMAW utilizando electrodo E-7018 en el interior, y por el exterior el proceso SAW utilizando alambre EL-12  $\varnothing$  3,2 mm y fundente Flux 429. La preparación de bordes se realizó de manera eficiente, en doble V a  $30^\circ$ , luego de soldados se realizaron ensayos de radiografías. La prueba se designó con la marca (PRUE – 1, AC-35, 09) y (PRUE – 2, AC-25, 09). En enero del 2010 se montaron dos tramos en el transportador 6 y dos en el transportador 9. Hasta la fecha están trabajando perfectamente arrojando mejores resultados que los fabricados años atrás, ya que en ocasiones duraban hasta 15 días o un mes según estadísticas realizadas, (Rodríguez *et al.*, 2007).

### **3.11. Valoración económica**

Una vez realizado el trabajo se tuvo en cuenta una estimación del costo de inversión del mismo, además de algunos gastos, tanto de materiales como de materia prima. Con la realización del trabajo, es beneficiada económicamente la empresa, ya que se puede incrementar la durabilidad de la pieza en cuestión. Además se puede lograr una mayor resistencia a la rotura, ya que los resultados obtenidos durante las investigaciones sin dudas permitirán mejorar la fabricación de los tramos del Jacoby, y con ello un funcionamiento más eficiente del transportador en general.

#### **3.11.1. Costo de fabricación de las probetas para los ensayos de resistencia mecánica.**

Para los ensayos de tracción y doblado se fabricaron diferentes probetas con planchas de acero (Ac – 20), según norma GOST 1050 (1988), de espesor 8 mm y dimensiones 203 x 287, estas últimas se cortan a la mitad, se biselan y se sueldan. Finalmente se cortan las probetas en dimensiones 203 x 32. Se calcularon los tiempos para la elaboración de la probeta a partir de los elementos relacionados en la tabla 3.15 y 3.16.

Tabla 3.15. Materiales empleados para la fabricación de las probetas.

Material empleado.	Cantidad.
Plancha Ac – 20.	4 kg.
Electrodo AWS E – 7018 Ø 3,2.	0,12 kg.
Oxígeno.	0,23 m <sup>3</sup>
Acetileno.	0,05 m <sup>3</sup>

Tabla 3.16. Operaciones para la fabricación de las probetas.

Operación	Tiempo en Hrs.
Trazado.	0,33
Oxicorte.	0,33
Biselado.	0,25
Pulido.	0,16
Soldadura.	0,1

El precio establecido para fabricar las probetas es de \$ 26,82, como se utilizaron 4 planchas para elaborar un total de 24 probetas el precio total es de \$ 107,28.

### 3.11.2. Costo de los ensayos de análisis químico

Tabla 3.17. Costo de los ensayos de análisis químico.

Ensayos	P/U (Mn)	Total (Mn)
44	12,36	543,84

### 3.11.3. Costo de los ensayos de radiografía

Tabla 3.18. Costo de los ensayos de radiografía.

Ensayos	P/U para 1m (Mn)	Total (Mn)
2m	46,46	92,92

### 3.11.4. Costo de los ensayos de tracción y doblado

Tabla 3.19. Costo de los ensayos de tracción y doblado.

Ensayos	P/U (Mn)	Total (Mn)
16	7,19	115,04

Teniendo en cuenta el gasto de energía eléctrica se puede concluir que el trabajo investigativo tuvo un costo total cerca de **\$ 900,00 (Mn)**.

### 3.11.5. Gasto de Energía consumida en la fabricación de un tramo

En la tabla 3.18 se relacionan las principales máquinas que consumen gran cantidad de corriente.

Tabla 3.17. Gasto de energía.

Máquinas	Tiempo de trabajo(h)	Potencia de la máquina(kW)	Energía consumida(kW/h)	Ec*0.06	Importe (cuc)
Torno	2,0	13,4	26,8	1,60	6,4
Taladradora	0,3	2,5	0,75	0,04	0,045
Horno	3,0	5,0	15,0	0,9	13,5
Total	5,3	20,9	42,55	2,55	59,03

### 3.11.6. Precio establecido para la fabricación total de un tramo

El valor total que cuesta fabricar uno de los tramos 3 y 4 del transportador Jacoby se puede apreciar en la tabla 3.18.

Tabla 3.18. Valor total de cada tramo.

Pieza de fabricación	P/u(Mn)
Tramo 3	15440,10
Tramo 4	15690,99

Cuando se requieren realizar operaciones de recambio de tramos averiados, el tiempo de parada de una línea es de 20 horas como promedio, en cada una se dejarán de procesar 800 toneladas de menas lateríticas que garantizarían la extracción de 11,2 toneladas de sínter de Ni+Co. Según los precios actuales del producto en el mercado, esto representa una pérdida de 280 896,00 CUC/transportador. Si se tiene en cuenta que las acciones de sustitución se producen con una periodicidad promedio de 50 días y al año ocurren alrededor de 7 intervenciones de este tipo, la empresa dejará de ingresar un total de 1 966 272,00 CUC/año.

### 3.12. Impacto ambiental

Al ocurrir la rotura en uno de los tramos del transportador, no solo se afecta la producción sino también se ve afectado el medio ambiente, produciendo agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros. Los tramos están compuestos por bridas soldadas a un tubo, al ocurrir una rotura dichas bridas son fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel Cdte. Gustavo Machin, pasando por fundición, maquinado y ensamble.

Las partículas de arena de moldeo por debajo de  $0,018 \mu\text{m}$  están en suspensión en el taller, introduciéndose en los pulmones de los trabajadores provocando enfermedades como la silicosis.

En el proceso de maquinado se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema.

Para que el ambiente de trabajo del taller sea el adecuado se debe mantener una buena higiene y reducir la generación de contaminantes al ambiente por lo que es necesario tener en cuenta unas series de medidas lo cual evitará al entorno laboral y a la atmósfera la emisión de estos contaminantes. Para esto se debe reducir la generación sustancias de desechos y el ruido producido por las máquinas que se están operando, los cuales pueden provocar efectos nocivos sobre la salud del trabajador.

### **3.13. Conclusiones del Capítulo III**

1. El transportador está trabajado bajo los regímenes de trabajo normales, o sea según los cálculos no existe ningún problema de la resistencia mecánica, por lo que las causas de la rotura están dadas por la diferencia de estructura que se forma al ocurrir grandes tensiones provocadas por la soldadura.
2. El material empleado para la fabricación de las bridas no es el más apropiado, ya que el acero de medio por ciento de carbono tiene soldabilidad limitada, además puede ocasionar estructuras desfavorables en el cordón de soldadura.
3. La estructura con  $\text{CO}_2$  crea una estructura de Widmanstaetten incompleta desfavorable en la unión soldada.
4. En las muestras tomadas de los tramos rotos se pudo observar que el bisel interior era deficiente, de tal forma que solo había un cordón de soldadura por el interior de la unión soldada.



### **Conclusiones generales**

1. El método de soldadura que garantiza mayor resistencia mecánica en la unión del tubo con la brida, de los tramos de acero al carbono para el transportador sinfín (Jacoby), de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, es la combinación de los procesos SMAW con SAW.
2. Las muestras de tramos fracturados analizadas evidencian una diferencia significativa del porcentaje de carbono de las bridas respecto con los tubos.
3. Los cálculos de resistencia mecánica demuestran que el transportador puede soportar las condiciones normales de trabajo a las que está sometido.
4. Los prototipos puestos en explotación arrojaron resultados positivos para el método de soldadura que emplea la combinación de los procesos SMAW- SAW, en la unión del tubo con la brida.



**Recomendaciones:**

1. Realizar la unión de los tubos con las bridas de los tramos de acero al carbono para el transportador sinfín (Jacoby), de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, empleando la combinación de los procesos soldadura SMAW y SAW.
2. Efectuar un adecuado control de la calidad de fabricación, de la unión del tubo-brida, con la metodología propuesta en este trabajo, enfatizando en la preparación de bordes; así como chequear el cordón de soldada con radiografía después de realizado el proceso.
3. Recomendar a la Empresa Mecánica del Níquel fabricar las bridas con un porcentaje de carbono similar al del tubo (25%).
4. Realizar ensayos de microdureza que permitan caracterizar las estructuras formadas en la unión de las bridas con el tubo del transportador sinfín.
5. Analizar las causas que originaron el bajo porcentaje de carbono obtenido en el cordón de soldadura de los tramos fracturados.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959 – 16 – 0188 - 3. Universidad de Matanzas. 2002.
2. ANSI/AWS D1.1-96 Structural Welding Code: Steel. The American Welding Society, 1996.
3. American Welding Society (AWS) “Welding Handbook”. 8va Edición. 1996.
4. Ashby, M. F. Engineering Materials 1. An Introduction to their Properties and Applications. Second Edition. Department of Engineering, University of Cambridge, UK. ISBN 0 7506 3081 7. p 131 – 140. 1996
5. Bailey, N. Weldability of Ferritic Steels. The Welding Institute, 1995.
6. Barreiro, A. J. Aceros especiales, 3ª. ed. Madrid, 1966.
7. Bengton, U. Design requeriments materials properties a basic for materials selection. American society for testing. USA: 230 - 250, 1991.
8. Burgos Solas, J. Tecnología de soldadura. Ed. Pueblo y Educación. 1987.
9. Bakker, F. J. Y Horestreydt A. J. W. Soldadura por arco, Madrid, 1968.
10. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 p. ISBN 0 – 471 - 32013 - 7.
11. Castellanos, R. Caracterización del mecanismo de rotura del tramo #5 del transportador de mineral de tornillo sinfín de la planta de Horno de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara. Trabajo de diploma. ISMMM. 2008
12. EL- Hebeary, R., Shennawy, M. y Abdel - Aziz, A., "Control del Riesgo dle Hidrógeno Inducido en grietas de la Soldadura del Acero, 2004 IIW. Congreso Internacional, 19 - 33, Cairo, Egipto 2004
13. García, P y Casto M. Metodología para la enseñanza práctica de soldadura por arco eléctrico. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983. 256 p.
14. Gedeon, S. A., Eagar, T. W. Análisis termodinámico de la absorción del hidrógeno en la soldadura. Revista de soldadura. Julio 264s - 271s. 1990.

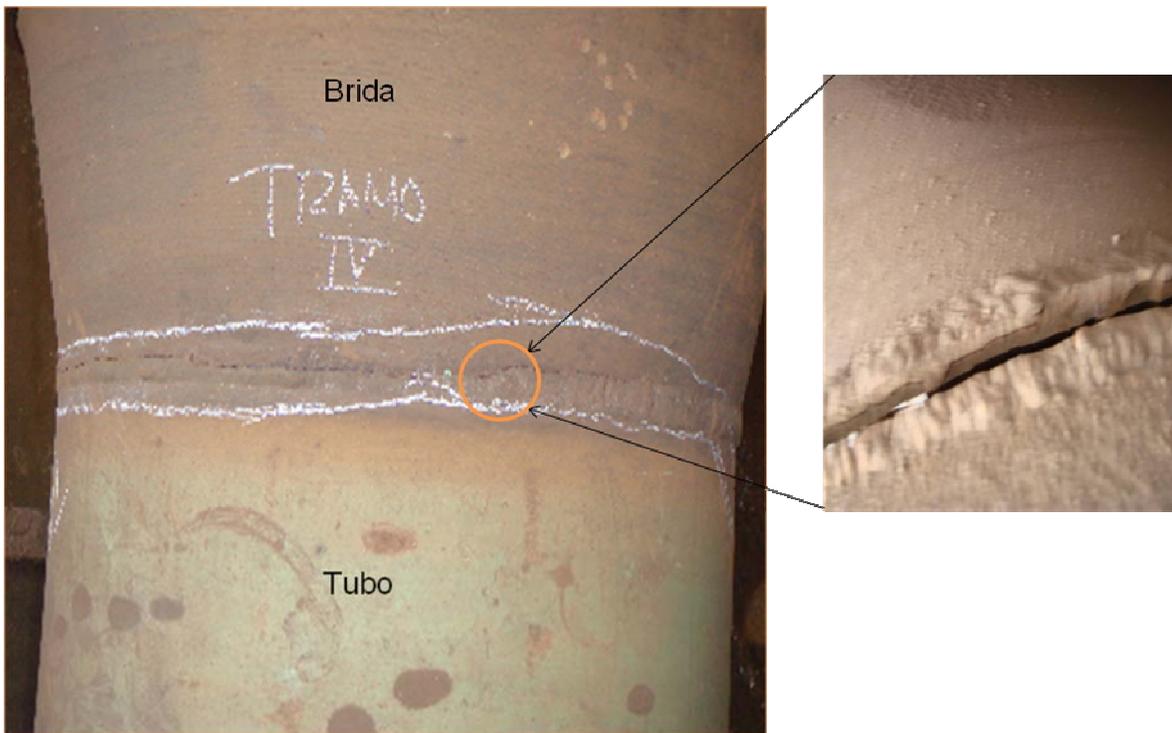
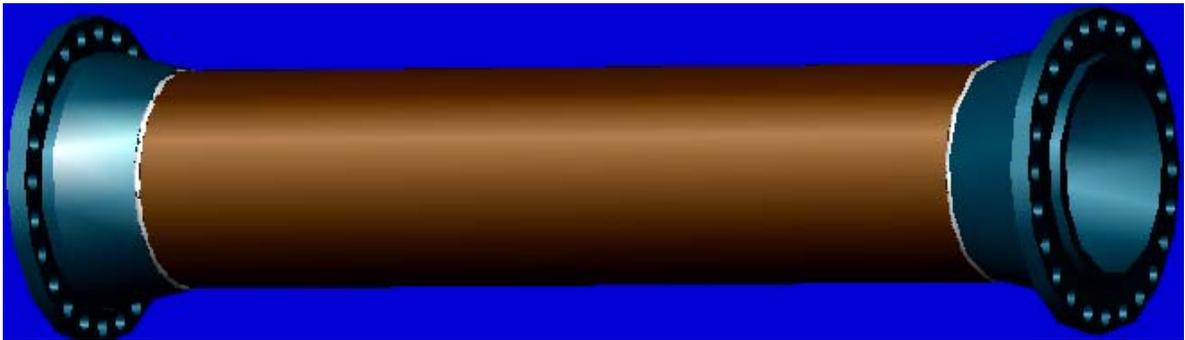


15. Giraldo, J. E. y Chaves, C. A. El agrietamiento Inducido por Hidrógeno en Soldadura de Acero, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, 2000.
16. González, Vázquez. Manual de Soldadura a Fuego. Plátano Editora. Lisboa. 1978. 198 pp.
17. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial MIR. 1983. p. 53 - 89.
18. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial MIR. 1983. p 17 – 22.
19. Guliar, A. P. Metalografía, Tomo 1 y 2. Editorial. MIR MOSCÚ. 1978
20. Glizmanenko, O. L. “Soldadura y corte de metales”. La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1975. 472 pp.
21. James M. R. y Buck O. Medidas no destructivas cuantitativas de Tensiones Residuales. CRC, Revisión crítica en ciencias de los materials en estado sólido. Vol. 9, Issue 1. 1980.
22. James M. R. in Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1-4. 1996
23. Kedzierzawski, P., "Hydrogen Trapping in Iron and Iron Alloys", Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, 1<sup>st</sup>. Ed., Noyes Publications, 271 - 288, New Jersey, USA. 1985.
24. Key To Steel. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
25. Lancaster, J. F. Metalurgia de la soldadura. Sixth Ed., 256-268, Woodhead Publishing, Abington Cambridge, England. 1999
26. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1ed.Editorial Mir Moscú. 1973. P 359 – 360.
27. Lamber A. y Herrero E. Libro de registro de datas y averías. Planta de Hornos de Reducción: Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara. Moa, Cuba. 2000-2006
28. Macherauch E. y Kloos K. H. Conferencia en ciencia y tecnología de tensiones residuales. Vol. 1, Garmisch-Partenkirchen, DGM-Verlag, Oberursel, pp. 3 - 26. 1986
29. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.

30. Maroef, I.; Olson; D. L., Eberhart; M., y Edwards; G. R. Hidrógeno atrapado en la soldadura de un acero ferrítico. *Revisión Internacional de materiales*. 47(4), 191-223. 2002. Mathar J. *Transacciones ASME*, 56, (4), pp. 249 - 254. 1934.
31. Masubuchi K. *Análisis de estructuras soldadas*. Pergamon Press, Elmsford, N. Y. 1980.
32. Meriño, G. *Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos*. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977
33. Meyer, H. J. *Grietas Laminares en Construcciones Soldadas*. II Conf. On Significance of Defect in Welds, Welding Inst. London. 1968.
34. Mikliaev, P. G. *Anisotropía en las propiedades mecánicas de los metales*. Ediciones Metalurgia. Moscú. 1986.
35. Nangel, D. *Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor*. *Metal Const.* Nro 2, Vol. 64. 1969.
36. Nicholls D. M. *Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente*. *Brit. Welding Journal*. Nro 3, Vol. 15. 1968.
37. Oriani, R. A. *La física y la metalurgia Aspectos del Hidrógeno en el metal*. ICCF4, Fourth International Conference on Cold Fusion", Lahaima Maui, Electrical Power Research Institute 3412, Hillview Av., Palo Alto CA 94304, USA. 1993.
38. Oystein Grong, *Modelación Metalúrgica de la soldadura*. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
39. Pérez, P. Y. *Tesis en opinión al título de ingeniero mecánico*, 2007
40. Pero - Sanz, J. A. *“Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades”*, Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
41. Pero - Sanz, J. A. *“Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades”*, Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. p 393 - 502. España.
42. Pekka Nevasmaa. *Predictive Model for the Prevention of Weld Metal Hydrogen Cracking in High Strength Multipass Welds*. Doctorate thesis, University of Oulu, Faculty of Technology. 2003.
43. Pitrun, M. *The Effect of Welding Parameters on Levels of Diffusible Hydrogen in Weld Metal Deposited Using Gas Shielding Rutile Flux Cored Wires*, doctorate thesis, The University of Wollongong, Dpt. of Materials Engineering. 2004.

44. Ramírez, G. E. introducción a la técnica de ensayo no destructivos, Ed. Instituto Nacional de técnicas aeroespaciales, Madrid, 1980
45. Rodríguez, H. Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1983. 613 pp.
46. Rodríguez, I. R, Fernández, T. C, Llaca, I. M. Comportamiento de la resistencia mecánica en tubos, de materiales dúctiles, con agujero, empleando técnicas MEF. IV C. C. I. M. Habana. Cuba. 2006.
47. Rodríguez, I. R, Fernández, T. C, Guardado, R, L, Ngendanzi, V. Modelación por Elementos Finitos de la ruptura del tubo en el transportador de mineral laterítico reducido. Revista Geología Minería, Instituto Superior Minero Metalurgico Moa (ISMMM), Volumen XXIII, 2007. No. 4. Cuba. ISSN1993 - 8012. 2007.
48. Seferian, D. Metalurgia de la soldadura. Ed. Revolucionaria. 1966. 397 pp.
49. Schajer G. S. Hole-Drilling Residual Stress Calculation Program (H-DRILL), V. 2.2. 2001
50. Stout, R. D. and Doty, W. D. Weldability of Steels. Welding Research Council, 1971.
51. Taylor, L. G. Aspectos Metalúrgicos de las propiedades mecánicas de metales soldados. Weld and Metal const. Nro 5. 1975
52. Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
53. Watanabe, M. Grietas laminares. Welding in Shipbuilding. Welding Inst. London. 1962.
54. Weld Cracking, Lincoln Electric Co. 2001.
55. Wilson, W. G. Minimicion de las grietas laminares mediante la elevación de la ductilidad en la dirección Z. Welding. Journal. Nro 11. 1974
56. Wormigton, H. Grietas laminares en Planchas de Acero calmados con Silicio. Weld and Metal Const. Nro 9, Vol. 35. 1967.
57. Zinn W. y Scholtes B. In Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel, Edited by G. Totten, M. Howes and T. Inoue, ASM International, pp. 391 - 396. 2002
58. Zuñiga, R. Tecnología de la soldadura eléctrica por fusión. Edit Pueblo y Educación. 350 pp. 1987.

## A nexo1





## ANEXO 3

Resultados de los ensayos de tracción para los proceso SAW - SMAW y CO<sub>2</sub>.

Ensayos	Carga Máxima. kgf.	Electrodo
Proceso de soldadura SAW y SMAW		
1	5 200	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
2	5 570	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
3	6 200	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
4	5 200	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
Proceso de soldadura CO <sub>2</sub>		
1	4 000	ER-70S-6
2	3 000	ER-70S-6
3	3 500	ER-70S-6
4	3 500	ER-70S-6

Ensayos	Tensión (Kgf/mm <sup>2</sup> ).	Electrodo
Proceso de soldadura SAW y SMAW		
1	20,31	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
2	21,75	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
3	24,21	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
4	20,31	EL-12/ $\phi$ 3,2mm y E-7018
Proceso de soldadura CO <sub>2</sub>		
1	15,62	ER-70S-6
2	11,71	ER-70S-6
3	13,67	ER-70S-6
4	13,67	ER-70S-6



## **ANEXO 4**