

**República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica**

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Análisis de las causas que provocan las roturas en las bridas del transportador de mineral laterítico Jacoby.

Diplomante: Rolando Cedeño Matos.

**Tutores: Dr.C. Félix Ariel Morales Rodríguez.
MSc. Marjoris Utria Jiménez**

Moa -2012

“Año 54 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD:

Yo: Rolando Cedeño Matos.

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: Rolando Cedeño Matos.

Tutor: Dr.C. Félix Ariel Morales Rodríguez.

Tutor: MsC. Marjoris Utria Jiménez.

Dedicatoria:

Dedico este trabajo de diploma de forma muy especial a mis abuelos:

Juan Liranza Batista y Rosa Neida Quiala Peña.

A mis padres: Orlando Cedeño Quiala y Esperanza Matos Justi.

A mis hermanos, en especial a Eídle Cedeño Nápoles.

A toda mi familia en general.

A mis amigos y compañeros de aula.

A la Revolución, por las posibilidades que me ofrece.

Agradecimientos:

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera, en especial al profesor Tomás Fernández Columbié.

A mis tutores por confiar en mí para la realización de este trabajo, el Drc. Félix Ariel Morales Rodríguez y MSc. Marjoris Utria Jiménez.

A mi familia que me apoyaron en los momentos en que más lo necesite.

A todos mis amigos y compañeros de aula, en especial ha Amado Arisnel Cabeza Mendoza.

A la Revolución por darme la oportunidad de convertirme en profesional.

Resumen

En el presente trabajo de diploma se llevan a la práctica los conocimientos y teorías científicas estudiadas. El objetivo principal del trabajo consiste en dar solución al problema planteado el cual es; desconocimiento de las causas que provocan las roturas en la brida del transportador de mineral laterítico del tipo Jacoby, de la Empresa Comandante Ernesto Guevara. Para su solución se procedió a trazar los objetivos específicos, mediante un establecimiento de las causas que originan los defectos en la unión soldada. Al cual se le dio solución a partir del análisis de la composición química de la aleación utilizada en la fabricación de la brida y de la microestructura del material analizado, donde se observó que según los métodos de soldadura SAW – SMAW y CO₂ empleados para garantizar la unión brida – tubo, al realizar la misma con CO₂, esta da origen a una estructura incompleta de ferrita y perlita similar a la estructura de Widmanstaetten. Por lo que finalmente a partir de la observación e interpretación de la microestructura y de los métodos de ensayos seleccionados Rockell y Vickers se pudieron establecer las principales causas que ocasionan la rotura de la pieza las cuales son:

- 1- Fusión incompleta al emplear los métodos de soldadura debido a una incorrecta preparación de los bordes para realizar la unión brida – tubo.
- 2- Presencia de poros y micro – grietas originadas al efectuar la soldadura con CO₂.

Abstract

Knowledge and scientific theories studied are put into practice in this paper. The main objective is to give solution to the problem: ignorance of the causes of breaks in the flange of lateritic ore conveyor of Jacoby type, in Commander Ernesto Guevara Company. For its solution it was proceeded to outline the specific objectives, by establishing the causes of defects in the welded joint. It was given solution from the analysis of the chemical composition of the alloy used in the manufacture of the flange and the microstructure of the material analyzed, where it was observed that SAW – SMAW y CO₂ welding methods used to ensure the union flange – tube, at the time of performing it with CO₂, this gives rise to an incomplete structure of ferrite and pearlite that is similar to the structure of Widmanstaetten. Finally, to start from the interpretation and the observation of the microstructure and Vickers and Rockell selected test methods it could establish the main causes that provoke failure of the piece which are:

1. Incomplete fusion when using welding methods due to incorrect edge preparation for attachment flange – tube.
2. Presence of pores and micro – cracks caused by the welding with CO₂

Índice

Contenido	Pág.
Introducción	1
CAPÍTULO 1. MARCO TÉORICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1 Introducción.	5
1.2 Descripción de la instalación	5
1.3 Estado del arte	6
1.4 Disponibilidad de los transportadores de tornillo sinfín	8
1.4.1 Caracterización de los transportadores de mineral del tipo Jacoby	8
1.4.2 Principio de funcionamiento	9
1.5 Materiales generales para la soldadura	9
1.6 Clasificación de los aceros al carbono	11
1.6.1 Clasificación de los aceros al carbono y sus aplicaciones	11
1.6.2 Materiales empleados en la fabricación de las bridas	13
1.7 Proceso de soldadura	13
1.7.1 Tipos de uniones soldadas	13
1.8 Soldadura manual por arco eléctrico (SMAW)	14
1.8.1 Soldadura en atmósfera de gases bajo protección gaseosa, Método (MAG)	16
1.8.2 Soldadura en atmósfera de gases inertes método (MIG)	17
1.8.3 Soldadura en atmósfera de gases inertes con electrodo de tungsteno, Método (TIG).	18
1.9 Transformaciones físico-químicas y estructurales que ocurren en la soldadura	18
1.9.1 Modificaciones estructurales de la zona fundida (Z.F)	19
1.9.2 Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)	19
1.10 Definición de ensayo y clasificación	23
1.10.1 Tipos de ensayos	24
1.11 Conclusiones del Capítulo	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1 Introducción	26
2.2 Materiales e instrumentos	26
2.2.1 Materiales Específicos	26
2.2.2 Caracterización de material empleado en la fabricación de la brida	27
2.3 Preparación de las muestras a analizar	27
2.3.1 Desbaste y pulido de las muestras a investigar	28
2.3.2 Limpieza y lavado de las superficies a investigar	28
2.3.3 Ataque químico	28

2.4 Análisis químico	29
2.5 Propiedades físicas – mecánicas del acero AISI 1025	29
2.6 Métodos de soldadura empleados en la unión brida – tubo	30
2.6.1 Propiedades mecánicas de los electrodos a utilizar	30
2.7 Métodos de ensayos y Característica de los equipos empleados	31
2.7.1 Ensayo de dureza	36
2.7.2 Ensayo de microdureza	37
2.8 Microscopio óptico	38
2.8.1 Análisis microestructural por el método de examen microscópico	38
2.9 Análisis de la tecnología de fabricación	39
2.10 Cálculo del cateto de soldadura	40
2.11 Cálculo del carbono equivalente	40
2.12 Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura	41
2.13 Cálculo de resistencia mecánica	42
2.14 Métodos de elementos finitos (M.E.F)	43
2.14.1 Etapas del método de elementos finitos (M.E.F)	43
2.14.2 Pasos a seguir para la modelación por el (MEF)	44
2.15 Conclusiones del Capítulo	44
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS	45
3.1 Introducción	45
3.2 Análisis químico	45
3.3 Prueba de ensayos de dureza y de resistencia en la unión soldada	49
3.4 Resultados del análisis Microestructural	49
3.5 Resultados del análisis de la tecnología de fabricación	55
3.5.1 Cálculo del cateto de soldadura	55
3.6 Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura	56
3.7 Cálculo de resistencia mecánica	56
3.8 Análisis de las roturas en las bridas	57
3.8.1 Valores obtenidos mediante la simulación por el MEF	58
3.9 Material para la fabricación de las bridas	60
3.10 Valoración económica	60
3.10.1 Costo de los ensayos de análisis químico	60
3.10.2 Costo de los ensayos de radiografía	61
3.10.3 Costos de maquinado	61

3.10.4 Gasto de Energía consumida en la fabricación de la brida	61
3.10.5 Costo de Fundición	62
3.10.6 Precio establecido para la fabricación total de una brida	66
3.11 Impacto Ambiental	66
3.12 Conclusiones del Capítulo	68
Conclusiones Generales	69
Recomendaciones.	70
Bibliografía.	71
Anexos	

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial alcanzado hoy en día a nivel mundial ha permitido grandes logros tanto en el ámbito social como en lo económico. Nuestro país no queda exento de esto ya que durante todos estos años de revolución hemos sido capaces de obtener grandes logros científicos técnicos en las diferentes esferas industriales. El trabajo de diploma está orientado a dar solución a las causas que provocan la salida de servicio de uno de los equipos que garantiza el traslado de mineral laterítico hacia los enfriadores para su posterior procesamiento en una de las Empresas más importantes del país. La cual lleva como nombre Comandante Ernesto Guevara, esta entidad está ubicada en el municipio de Moa, perteneciente a la Provincia de Holguín. La misma 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 una 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 muy importante la planta de hornos de reducción, donde encontramos varios transportadores de tornillo sinfín Jacoby, encargados de transportar el mineral hasta los enfriadores.

En el trabajo se hace referencia a una de las partes componentes de una máquina de gran utilidad debido al amplio empleo de la misma como es el transportador de mineral laterítico Jacoby. El principio de acción del transportador de tornillo sinfín consiste en la transportación del material por un tubo. Los transportadores de tornillo sinfín o de espiral tienen un uso muy amplio en la transportación de materiales pulverulentos, calientes y de aquellos 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° C. Estos transportadores están conformados por diez tramos acoplados, con una longitud total de 30 867 mm, el diámetro interior del tubo es de 533 mm y el diámetro exterior del sinfín 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 30 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 los canales de contacto de la planta de lixiviación y lavado. También constan de otro elemento conocido como brida o platillo, las cuales se unen a través de cordones de soldadura. Estas piezas poseen forma de bocina, las mismas se fabrican de aceros al carbono de bajo y medio contenido de carbono. En ocasiones ocurren roturas en las mismas y estas son enviadas a la Empresa mecánica del níquel, Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche la cual se encarga de fabricar las bridas mediante el proceso de fundición así como el ensamble de estas. Por lo que se tiene como propósito establecer un análisis de la tecnología de fabricación de la brida o platillo del transportador Jacoby con el objetivo de incorporarla a su vida de servicio. Puesto que es de gran interés para la economía de la empresa lograr que los medios de producción consten de las mejores condiciones posibles y de esta forma garantizar que no ocurran pérdidas económicas al país. Además se debe tener en cuenta que cada avería trae como consecuencia grandes daños al medio ambiente debido a las fugas de mineral y gases tóxicos. Ante lo anteriormente expuesto podemos proceder a plantear la situación problemática del trabajo.

Situación problemática

La brida o platillo perteneciente al transportador de mineral laterítico Jacoby, presenta problemas de roturas en la unión soldada; lo que provoca la salida de servicio del transportador. A causa de defectos que se han introducido en la pieza durante el proceso de fabricación, los cuales pueden ser ocasionados por una Inadecuada selección del material de aporte o temperaturas de precalentamientos inadecuadas, las cuales originan falta de homogeneidad en la zona soldada, ocasionando la rotura del material; todo esto trae consigo un paro en el proceso productivo de la empresa. Por lo que se necesita realizar un análisis de las causas que provocan las roturas en las bridas del transportador Jacoby.

Problema a investigar

Se desconocen las causas que provocan las roturas en la brida del transportador Jacoby en la unión soldada.

Objeto de estudio

Transportador de mineral laterítico Jacoby.

Campo de acción donde se desarrolla la investigación

Roturas en las bridas o platillos del transportador Jacoby de la Empresa Comandante Ernesto Guevara.

Hipótesis

Realizando un análisis de las causas que provocan las roturas en la zona soldada de la brida del transportador Jacoby, es posible conocer las discontinuidades que están presentes en la unión, luego, si se desarrolla un análisis del proceso de fabricación por fundición y de la tecnología en la unión brida – tubo por soldadura, se podrá garantizar la eliminación de los defectos que originan la rotura.

Objetivo del trabajo

Determinar las causas que provocan las roturas de las bridas del transportador Jacoby en el cordón de soldadura.

Objetivos específicos

1. Establecer las causas de las roturas de las bridas del transportador Jacoby.
2. Realizar una adecuada selección de la aleación que permita que se eliminen las causas que provocan las roturas de las bridas del transportador Jacoby.
3. Analizar la tecnología de fabricación con el propósito de que se excluyan los defectos en las bridas del transportador Jacoby.

Tareas del trabajo

- Establecimiento del estado del arte, sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Realización de análisis de microestructura, de microdureza y espectral.
- Análisis de los resultados a obtener y proponer la solución más factible.
- Valoración técnico-económica e impacto ambiental.

Los **métodos Investigativo** empleados para dar cumplimiento a la realización del trabajo son:

Los métodos teóricos permitieron estudiar las tendencias actuales relacionadas con los diferentes procesos de soldadura que se realizan por arco eléctrico, los cuales a su

vez, según la temperatura del ciclo térmico pueden provocar tensiones y distorsiones en los cordones de soldadura, todos ellos en unión, facilitaron la construcción de los modelos e hipótesis de la investigación, crearon las condiciones para tener en cuenta las características fenomenológicas y superficiales, contribuir al desarrollo de las teorías científicas.

Dentro de los métodos teóricos los más empleados fueron:

- **Análisis y síntesis:** división y unión abstracta de las variables empleadas en el trabajo, el comportamiento microestructural de la zona fundida y de la zona de influencia térmica así como de las tensiones residuales obtenidas del proceso de soldadura, en sus relaciones y componentes para facilitar su estudio.
- **Inducción y deducción:** la inducción permitió arribar a proposiciones generales a partir de hechos aislados y la deducción posibilitó, a partir del estudio de conocimientos generales de los métodos de cálculo del proceso de soldadura, inferir particularidades para un razonamiento lógico.
- **Los métodos históricos:** posibilitaron el estudio detallado de los antecedentes, causas y condiciones históricas en que surgió el problema.
- **Los métodos lógicos:** se basaron en el estudio histórico del fenómeno de la resistencia de materiales, de los regímenes de soldadura y de la simulación, en objetos de la ingeniería mecánica y metalúrgica.
- **La modelación:** se crearon abstracciones para representar la realidad compleja del fenómeno metalográfico, del proceso de soldadura.

Los métodos empíricos: explican las características observables y presuponen determinadas operaciones prácticas, tanto con los objetivos, como con los medios materiales del conocimiento utilizado. Estos métodos se expresan a través de las técnicas de la observación, documentación, la comunicación personal e impersonal y la experimentación.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

En nuestro país se realizan grandes esfuerzos para disminuir los costos de fabricación de piezas, con el fin de garantizar un desarrollo sostenible en nuestra economía. La Empresa del Níquel Comandante Ernesto Guevara es la encargada de la producción de níquel y cobalto. Esta entidad consta de un total de catorce plantas dentro de las cuales se encuentra la planta de hornos de reducción, donde se encuentran ubicados los transportadores de tornillo sin fin, encargados de transportar el mineral hacia los enfriadores; el cual en ocasiones presenta problemas de roturas en las bridas que lo constituyen lo que imposibilita la producción de la empresa.

Las bridas pertenecientes a los transportadores de tornillo sin, nombrados Jacoby, cumplen la función de garantizar una correcta unión en los tramos del transportador con el fin de inhibir la fuga de mineral y gases tóxicos; la unión se realiza a través de cordones de soldadura. Estas piezas poseen forma de bocina, las cuales se fabrican de aceros al carbono de bajo contenido de carbono. Esta aleación posee buenas propiedades físico – mecánicas lo que permite obtener piezas que puedan trabajar en disímiles condiciones de explotación. Sin embargo durante el proceso de obtención de dicho elemento por fundición y de la tecnología por soldadura se introducen defectos o discontinuidades inherentes que atentan con la homogeneidad en las características físicas o mecánicas del material.

En el presente capítulo se establece como objetivo

Realizar un análisis de las bibliografías existentes que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2 Descripción de la instalación

En la instalación el mineral pasa por diferentes procesos en diferentes plantas. Una vez que el mineral se encuentra en la planta de Hornos de Reducción, el mismo sale con una temperatura de unos 650 a 700°C y es transportado desde los hornos hasta los enfriadores a través de los transportadores de tornillos sin fin, nombrados (Jacoby).

Cada tramo del transportador está formado por un tubo unido a una bocina conocida como platillo o Bridas a través de cordones de soldadura luego es acoplado al otro tramo a través de bridas cogidas con tornillos, y por su interior el tornillo sin fin. En el taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel se fabrican piezas de diferentes formas y complejidades, entre ellas las Bridas del Jacoby, fabricadas de Acero de bajo por ciento de carbono (25%).

1.3 Estado del arte

Rodríguez et al. (2006) realizaron ensayos de dureza, análisis químico y diseñaron probetas metalográficas para identificar las características microestructurales del material de los cilindros. 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.

Rodríguez (2011) posibilitó establecer a través del estudio fractográfico la forma de propagarse las grietas que producen la posterior fractura, evidenciándose un comportamiento elasto-plástico en el frente de las grietas. A través del empleo de la simulación con el método de los elementos finitos (MEF), se establecieron las características tenso-deformacionales a temperaturas entre 650 y 700 °C y condiciones de cargas similares a las de trabajo. Los ensayos a escala de laboratorio y la aplicación a escala industrial posibilitaron predecir los tamaños críticos de grieta, en las direcciones predominantes, para garantizar condiciones seguras de operación sin que se produjera la rotura catastrófica de los tramos según las condiciones analizadas.

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. Changan et al. (1999).

Lambert y Herrero (2002) que abordan la temática relacionada con 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, evalúan 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, sino también a los hornos, por lo que las propuestas de solución abarcan a ambos equipos.

Lambert y Herrero (2004) y Rodríguez et al.(2007), realizaron un reporte de avería del tramo número cinco 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.

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

Rodríguez (2008), en su tesis de maestría presenta el tema relacionado con la solidificación de piezas fundidas de aceros al carbono del tipo 55 r. Pero no trata la solidificación en aceros de bajo contenido de carbono, siendo este tipo de acero el más utilizado en la industria para la fabricación de piezas y elementos para estructuras.

Utria (2012), trabaja el tema relacionado con la soldadura en la unión brida – tubo, tubo – brida en los transportadores del tipo Jacoby en su tesis de maestría; empleando como material acero al carbono AISI 1020, pero no investiga las causas que originan las roturas en la unión de estos tramos en las bridas fundidas de aceros de bajo contenido de carbono. Por lo que actualmente no existe una propuesta de solución a este problema.

En este trabajo nos proponemos dar solución al problema planteado, a través de un análisis de las causas que originan las roturas en la zona soldada de la unión brida – tubo del transportador de tornillo sinfín. Mediante el estudio de los procesos tecnológicos que se emplean en la fabricación de la pieza; específicamente lo que se relacionan con fundición y fabricación de la unión de la pieza empleando diferentes métodos de soldadura. Para poder establecer las causas que dan origen a la rotura de la unión.

1.4 Disponibilidad de los transportadores de tornillo sinfín

Los transportadores de tornillo sin fin frecuentemente se afectan por la zona soldada según el manual de operaciones de la planta, en el cual se registran todas las roturas que el mismo ha presentado en los últimos años; por ejemplo en el 2008 y 2009 ocurrieron averías en la zona soldada de los tramos tres y cuatro respectivamente, mientras que en el 2011 ocurrieron en el tramo dos. Generalmente la falla se presenta siempre en la zona soldada, en los últimos meses no ha sucedido ningún problema por concepto de roturas en la unión brida – tubo. Por lo que el transportador está funcionando en óptimas condiciones, sin embargo durante las visitas realizadas a la Empresa se pudo observar que el sistema de enfriamiento de dicho equipo no cuenta de las mejores condiciones; por lo que se debe reparar ya que esta puede ser una de las causas de roturas.

1.4.1 Caracterización de los transportadores de mineral del tipo Jacoby.

Los transportadores Jacoby constan de diez tramos, los tramos cinco y nueve se fabrican de acero inoxidable y los demás de acero al carbono. 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 cogidas 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 referente a las causas que provocan las roturas en las bridas o platillos pertenecientes a estos transportadores, por ser las 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.

1.4.2 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de los transportadores de tornillo sin fin se basa en un reductor acoplado a un motor que transmite una potencia de 30 kW, el cual hace girar el transportador a 27,7 revoluciones por minutos; apoyados en rodillos rotatorios. El material es trasladado por un tornillo sin fin por el interior de los conductos hacia los enfriadores de mineral.

1.5 Materiales generales para la soldadura

Según (Lajtin, 1973; Guliaev, 1983; Pero-Sanz, 200), los aceros al carbono representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería, son aleaciones Fe - C donde el contenido de carbono 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.

Plantea Callister (1999) que 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.

Dentro de este tipo de aceros se encuentran los denominados endurecibles por temple para los cuales el contenido en carbono debe ser al menos de un 0,25%, aceros con un contenido de carbono aproximado a un 0,4 – 0,5 %, son usados ampliamente para la construcción de estructuras y diversas partes de maquinaria, como pernos, tornillos, ejes, engranajes (Bengtson, 1991), debido a su alta resistencia mecánica, a su resistencia al desgaste a su elevada dureza y a sus favorables condiciones económicas como son su bajo coste y la garantía de abastecimiento (Várela, 2003).

Afirman Glizmanenko (1965); Burgos (1987); American Welding Society (1996); Rodríguez (1983), que para la unión de este tipo de aceros se han empleado tradicionalmente los procesos convencionales de soldadura por fusión; estos tipos de soldadura presentan diversos tipos de problemas característicos del proceso:

- a) Gran cantidad de calor generado por el arco.
- b) Necesidad de empleo de fundentes.
- c) Uso de electrodos de materiales reactivos.
- d) Incompatibilidad (en ocasiones) de las propiedades mecánicas del metal de aporte y el metal base.

Por otro lado Seferian (1966), considera que estos problemas conducen a la aparición de diferentes tipos de defectos tales como:

- a) Elevadas distorsiones de los elementos soldados.
- b) Inclusión de escorias en la unión soldada.
- c) Excesivas salpicaduras durante el proceso.
- d) Excesiva porosidad.

Todo lo anterior conlleva a unas pobres propiedades mecánicas de la unión soldada. Para evitar estos problemas se han adoptado una serie de prácticas como los tratamientos térmicos presoldadura 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 anteriormente, pero incrementan muy considerablemente la

complejidad técnica y el coste de las operaciones de soldadura. 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).

1.6 Clasificación de los aceros al carbono

Los aceros al carbono se pueden clasificar, teniendo en cuenta diferentes aspectos como son: Composición química, tipo de estructura y aplicación o utilización en procesos industriales; según: Tecnología de los metales I parte 2, colectivo de autores, Ordóñez 2006, p 204.

De acuerdo a su composición química, los aceros al carbono se pueden clasificar en: Aceros de alto contenido de carbono, de medio y de bajo contenido de carbono.

De acuerdo con su estructura, los aceros al carbono pueden ser:

- Ferríticos
- Ferríticos perlíticos (hipoeutéticos)

Teniendo en cuenta la utilización los aceros al carbono pueden ser:

Aceros de construcción

- Comunes(Grupo A y Grupo B)
- De alta calidad

Aceros para herramientas

1.6.1 Clasificación de los aceros al carbono y sus aplicaciones

Los aceros al carbono se emplean en la fabricación de elementos de máquinas, construcciones y estructuras. Dentro de estos aceros al carbono están los de calidad normal o comunes, que se utilizan sin tratamiento térmico y los de alta calidad o

comerciales, que se usan con tratamiento térmico para piezas de mayor responsabilidad o complejidad.

Aceros comunes o de calidad normal: Estos tipos de aceros son los menos costosos. Presentan un contenido de azufre y fósforo, mayor que los de alta calidad. Por ejemplo, para los obtenidos en los hornos Martín el azufre es de hasta 0.05 % y de fósforo hasta 0.045 %, siendo para los hornos Bessemer de 0.060 % y 0.080 % de azufre y fósforo respectivamente. Estos aceros presentan también gran cantidad de inclusiones. Las piezas que se fabrican con estos aceros son de menor responsabilidad, se obtienen productos laminados en caliente, como perfiles, barras, vigas y también tubos, chapas y piezas forjadas sometidas a pequeños esfuerzos.

Aceros de construcción de alta calidad: También llamados nobles o comerciales, se designan, indicando su composición química y propiedades establecidas después del normalizado. Para estos aceros hay mayores exigencias en cuanto al límite de impurezas e inclusiones. El azufre y fósforo solo pueden aparecer hasta un 0.04 %. Los aceros al carbono de alta calidad se marcan con las cifras 08,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70. Los aceros de menor contenido de carbono, 08, 10, 15, 20,25 se usan en la fabricación de piezas sometidas a bajos esfuerzos, para estampado, soldadura entre otras aplicaciones.

Existen también los **aceros calmados**, que se desoxidan totalmente y que contienen muy poco óxido ferroso, no presentan poros sino la formación de una cavidad (rechupe) en la parte superior del lingote. **Los aceros semicalmados**, son de tipo intermedio.

Aceros para herramientas: Los aceros al carbono para herramientas poseen una alta resistencia, dureza y resistencia al desgaste. Se emplean para fabricar instrumentos de corte, estampa, y de mediciones, variando su contenido de carbono desde 0.7 a 1.5 %. Cuando se trate de herramientas que deben someterse a golpes, las que deben ser tenaces, se usarán los tipos 7A, 8A; Como ejemplo pueden citarse los cinceles, estampas, martillos, herramientas para trabajar la madera y otras. Los del tipo 9A,...13A, se emplean en aquellas herramientas que requieran alta resistencia al desgaste, dureza y puedan soportar golpes fuertes, como brocas, machos de roscar, terrajas, fresas, calibres y otras.

1.6.2 Materiales empleados en la fabricación de las bridas

Las aleaciones más utilizadas en la fabricación de las bridas pertenecientes los transportadores del tipo Jacoby, son los aceros al carbono dentro de estos: Los de bajo y medio contenido de carbono.

Los aceros de bajo contenido de carbono presentan buena aceptación ante diferentes proceso tecnológicos tales como: Fundición, Forjado y soldadura. Mientras que los de medio contenido de carbono presentan el inconveniente de presentar un retardo durante los procesos de fundición y su soldabilidad puede ser limitada si su contenido en carbono se incrementa. Debido al surgimiento de tensiones internas que experimenta esta aleación en estos procesos

1.7 Proceso de soldadura

Se conoce por soldadura el método mediante el cual se realiza la unión de dos o más metales, Es el proceso tecnológico, mediante el cual se obtienen uniones inseparables, caracterizadas por el enlace atómico e intermolecular. Según Tecnología de los Metales I. Parte 2. Colectivo de Autores, Ordóñez 2006.

1.7.1 Tipos de uniones soldadas

De acuerdo con la disposición relativa de las partes a unir, se distinguen cinco tipos de uniones

- A doblez
- Unión a tope
- En ángulo
- Unión en te
- A solape

Según la forma en que están dispuestas las uniones con respecto al esfuerzo de trabajo, se dividen en:

- Frontales
- Laterales
- Angulares
- Combinados

Atendiendo a la situación espacial de la unión al realizar la soldadura se tienen las posiciones siguientes

- Plana
- Horizontal
- Horizontal en ángulo
- Vertical
- Vertical en ángulo
- Sobrecabeza o de techo

1.8 Soldadura manual por arco eléctrico (SMAW)

La clasificación del proceso lo especifica 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 está 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 entre hierro 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.

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

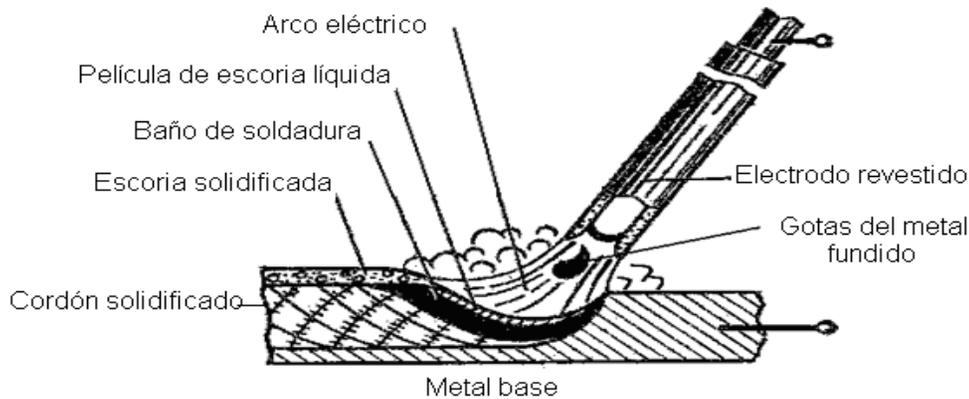


Figura 1.1. Esquema del proceso de soldeo SMAW

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 forma 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 uniones soldadas (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 cadencia dependiente de la temperatura local y el grado de rigidez del elemento estructural son decisivos.

1.8.1 Soldadura en atmósfera de gases bajo protección gaseosa, Método (MAG)

Principio: Es un procedimiento en el cual el calor para soldar es producido por un arco eléctrico, que se forma entre un alambre electrodo fusible o un electrodo infusible y el metal base. El electrodo, el baño de soldadura, el arco y las áreas adyacentes en el metal base, son protegidos de la contaminación atmosférica por un gas (o mezcla de gases), que se suministra a través de la antorcha o pistola eléctrica. El gas protector debe garantizar una protección total, porque cualquier pequeña cantidad de aire puede

contaminar el depósito de soldadura, fundamentalmente cuando se suelda aluminio y otros metales extremadamente sensibles a la oxidación.

La soldadura bajo protección gaseosa de CO₂ se ha difundido ampliamente en las industrias. La corriente de soldadura, alimentada por un generador o rectificador, pasa a través de la boquilla de contacto y por tanto a través del alambre – electrodo, para producir un arco entre el metal base y el electrodo.

Aplicación: Se emplea para soldar aceros de bajo contenido de carbono; A su vez, se puede emplear también en la soldadura de los aceros de medio contenido de carbono y de los aceros austeníticos inoxidables.

Ventajas del método (MAG)

- Permite el empleo de intensidades de corriente elevada, muy superiores a los empleados en la soldadura manual por arco eléctrico.
- Derivado de lo anterior, se logran altas velocidades de deposición.
- Se evitan pérdidas de tiempo por concepto de cambio de electrodo.
- Se economiza metal de aporte, al no existir sobrantes como en la soldadura manual.
- Ausencia de escoria, lo cual se traduce en ahorro de tiempo.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Se logra buena penetración, lo que proporciona economía en metal de aporte y en tiempo de preparación de bordes.

1.8.2 Soldadura en atmósfera de gases inertes método (MIG)

Es un proceso similar al método MAG, se diferencia esencialmente, en que el gas utilizado como protector es inerte.

Ventajas del método (MIG)

Las mismas señaladas para el método MAG además de que se pueden soldar metales y aleaciones para los que no se puede usar CO₂, por ser activo.

Aplicaciones: Para soldar aceros aleados en una extensa gama. Se sueldan exitosamente; el aluminio, el cobre, el titanio, entre otros.

1.8.3 soldadura en atmósfera de gases inertes con electrodo de tungsteno, Método (TIG).

Principio: La corriente de soldadura de un generador, rectificador o transformador, pasa a través del electrodo de tungsteno (infusible), para producir un arco entre el metal base y el electrodo. El calor del arco funde al metal base y la barrilla de aportación. Formando el baño de soldadura, el cual está protegido de la atmósfera por un gas inerte (argón o helio), alimentado a través de la boquilla de la antorcha o pistola.

Aplicación: Es un proceso mediante el cual se logran soldaduras de alta calidad. Se pueden soldar la casi totalidad de las aleaciones, en piezas de cualquier configuración en todas las posiciones. Este procedimiento no es económicamente aplicable para grandes espesores.

1.9 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.

1.9.1 Modificaciones estructurales en la zona fundida

Las modificaciones estructurales pueden agruparse en dos grupos (Rodríguez, 1983; Guliari, 1978; Bailey, 1995) las que afectan el grano del metal, a su construcción 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.

1.9.2 Modificaciones estructurales y físico – químicas en el metal base

Las modificaciones estructurales y físico – químicas que ocurren en el metal base se pueden conocer a través del estudio del crecimiento de los granos en dicha zona, considerando las variables que influyen en la misma como son: El 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 estructuras 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).

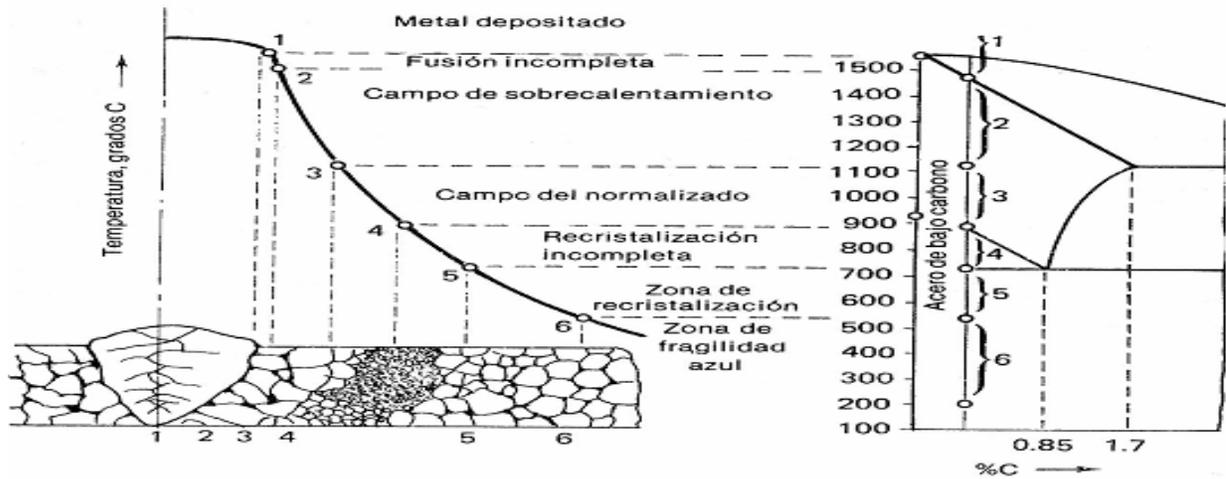


Figura 1.2. Zonas que se presentan en la soldadura, según el diagrama Fe – C (Zuñiga, 1983).

a) En la **zona de 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).

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.

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- δ a γ y producto de que el metal se calienta a temperaturas bastante por encima de Ac3 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.

Zona de normalizado: Está constituida por el metal calentado algo por encima de Ac3 hasta la temperatura de aproximadamente 1100 °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.

Zona de recristalización incompleta: Se presenta en la zona calentado a temperaturas entre Ac1 y Ac3, que en los aceros de bajo carbono va de 725 a 850°C. El metal en esta zona alcanza solo una recristalización parcial.

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 °C, de partes de granos surgen y crecen nuevos granos equiaxiales. Si el metal no ha sido previamente deformado plásticamente la recristalización no ocurre.

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 O₂, 0.005% de N₂ y 0.0005% de H₂ 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 Ac1 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.

1.10 Definición de ensayo y clasificación

Definición de ensayo: Examen o comprobación de una o más propiedades o características de un material, producto, conjunto de observaciones, etcétera, que sirven para formar un juicio sobre dichas características o propiedades. Se intenta de esta manera simular las condiciones a las que va a estar expuesto un material cuando entre en funcionamiento o en servicio. (<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ensayo de las propiedades de los materiales>).

Clasificación de los ensayos: Según la rigurosidad del ensayo. Según la naturaleza del ensayo. Según la utilidad de la pieza después de ser sometida al ensayo. Según la velocidad de aplicación de las fuerzas.

Según la rigurosidad del ensayo. Ensayos científicos: Se obtienen resultados que se refieren a los valores numéricos de ciertas magnitudes físicas. Ensayos tecnológicos: Se utilizan para comprobar si las propiedades de un determinado material son adecuadas para una cierta utilidad.

Según la naturaleza del ensayo. Ensayos químicos: Permiten conocer la composición, tanto cualitativa como cuantitativa del material. Ensayos metalográficos: Consisten en analizar la estructura interna del material mediante un microscopio. Ensayos físicos: Se cuantifican, por ejemplo, la densidad, el punto de fusión, la conductividad eléctrica... Ensayos mecánicos: Mediante los que se determina la resistencia del material cuando se somete a diferentes esfuerzos.

Según la utilidad de la pieza después de ser sometida al ensayo. Ensayos destructivos: Se produce la rotura o un daño sustancial en la estructura del material. Ensayos no destructivos: Se analizan las grietas o defectos internos de una determinada pieza sin dañar su estructura.

Según la velocidad de aplicación de las fuerzas. Ensayos estáticos: La velocidad de aplicación de las fuerzas al material no influye en el resultado del ensayo. Ensayos dinámicos: La velocidad de aplicación de las fuerzas al material juega un papel decisivo en el resultado del ensayo.

1.10.1 Tipos de ensayos

Ensayo de tracción, ensayo de compresión, ensayo de resistencia al choque, ensayo de fatiga, ensayo de cizalladura o cortadura, ensayo de flexión, ensayo tecnológico, ensayo no destructivo, ensayos de rayos x y rayos gamma.

(<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ensayo de las propiedades de los materiales>).

1.11 Conclusiones del capítulo

➤ Las bibliografías consultadas, ofrecen información en cuanto a cómo se producen las roturas en los tramos del transportador de mineral de tornillo sin fin; referente a los materiales empleados en la fabricación de las bridas pertenecientes al mismo, Sin

embargo estas no tratan el tema relacionado con el agrietamiento en uniones soldadas en los tramos del transportador del tipo Jacoby.

➤ Las frecuentes roturas ocurridas en las uniones soldadas entre las bridas y los tramos del transportador Jacoby, provocan un escape de mineral por la zona afectada; generando así pérdidas económicas a la empresa debido al paro del proceso productivo.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 Introducción

En nuestro país cumplen un rol fundamental todas las Empresas y unidades económicas, ya que estas son las encargadas de garantizar un crecimiento económico. En este capítulo se procede a describir los métodos de ensayos más utilizados en la determinación de las propiedades de los materiales con el propósito de realizar una correcta selección de la aleación a utilizar en el proceso de fabricación de la brida perteneciente a los transportadores de tornillo sin fin, nombrados Jacoby. Los mismos están sometidos a cargas y esfuerzo durante su explotación, por lo que se hace necesario que los elementos pertenecientes a estos transportadores se encuentren en el mejor estado técnico posible, para lograr una producción continua. Es por esto que dentro de los objetivos a desarrollar en este capítulo está; Realizar un análisis de las causas que provocan las roturas en las bridas en la unión soldada. Para la solución de este problema. Se realiza un análisis de la composición química de la aleación de la cual se fabrica dicha pieza. Realizar observaciones a través del microscopio para ver cómo están formados los granos y ver el comportamiento de la microestructura en la zona soldada.

En este capítulo se plantea como objetivo

Fundamentar y explicar los métodos de soldadura, procedimientos de selección de materiales y condiciones experimentales para la solución del problema.

2.2 Materiales e instrumentos

Los instrumentos de medición y equipos a emplear para la solución del problema son: Pie de rey, Pulidora metalográfica Montasupal, Lija, Espectrómetro de masa ESPECTROLAB 230, Cizalladora, Microscopio óptico marca NOVEL modelo NIM – 100.

2.2.1 Materiales Específicos

Aceros al 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).

Son aleaciones que presentan buenas propiedades mecánicas en las uniones soldadas, 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.

2.2.2 Material de la pieza

La brida es de acero de bajo contenido de carbono, este acero es estructural, los aceros estructurales no son generalmente aceros aleados y tienen el fósforo y el azufre entre 0,03 y 0,05. En estos es fundamental la característica y propiedades mecánicas. Son del tipo hipoeutectoide ya que su contenido de carbono se encuentra entre el rango de 0-0.77% C. Presentan buena soldabilidad; se emplean en la fabricación de piezas y elementos para estructuras, ejemplo: Estructuras metálicas, canales y vigas.

2.3 Preparación de las muestras a analizar

Se tomaron varias muestras del transportador de tornillo sinfín correspondientes a las brida por ser el elemento más afectado 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 Γ.

Se realizó con una fresa de vástago marca P6 M5 de diámetro 20 mm y 8 dientes.

2.3.1 Desbaste y pulido de las muestras a analizar

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), se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con lijas del tipo 100, 120, 150, 180, 220, 280. 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.

2.3.2 Limpieza y lavado de las superficies a observar

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

2.3.3 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_3) 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.

2.4 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 las bridas (tabla 2.1), a cada una de ellas se le realizaron 3 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 la brida agrietada.	3
Material de la brida Acero - 25 fundida en el combinado.	6
Material de la brida Acero - 35 fundida en el combinado.	6
Material del cordón de soldadura agrietada.	4
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 ₂ .	3
Total	28

Para determinar si las muestras analizadas se corresponden con los modelos establecidos para la fabricación de las bridas, 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 AISI 1025

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

2.5 Propiedades físicas – mecánicas del acero AISI 1025

Las propiedades de esta aleación se establecen de la siguiente forma; **Propiedades físicas:** Densidad 7850 kg/m³, módulo de elasticidad 210 KN/mm², conductividad térmica 58 W/(m k), calor específico 460 J/(kg.k), resistividad eléctrica específica 0,11

ohm . mm²/m. **Propiedades mecánicas:** Límite de fluencia $R_{p0,2} = 248$ MPa, tensión a la tracción $R_m = 379$ MPa, elongación $A_5 = 22\%$. Estas propiedades fueron consultadas en el software de materiales.

2.6 Métodos de soldadura empleados en la unión brida - tubo

Para realizar la soldadura en la unión brida – tubo se emplean dos métodos de soldadura diferentes, el primero emplea la combinación de los procesos SAW – SMAW y el segundo el proceso CO₂, procediendo de la siguiente forma:

1. El primer método se basa en 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. Este otro método consiste en soldar completamente la unión con proceso CO₂ (GMAW) empleando electrodo ER - 70S – 6.

A partir de los métodos mostrados anteriormente, se procede a realizar la unión brida - tubo para cada técnica de soldadura, el objetivo es caracterizar el más apropiado.

2.6.1 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, etcétera.

➤ 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 al carbono, a los vehículos, a la construcción, a la construcción naval, etcétera.

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.

2.7 Métodos de ensayos y Característica de los equipos empleados

Ensayos de Materiales

Con el ensayo de los materiales deben determinarse los valores de resistencia, verificarse las propiedades y establecerse el comportamiento de aquellos bajo la acción de las influencias externas. El factor económico juega un rol de importancia en el campo de la fabricación en general, imponiendo un perfecto conocimiento de los materiales a utilizar, de manera de seleccionarlos para cada fin y poder hacerlos trabajar en el límite de sus posibilidades, cumpliendo con las exigencias de menor peso, mejor calidad y mayor rendimiento. En los ensayos físicos se determinan generalmente la forma y dimensiones de los cuerpos, su peso específico y densidad,

contenido de humedad, etcétera., y en los mecánicos la resistencia, elasticidad y plasticidad, ductilidad, tenacidad y fragilidad, etcétera.

([http://es.wikipedia.org/w/index.php?title= Ensayo de materiales](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ensayo de materiales)).

Método de rayado a la lima: Se somete al material a la acción cortante de una lima de características determinadas, observando el efecto cortante producido.

Método Brinell (I): El penetrador es una esfera de acero templado, de gran dureza, de diámetro (D) que oscila entre 1 y 10mm, y a la que se aplica una carga preestablecida durante un intervalo de tiempo que suele ser de 15s. Siguiendo la norma ASTM E 92 – 82.

Método Brinell (II), Condiciones normales del ensayo: Diámetro del penetrador D = 10mm. Carga aplicada F = 3000 kg. Tiempo de carga t = 15s. Si las condiciones son distintas a las normales debe representarse: 250 HB 10 500 30.

Método Brinell (III), Características del ensayo: No se puede realizar sobre piezas esféricas o cilíndricas. No es fiable en materiales muy duros y de poco espesor. Para que el error del ensayo por deformación del material no sea muy grande, debe cumplirse: $D/4 < d < D/2$ Por aproximación puede conocerse el tipo de acero que se ensaya mediante la relación: $\%C = (HB - 80) / 141$.

Aparatos y Equipos

Máquina de prueba: El equipo para la prueba de dureza Brinell generalmente consiste de una máquina que soporta la probeta y aplica una carga predeterminada sobre un balín que está en contacto con la probeta. La magnitud de la carga está limitada dentro de ciertos valores. El diseño de la máquina de prueba debe ser tal que no permita un movimiento lateral del balín o de la probeta mientras se está aplicando la carga.

Penetrador: El balín estándar para la prueba de dureza Brinell debe ser de 10 mm de diámetro con una desviación de este valor no mayor de 0.005mm en el diámetro. Puede usarse el balín que tenga una dureza Vickers de por lo menos 850 usando una carga de 98N (10 kgf) en materiales que tengan una dureza no mayor de 450 HB o un balín de carburo de tungsteno en materiales con una

dureza no mayor de 630 HB. La prueba de dureza Brinell no se recomienda en materiales que tengan una dureza mayor de 630 HB.

El balín debe ser pulido y estar libre de defectos; en las pruebas de investigación o de arbitraje debe informarse específicamente el tipo de balín empleado cuando se determinen durezas Brinell que sean mayores de 200.

Microscopio de medición

Las divisiones de la escala micrométrica del microscopio o de otros dispositivos de medición que se usen para medir el diámetro de la huella, deben permitir una medición directa en décimas de milímetro con una aproximación hasta 0.02 mm. Este requisito se aplica únicamente al diseño del microscopio y no es un requisito para la medición de la huella.

Método Vickers (I): En este ensayo el penetrador es un diamante tallado en forma de pirámide de base cuadrada con un ángulo de 136° entre dos caras opuestas.

Método Vickers (II), condiciones normales del ensayo: $L/2 \text{ h p h } 68^\circ L/2 L/2 d/2$

Método Vickers (III), Características del ensayo: Las cargas aplicadas son más pequeñas que en el método Brinell (oscilan entre 1 y 120kp). La más empleada es la de 30kp. El tiempo de aplicación oscila entre 10 y 30s. Se utiliza tanto para materiales duros como en blandos. Puede medir dureza superficial por la poca profundidad de la huella. Expresión de la dureza: 520 HV 30 15.

Aparatos y Equipos

Máquina de prueba: El equipo para la prueba de dureza Vickers consiste generalmente de una máquina que soporta la probeta y permite un contacto gradual y suave entre esta y el penetrador, bajo una carga predeterminada que se aplica durante un periodo de tiempo dado. El diseño de la máquina debe ser tal que no tenga balanceos o movimientos laterales de la probeta y del penetrador, mientras se aplica o retira la carga, se utiliza un microscopio de medición que generalmente va montado en la máquina.

Penetrador de diamante

El penetrador debe estar finamente pulido con aristas bien definidas. La base de la pirámide debe ser cuadrada y sus caras opuestas deben formar un ángulo de 136° . Las cuatro caras del penetrador deben estar inclinadas simétricamente con respecto al eje del mismo y terminar en un vértice afilado, o sea que la línea de unión entre las caras opuestas no deben ser mayor de 0.001 mm de longitud. El buen estado de la punta del penetrador es de considerable importancia cuando la carga de prueba es pequeña y la huella también, por esta razón se recomienda verificar periódicamente la punta del penetrador para evitar fallas.

Microscopio de medición

Las divisiones de la escala micrométrica del microscopio, o de cualquier otro dispositivo de medición, deberán ser tal que pueda medirse la longitud de las diagonales de una huella con una aproximación de 5%, lo que sea mayor efectuada en una probeta, con la superficie pulida.

Método Rockwell (I): En el ensayo de Rockwell lo que se mide es la profundidad de la huella, no el área de la misma. La prueba de Rockwell consiste en hacer penetrar, en dos tiempos, en la capa superficial de la pieza un penetrador de forma prefijada y medir el aumento permanente de la profundidad de penetración.

Método Rockwell (II): Tipos de penetradores. Para materiales blandos (entre 60 y 150HV) se utiliza un penetrador de acero de forma esférica de 1,59mm de diámetro, y así se obtiene la escala de dureza Rockwell B (HRB). Para materiales duros (entre 235 y 1075HV) se emplea un cono de diamante con un ángulo de 120° obteniéndose así la escala de dureza Rockwell C (HRC).

Método Rockwell (III), procedimiento: En ambas escalas de dureza se aplica, inicialmente, una precarga de 10kp, con lo que el penetrador originará una huella de profundidad h_0 . Aplicación de la carga suplementaria F_1 que origina la huella h_1 . Eliminar la carga F_1 . Reacción elástica del material que eleva al penetrador una cierta altura quedando la huella permanente $h_e = h_1 - h_0$.

Método Rockwell (IV): La máquina del ensayo de Rockwell mide la diferencia e y se expresa la dureza de la siguiente forma: $HRC = 100 - e$ $HRB = 130 - e$.

Maquina y equipo

La máquina de prueba consiste en un soporte rígido o yunque, sobre el que se coloca la probeta y un dispositivo que aplica las cargas prefijadas a un penetrador en contacto con la misma.

Penetradores

a) Penetrador de diamante: Este tipo de penetrador debe emplearse en pruebas de dureza para las escalas A, C y D. Consiste en un cono de diamante cuyo ángulo es de $120^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ y su eje debe coincidir con la dirección de penetración con una tolerancia de $\pm 0.5^{\circ}$. La punta es un casquete esférico con un radio de 0.200 mm. La forma del casquete y el valor del radio del penetrador tienen una influencia importante en el valor de la dureza obtenida. La anisotropía del diamante hace difícil el maquinado del mismo en forma totalmente simétrica. Por lo cual es necesario comparar los resultados obtenidos con un penetrador patrón sobre piezas patrón de diferentes durezas.

b) Penetrador esférico de acero: Este tipo de penetrador debe emplearse en los ensayos de dureza para las escalas B, E Y F. Consiste en un balín de acero templado y pulido, con un diámetro de $1.588 \text{ mm} \pm 0.003 \text{ mm}$; Excepto para la escala E, que tiene un diámetro de $3.175 \text{ mm} \pm 0.004 \text{ mm}$. Dicho balín debe estar pulido y no debe presentar defectos superficiales. Debe eliminarse y anularse la prueba si presenta una deformación mayor a la tolerancia indicada anteriormente o cualquier otro defecto superficial. En los dos tipos de penetrador debe evitarse la acumulación en el penetrador de: polvo, tierra, grasa o capas de óxidos, dado que esto afecta los resultados de la prueba.

Condiciones del ensayo

1. La superficie del material debe estar lisa, seca y libre de grasa, polvo, etcétera.
2. El espesor de la probeta debe ser por lo menos diez veces la profundidad de la huella, y el ensayo no es válido si en la cara posterior a la del ensayo aparece una protuberancia.
3. Si se ensaya una pieza cilíndrica, el radio debe ser mayor en seis milímetros al del penetrador. Los valores de dureza resultan ligeramente inferiores a los valores reales.

4. La aplicación de la carga debe hacerse de manera perpendicular a la superficie de la probeta.

Ensayos dinámicos de dureza: Presentan la ventaja de la rapidez, comodidad y utilidad, ya que se pueden hacer en cualquier lugar por utilizar equipos portátiles. Por el contrario, su desventaja es la menor fiabilidad del ensayo. Los más utilizados: Método Poldi.

Método de Poldi: Es un método de impacto que consiste en lanzar una bola de acero de 5mm de diámetro sobre una probeta del material objeto de medida, de manera que el impulso produzca una huella permanente. H = dureza del material. S_p = superficie de la huella patrón. S = superficie de la huella en el material. H_p = dureza de la probeta patrón.

([http://es.wikipedia.org/w/index.php?title= Ensayo de las propiedades de los materiales](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ensayo de las propiedades de los materiales)).

2.7.1 Ensayo de dureza

La dureza de un material es la resistencia que opone a la penetración de un cuerpo más duro. La resistencia se determina introduciendo un cuerpo de forma esférica, cónica o piramidal, por el efecto que produce una fuerza determinada durante cierto tiempo en el cuerpo a ensayar. Como indicador de dureza se emplea la deformación permanente (plástica). En algunos casos, es necesario determinar las características mecánicas de los materiales sin llegar a su destrucción. También podemos determinar la dureza conseguida mediante un tratamiento de dureza. Podemos mencionar los tres tipos de ensayos de dureza más importantes son:

([http://es.wikipedia.org/w/index.php?title= Ensayo de materiales](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ensayo de materiales)).

Ensayo Rockwell

Para los materiales duros se emplea como elemento de penetración un cono de diamante de ángulo 120° , y para los semiduros y blandos una bolita de acero de $1/16''$, deduciéndose la fuerza Rockwell de la profundidad conseguida en la penetración. El cuerpo empleado para la penetración se hace incidir sobre la superficie de la pieza a ensayar con carga previa de 10Kg. La profundidad de penetración alcanzada constituye el valor de partida para la medición de la profundidad de la huella.

Después se aumenta en 140Kg la carga aplicada al cono (150Kg), y en 90Kg la aplicada a la bolita (100Kg), bajándose nuevamente el valor previo. Se mide la profundidad de penetración que queda y en la escala del aparato se lee directamente la correspondiente dureza Rockwell C (HRc) como o la Rockwell B (HRb) bolita.

Ensayo Brinell

Se comprime una bola de acero templada, de diámetro (D) 2,5; 5 ó 10mm, contra el material a ensayar con una fuerza P. Después de liberar la carga se mide el diámetro (d) de la huella con un dispositivo amplificador óptico. La dureza Brinell es un valor adimensional resultante de: La fuerza del ensayo debe tomarse de magnitud tal que se forme una huella con diámetro $d = 0,2.D$ a $d = 0,7.D$. Para materiales blandos y bolas de ensayo pequeñas, la fuerza del ensayo debe ser menor. Se calcula partiendo del grado de carga y del diámetro de la bola.

Ensayo Vickers

En este caso se emplea como cuerpo de penetración una pirámide cuadrangular de diamante. La huella vista desde arriba es un cuadrado. Este procedimiento es apropiado para aceros nitrurados y cementados en su capa externa, así como para piezas de paredes delgadas de acero o metales no féreos.

Nota: La pieza va ser tratada superficialmente, entonces se deben seleccionar los métodos rockwell y vicker como técnica de ensayo, ya que el objetivo es determinar la dureza del material y la resistencia en la unión soldada.

2.7.2 Ensayo de microdureza

En la medición de la microdureza se siguieron los procedimientos de la norma NC 10 – 56: 86, por lo que se utilizó un microdurómetro modelo PMT – 3 No 168, que tiene acoplado un objetivo acromático con compensación libre trinocular de tubo inclinado a 30°. Las superficies de las muestras se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, desbaste y pulido, se efectuaron tres mediciones a las muestras en diferentes lugares, las que se promediaron, la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° según la ASTM E 92 – 82.

2.8 Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la muestra 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 muestras en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.



Figura 2.1 Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM – 100

2.8.1 Análisis microestructural por el método de examen microscópico

El estudio microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del material. Esta se emplearán para establecer el comportamiento del material de las muestras después de efectuado el proceso de soldadura. La figura 2.3 es la microestructura del material de la brida de AISI 1025. La figura 2.3 corresponde con la estructura metalográfica del acero 25 según norma soviética, (ferrita y perlita).

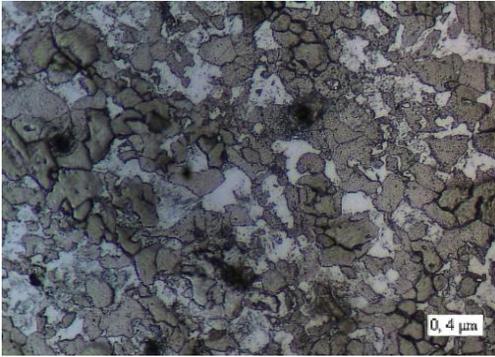


Figura 2.2. Microestructura del acero 25 según norma GOST.

Para el análisis se utilizaron diferentes muestras tomadas de la brida 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 2.3.

Tabla 2.3. Muestras seleccionadas para el análisis microestructural.

No	Muestras.
1	Material de la brida fundida en el combinado.
2	Material del cordón de soldadura agrietada.
3	Material del cordón de soldadura por el método SAW.
4	Material del cordón de soldadura por el método SMAW
5	Material del cordón de soldadura con CO ₂ .
6	Material de la brida rota en la unión

2.9 Análisis de la tecnología de fabricación

Para el análisis de la tecnología de fabricación de la brida, primeramente se parte del cálculo del cateto de soldadura, con el fin de demostrar si este cumple con las dimensiones requeridas.

2.10 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).

$$K = \frac{2M_t}{0,7 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot [\tau_{ciz}]} \quad (2.1)$$

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 (ω) al que está sometido el Jacoby.

$$M_t = \frac{N}{\omega} \quad (2.2)$$

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 (σ_f), que para el caso del acero AISI 1025 es $\sigma_f = 3020 \text{kgf} / \text{cm}^2$, por tanto:

$$[\tau_{ciz}] = 0,4[\sigma_f] \quad (2.3)$$

2.11 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:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+V+Mo}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%) \quad (2.4)$$

Donde:

Mn – Manganeseo.

Cr – Cromo.

V – Vanadio.

Mo – Molibdeno.

Ni – Níquel.

Cu – Cobre.

2.12 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).

$$CT = C_{eq} (1+0,005*S) \quad (\%) \quad (2.5)$$

Siendo:

CT - Carbono Equivalente Total.

Ceq – Carbono equivalente.

S – Espesor.

Luego se determina la Temperatura de precalentamiento.

$$T_{prec} = 350\sqrt{CT - 0,25} \quad (\text{Grados Celsius}). \quad (2.6)$$

Donde:

T_{prec} – 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.

2.13 Cálculo de resistencia mecánica

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

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Mt}{Wp} \leq [\tau] \quad (2.7)$$

Donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ - Es la tensión máxima al que está sometido el transportador.

Wp - módulo de la sección a torsión.

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

Mt - Momento torsor con que trabaja el transportador.

$$[\tau] = 0,5[\sigma] \quad (2.8)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{rest}}{n} \quad (2.9)$$

$$W_p = 0,2 * D^2 (1 - C^4) \quad (2.10)$$

$$C = \frac{d}{D} \quad (2.11)$$

Siendo;

n- El coeficiente de seguridad.

2.14 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 intuido, pues de otro modo la modelación puede ser muy laboriosa o imposible.

2.14.1 Etapas del MEF:

El ciclo del análisis por elementos finitos incluye cinco etapas diferenciadas.

- ✓ **Concepto:** en esta etapa se debe tener en cuenta los requisitos del problema a analizar. Hay que definir el modelo e incluir para el correcto análisis.
- ✓ **Modelización:** esta etapa es también llamada pre - procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar así como las condiciones de contorno.
- ✓ **Análisis:** en este punto es en que se hace el verdadero cálculo numérico del modelo de elementos finitos.
- ✓ **Interpretación:** aunque todos los demás puntos son los que hacen posible el análisis, esta es en realidad la etapa más importante. Aquí es donde se da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si por el contrario se debe proceder a realizar algún cambio. Desde esta etapa se puede

volver atrás hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos.

✓ **Aceptación:** es el momento de realizar las conclusiones finales sacadas del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

2.14.2 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. Crear 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.

2.15 Conclusiones del capítulo

- Se seleccionaron los materiales y equipos a emplear para la solución del problema así como los métodos de ensayos de materiales más empleados, eligiéndose los métodos Rockwell y Vickers por ser estos los ventajosos cuando se ensayan piezas superficialmente.
- Se seleccionaron los métodos de soldadura a emplear para realizar la unión brida - tubo del transportador del tipo Jacoby, los cuales fueron los procesos SAW – SMAW y CO_2 .
- Se comprobó la composición química estándar del material de la brida del transportador Jacoby, con el empleo del Espectrómetro de masa ESPECTROLAB 230 y se obtuvo como resultado que la misma pertenece al acero de baja aleación AISI 1025.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS.

3.1 Introducción

En el presente capítulo se establecen los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados en el capítulo dos, y durante el desarrollo de todo el trabajo así como métodos empleados para la solución del problema planteado, del mismo modo se establece un conjunto de criterios que sustentan las teorías que garantizan la veracidad de la hipótesis planteada como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la realización y observación de los ensayos. Se realiza además una valoración económica de la fabricación de las bridas, así como el impacto medioambiental que trae consigo la rotura de las mismas.

El objetivo del capítulo es:

Analizar los resultados de los ensayos realizados en este trabajo y propuesta de solución con respecto a la tecnología y los materiales, para explicar los fundamentos que dan solución al problema planteado.

3.2 Análisis químico

Al analizar la composición química (%) en masa de cada elemento de la aleación se determinó que la misma se corresponde con la establecida en el epígrafe 2.4 del capítulo 2. Se comprueba que las bridas rotas pertenecen a un acero del tipo AISI 1025 (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Composición química de las bridas rotas (acero 25).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,26	0,28	0,47	0,02	0,013	0,15	0,26	0,12	resto

Las bridas son fabricadas por la Empresa Mecánica Gustavo Machín Hoed de Beche. Se efectuó el análisis espectral de las mismas (tabla 3.2) y se comparó con la especificación de los planos.

Tabla 3.2. Composición química de las bridas fundidas en el combinado mecánico (acero 25).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,27	0,33	0,58	0,017	0,0012	0,08	0,01	0,09	resto

En ocasiones se funden bridas de acero 35, en la tabla 3.3 se representa la composición química de una brida fundida de medio contenido de carbono.

Tabla 3.3. Composición química de las bridas rotas (acero 35).

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	resto

Como se observa, el contenido de carbono en las bridas rotas se encuentra elevado en comparación con la norma para el acero AISI 1035 el cual se encuentra generalmente entre el rango de 0.32 – 0.38, esto se muestra en el gráfico de la figura 3.1.

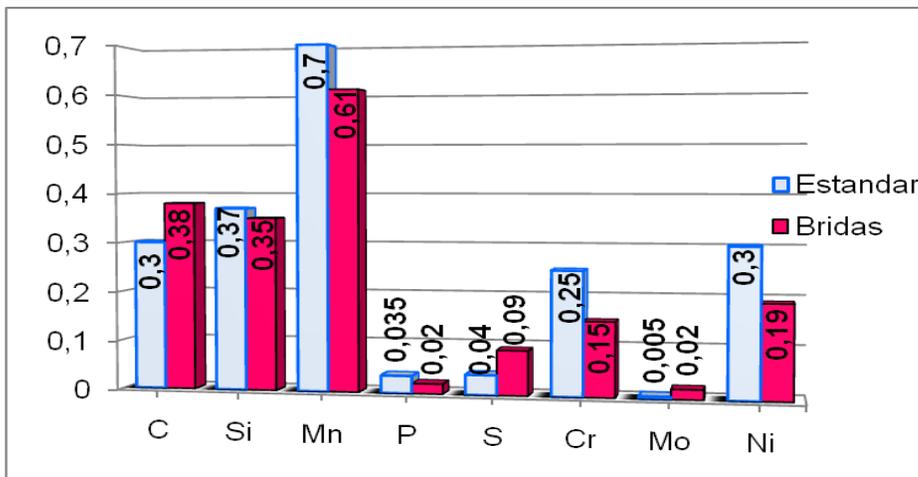


Figura 3.1 Comparación entre la composición química de las bridas rotas y el acero estándar.

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 contenido 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, ya que provoca

la aparición de fase martensítica, trayendo como principal desventaja que las aleaciones de medio contenido de carbono presenten una soldabilidad limitada.

Se verificaron muestras de las bridas fundidas durante el año 2011, para ello se analizaron 5 de las fabricadas en el mes de noviembre. Como se puede observar en la tabla 3.4 el contenido de carbono es elevado, siendo este un acero de medio contenido de carbono.

La composición química del material del transportador, se encuentra en el rango siguiente para cada elemento de la aleación: C = 0.25, Si = 0.32, Mn = 0.43, P = 0.014, S = 0.01, Cr = 0.03, Mo = 0.02, Ni = 0.10 y de Fe el resto; todos estos elementos están en contenidos expresados en (%).

Tabla 3.4 Composición química de las Bridas fundidas en el Combinado (acero 35).

Muestras	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
1	0,35	0,41	0,44	0,019	0,02	0,02	0,01	0,14	resto
2	0,32	0,24	0,46	0,025	0,013	0,13	0,01	0,10	resto
3	0,33	0,24	0,54	0,032	0,014	0,17	0,02	0,14	resto
4	0,38	0,45	0,81	0,018	0,012	0,08	0,01	0,08	resto
5	0,32	0,28	0,40	0,018	0,017	0,05	0,01	0,04	resto

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 febrero el taller 08 de fundición había fabricado alrededor de 5 bridas de bajo contenido de carbono (tabla 3.5) con las cuales se comenzarían a fabricar los tramos.

Tabla 3.5 Composición química de las bridas fundidas de acero 25.

Muestras	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
1	0,22	0,33	0,58	0,023	0,010	0,11	0,03	0,14	resto
2	0,26	0,28	0,47	0,013	0,012	0,26	0,02	0,12	resto
3	0,22	0,33	0,53	0,012	0,013	0,12	0,02	0,13	resto
4	0,23	0,31	0,47	0,015	0,011	0,09	0,02	0,10	resto
5	0,27	0,33	0,57	0,017	0,012	0,09	0,01	0,09	resto

Tabla 3.6 Composición química del cordón de soldadura agrietado.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,13	0,7	1,33	0,039	0.01	0,05	0,01	0,02	resto

Como se puede observar en esta tabla el carbono se encuentra en un porcentaje menor si lo comparamos con el acero estándar, esto pudo ser producido por una variación de la temperatura en los conductos y la corrosión a la que está expuesta la pieza lo cual provoca el deterioro de las propiedades del material.

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 uniones empleando diferentes procesos de soldadura (tablas 3.7, 3.8 y 3.9).

Tabla 3.7 Composición química del cordón de 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	resto

Tabla 3.8 Composición química del cordón de 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	resto

Tabla 3.9 Composición química del cordón de soldadura por el método CO₂.

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	resto

La composición química obtenida inicialmente es casi la misma, la diferencia no es muy significativa y el porcentaje es aceptable, sin embargo al analizar la soldadura de las uniones rotas (tabla 3.6), se observa que el carbono es muy bajo. La causa del bajo contenido de carbono puede estar originada por la pérdida o deterioro paulatino del material, producto al ambiente corrosivo al que está sometido el Jacoby.

3.3 Prueba de ensayos de dureza y de resistencia en la unión soldada

A partir del método Rockwell seleccionado en el capítulo 2 para determinar la dureza del material de la pieza, se obtuvo una dureza HRC = 170 HB medida en la escala C. Mientras que con el método Vickers se determinó la microdureza Vickers en la unión, obteniéndose un valor de 170 HV en la zona fundida (Z.F). Luego se determinaron los constituyentes en la zona de influencia térmica (Z.I.T) y al ensayar alrededor del cordón de soldadura de 4 – 5 mm entre el metal básico y el cordón se localizó una zona compuesta de ferrita y perlita.

3.4 Resultados del análisis Microestructural

Se realizó el análisis microestructural a cada una de las muestras seleccionadas en la tabla 2.3 del capítulo 2, y se compararon con la estructura estándar seleccionada para la fabricación de las bridas (figura 2.2 en el epígrafe 2.8.1 del capítulo 2).

Primeramente se analizó el material de los tubos de fabricación China (figura 3.2) y se comparó con la estructura del acero 25 según norma soviética.

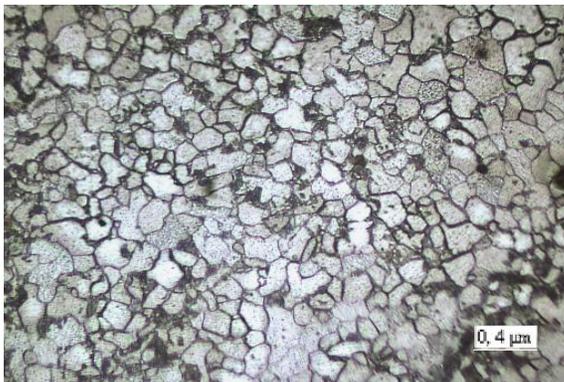


Figura 3.2 Microestructura del tubo de fabricación china (200 X).

Esta estructura fue atacada con nital al 4 %, ver epígrafe 2.3 del capítulo 2.

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, podemos observar que la estructura es de ferrita y perlita (figura 3.3), por tanto

el material de los tubos utilizado no presenta influencia perjudicial que pueda afectar la durabilidad de los tramos.

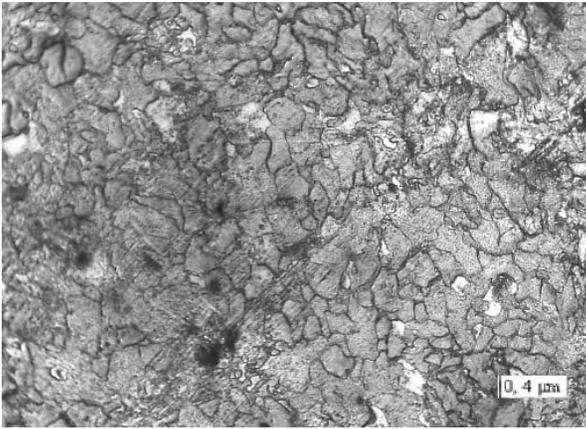


Figura 3.3 Microestructura del tubo de acero 25 fabricado por norma ASTM (200 X).

Teniendo como base la estructura de los tubos, se analizó el material de las bridas. En la figura 3.4 se puede observar la estructura que predomina en ellas. Las cuales fueron tomadas de los tramos rotos con medio porciento de carbono, y de bridas fundidas sin usar.

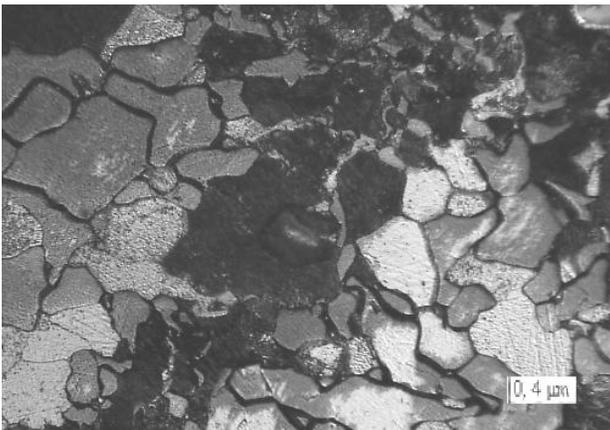


Figura 3.4 Microestructura de las bridas fundidas de acero AISI 1035 (400 X).

Como se puede observar en esta se forma una estructura de ferrita y perlita con granos más gruesos que la de acero AISI 1025.

Teniendo en cuenta que el tubo es unido con las bridas a través de soldadura y por tanto deben tener estructuras similares podemos deducir que el material de las bridas fundidas de acero 35 en la Empresa Mecánica del níquel no es muy favorable. Porque

el carbono no es similar y al efectuarse la soldadura de la unión se originan tensiones internas en el material.

Cuando analizamos una de las bridas rotas, ya sometidas a las condiciones de trabajo del Jacoby (figura 3.5), se puede observar que en la unión soldada la estructura del metal depositado (parte oscura) presenta un fondo de granos muy finos del tipo trostitico y grano grueso con red de ferrita, y la zona fundida del metal base (parte clara) presenta granos finos, alineados y aciculares.

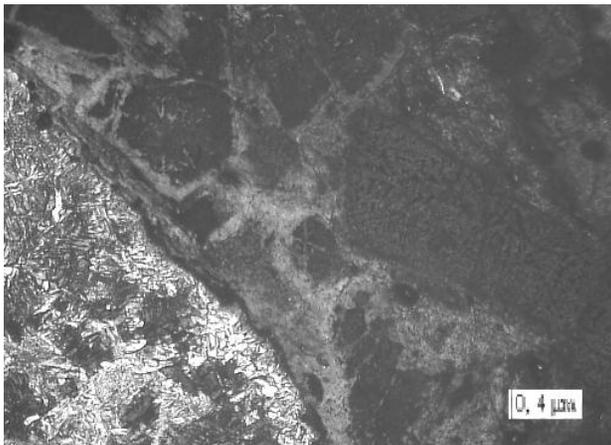


Figura 3.5 Microestructura en la unión del cordón de soldadura agrietada (400 X).

Según lo visto en la figura 3.5 se puede deducir que la unión soldada presenta falta de fusión y forma una estructura desfavorable para la soldadura. Además en varios tramos se pueden observar la presencia de poros y grietas en la unión soldada (figuras 3.6 y 3.7) las figuras pertenecen a un tramo 4 y 6 respectivamente.

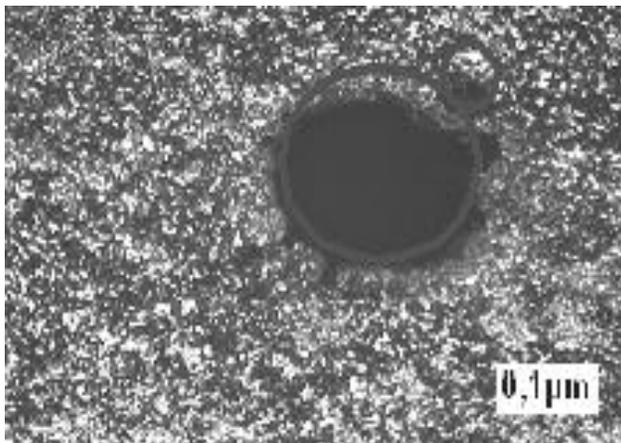


Figura 3.6 Presencia de poros en la soldadura de tramo cuatro (100 X).

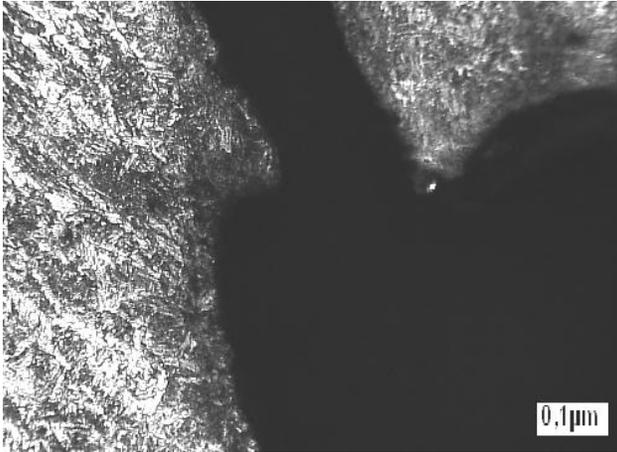


Figura 3.7 Presencia de grietas en la soldadura del tramo seis (100 X).

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 3.8 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.

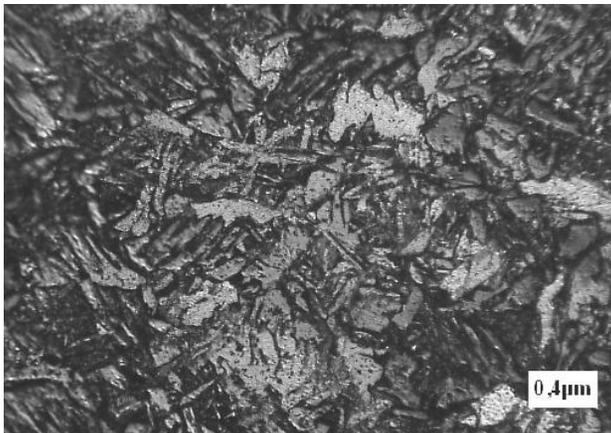


Figura 3.8 Estructura de la soldadura similar a la de Widmanstaetten (400 X).

En varias muestras se observó que la estructura del metal base es de ferrita y perlita orientada, tal como lo muestra en la figura 3.9 Esto ocurre generalmente cuando la unión soldada se realiza sin precalentamiento.

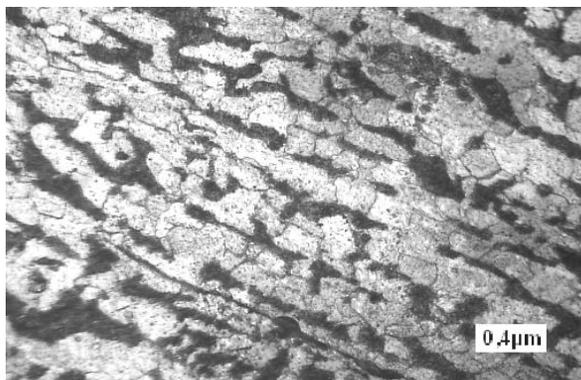


Figura 3.9 Microestructura del metal base de la brida, ferrita y perlita orientada (400 X).

Si observamos además el tamaño de grano de la figura 3.8 obtenidos en las uniones soldadas y lo comparamos con la microestructura de la brida (figura 3.5), 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 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 muestras empleando, métodos de soldaduras diferentes.

A partir de una soldadura con electrodo E-7018 por el método SMAW (figura 3.10), utilizando corriente directa con polaridad invertida y un amperaje de 120 A, empleando un voltaje de 40 V, se obtuvo una estructura fina de ferrita y perlita.

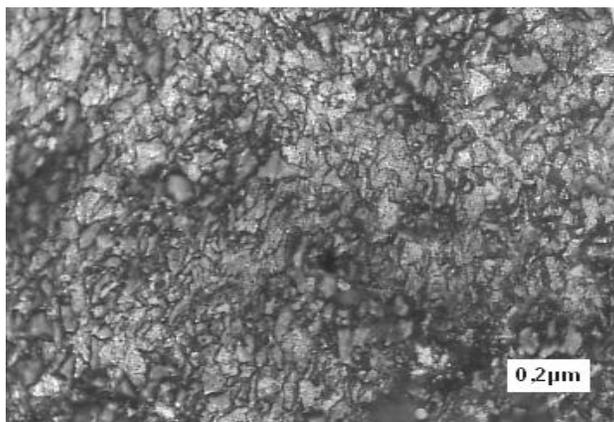


Figura 3.10 Soldadura con electrodo E-7018, ferrita y perlita (200 X).

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 3.11).

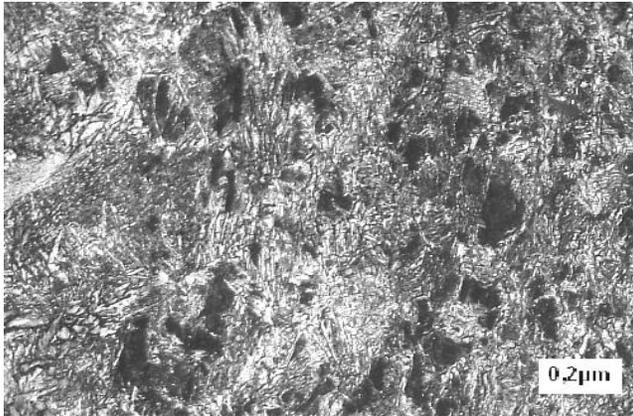


Figura 3.11 Soldadura por el método SAW (200 X).

En la figura 3.12 se observa la unión de las dos soldaduras mostradas anteriormente, obtenidas, mediante la combinación de los métodos (SAW y SMAW).

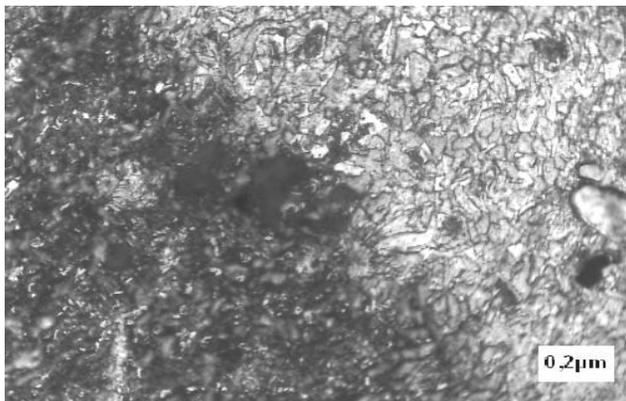


Figura 3.12 Soldadura por el método SAW y SMAW (200 X).

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 3.13), siendo menos recomendable, debido a que la transferencia metálica que genera el CO_2 no es la idónea en los procesos de soldadura ya que provoca irregularidades tales como: Crean un desequilibrio en el retículo cristalino es decir hay

falta de orientación y desorganización de los átomos en el espacio (los cristales no se orientan), conducen a la fragilidad del material.



Figura 3.13 Soldadura de la unión brida – tubo 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 γ y la velocidad de enfriamiento a partir de esta fase. 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 del análisis de la tecnología de fabricación

Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones analizadas en el capítulo dos se representan a continuación.

3.5.1 Cálculo del cateto de soldadura

Para este cálculo se tienen en cuenta las ecuaciones 2.2 y 2.1 establecidas en el capítulo dos.

Tabla 3.10 Resultados necesarios para el cálculo del cateto de soldadura.

M_{torsor}	$\tau_{ciz} (\tau_{ciz})$	$\sigma_{fluencia} (\sigma_f)$
12244.898 N/m	6,04 MPa	30,20 MPa

Símbolos empleados en la tabla 3.10

M_{torsor} : Momento torsor al que esta sometido el transportador.

τ_{ciz} : Tensión de cizallamiento.

$\sigma_{fluencia}$: Tensión de fluencia del material.

A partir de estos resultados obtenidos el cateto de soldadura es **K >4 mm**

3.6 Cálculo de la temperatura de precalentamiento para la soldadura

La temperatura de precalentamiento para las Bridas de acero 25 el carbono equivalente es $C_{eq} = 0,32\%$ según la ecuación (2.4). Como el valor de (C_{eq}) es menor de 0,45% el precalentamiento es opcional.

Por problemas de cumplimiento en la producción en ocasiones se fabrican Bridas de acero 35 y son montadas, se calculó el carbono equivalente para este acero, donde $C_{eq} = 0,47\%$ según la ecuación (2.4), por tanto se requiere una temperatura de precalentamiento de $180^\circ C$ según la expresión (2.6), con la cual se eliminan las tensiones internas del material.

3.7 Cálculo de resistencia mecánica

Según los cálculos realizados en la ecuación (2.7), la condición de resistencia se cumple, ya que la tensión máxima que genera el transportador es menor que la que admite el material de las bridas, ver tabla 3.16; igualmente para este cálculo se tuvieron en cuenta las ecuaciones (2.10) y (2.8).

Tabla 3.11 Valores obtenidos de la resistencia del cordón de soldadura unido a solape.

$\tau_{m\acute{a}x}$	τ_{adm}	W_p	Condición de resist.
55700 MPa	75500 MPa	137.9 cm	$\tau_{m\acute{a}x} \leq \tau_{adm}$

Símbolos empleados en la tabla 3.11

$\tau_{m\acute{a}x}$: Tensión máxima a la que está sometido el transportador.

τ_{adm} : Tensión admisible del material.

W_p : Módulo de la sección a la torsión.

En conclusión se puede decir que como la tensión máxima es menor que la tensión admisible la unión brida - tubo, soporta las cargas y el torque al que está sometido el transportador.

3.8 Análisis de las roturas en las bridas

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 las bridas rotas (figuras 3.14, 3.15 y 3.16), 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.3.14 Parte interior.



Figura.3.15 Parte exterior.



Figura.3.16 Ambos cordones

2- Las bridas fundidas en el taller 08 del Combinado Mecánico, como lo muestra la figura 3.17, 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 febrero del 2012 se rechazaron por parte de la dirección y tecnólogos del Taller 06, 2 bridas por defectos de fundición.

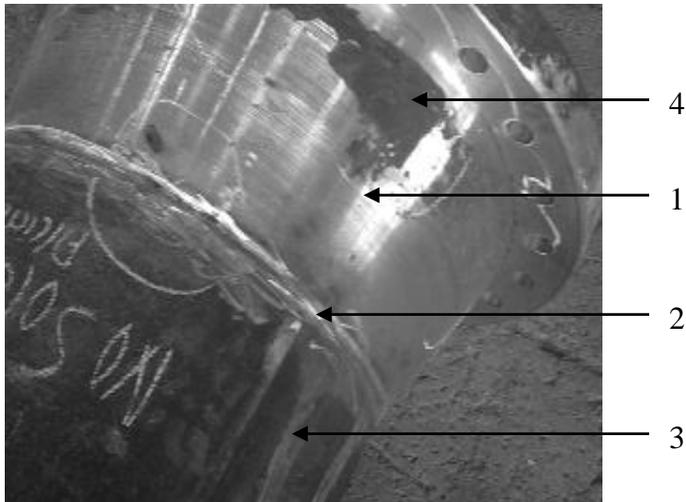


Figura.3.17 cavidades y presencia de poros en las Bredas.

1- Breda.

2- Cordón de soldadura.

3- Tramo cuatro del Jacoby.

4- Poros.

3.8.1 Valores obtenidos mediante la simulación por el método de elementos finitos (MEF)

Al realizar la simulación con el empleo del software Cosmos Design Star para la unión brida – tubo, primeramente se aplicaron las condiciones de trabajo de la unión, figura 3.18, seguidamente se realizó el mado de la pieza el cual se representa en la figura 3.19, luego se obtuvieron los valores de esfuerzos máximos, de desplazamiento estático y el factor operativo de seguridad que resiste la unión; los cuales se presentan en las figuras 3.20, 3.21 y 3.22 ver anexo 2.

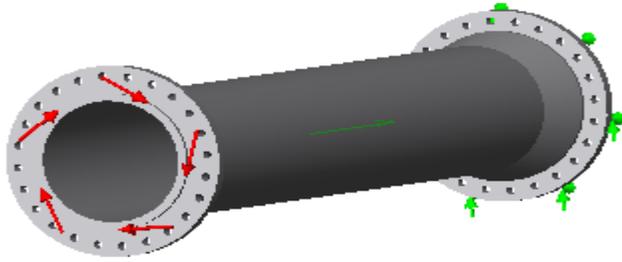
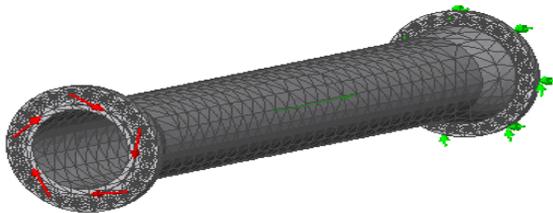


Figura 3.18 Representación de las cargas en la unión brida - tubo



En la figura 3.19 Mayado de la unión brida - tubo

En esta figura 3.19 se representa el mayado de la pieza, donde se obtuvieron un total de 59598 nodos y 29887 elementos en el mayado.

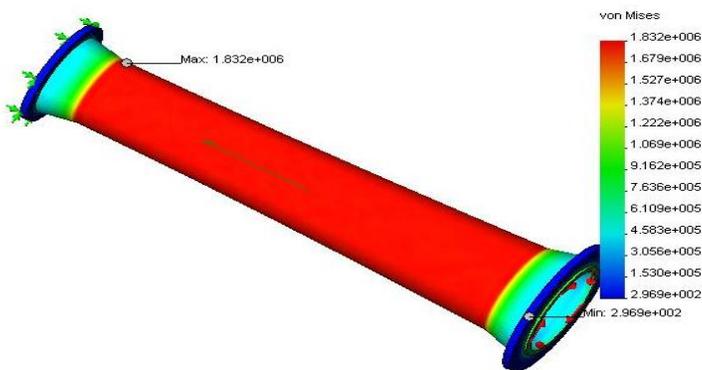


Figura.3.20 esfuerzo en la unión brida – tubo sometido a torsión

En la figura 3.20 se representan los valores del esfuerzo máximo con un valor de 1.832000 MPa y un valor mínimo de 0.0002969 MPa; entonces como la tensión máxima a la que esta sometido el transportador es de 55700 MPa y esta es menor que la tensión admisible del material $\tau_{adm} = 7550$ MPa y como la tensión de fluencia es $\sigma_f = 30.20$ MPa, se llega a la conclusión de que la pieza resiste.

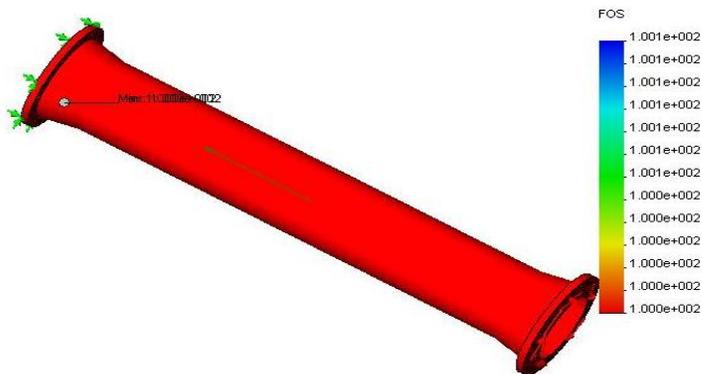


Figura 3.21 Factor operativo de seguridad de la unión brida – tubo

En esta figura se representa un valor mínimo de 0,0001 MPa y un valor máximo de 0,0001001 MPa, Factor operativo de seguridad de la pieza obtenido es de 0,00019. Podemos llegar a la conclusión de que la misma resiste el torque al que está sometida.

3.9 Material para la fabricación de las bridas

A partir de las clasificaciones descritas en el trabajo, referente a los materiales para piezas y estructuras se propone como aleación idónea para la fabricación de las bridas el acero al carbono de bajo contenido de carbono. Por presentar esta aleación buena aceptabilidad a los procesos de soldadura, lo que permite lograr una mayor resistencia en la unión soldada y no emplear para la fabricación de la pieza el acero de medio contenido de carbono, puesto que se obtendría un producto defectuoso; debido a que ha mayor contenido de carbono se incrementa la contracción, dando origen a la formación de rechufe en el elemento fundido.

3.10 Valoración económica

Para realizar la valoración económica se tienen en cuenta los costos en que se incurren en las operaciones de fundición y maquinado de la brida. Los parámetros a tener en cuenta en cada proceso se adquirieron en la base de datos del departamento de economía, de la empresa Comandante Gustavo Machín.

3.10.1 Costo de los ensayos de análisis químico

Tabla 3.13 Costo de los ensayos de análisis químico.

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

3.10.2 Costo de los ensayos de radiografía

Tabla 3.14 Costo de los ensayos de radiografía.

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

3.10.3 Costos de maquinado

Los costos de las operaciones de maquinado de la brida se representan en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Costos de las operaciones de maquinado.

Calificación	Tarifa (\$/h)	Total horas	Importe (\$)
Tornero	3,26	8.80	28,68
Taladrador	2,54	0,50	1,27
Soldador	2,99	0,83	2,48
Total			32,43

3.10.4 Gasto de Energía consumida en la fabricación de la brida

En la tabla 3.15.1 se relacionan las principales máquinas utilizadas en la fabricación de la pieza.

Tabla 3.15.1 Principales máquinas utilizadas en la fabricación de la brida

Máquinas	Tarifa (\$/kWh)	Potencia máquina(kW)	E _c (kW/h)	Importe (\$)
Torno 165	2,0	13,4	26,8	26,8

Taladro radial 2M55	0,3	2,5	0,75	0,75
Horno	3,0	5,0	15,0	15,0
Máq. Soldar Miller	0,3	40.6	10,15	10,15
Total				52,7

El costo total de maquinado de la brida es de 85,13 Mn

3.10.5 Costo de Fundición

Los costos de gastos generales se representan en la siguiente tabla 3.16

Materiales				
Producto	Precio Total (CUP)	Precio CUC	Importe total (CUP)	Importe CUC
Granalla	1600,970	1600,970	10,406	10,406
Disco abrasivo P/Desbaste	2,65	2,65	13,27	13,27
Acetileno	5,51	4,51	12,89	10,56
Polvo exotérmico	60,48	60,48	0,12	0,12
Oxígeno	1,15	0,67	42,32	24,72
Chatarra recorteria	0,02	0,02	21,41	21,41
Desmoldeante, Base de aluminio	5,559	5,559	5,559	5,559
Electrodo de carbón (9,5)	0,34	0,31	17,33	15,84
Lingote aluminio	3653,480	3653,480	11,25	11,25
Alambre de acero para Muelle (6,0)	1130,421	1130,421	6,78	6,78

Miel final	72,824	0	1,820	0
Silicato metalúrgico	385,788	315,009	15,43	12,60
Muela plana	60,874	60,874	12,17	12,17
Gas carbónico	0,49	0,41	11,88	9,91
Carbón antracita	274,40	274,40	1,89	1,89
Palanquilla AC	560,14	357,64	258,52	165,06
Manguito exotérmico cilin.	6,66	6,66	33,34	33,34
Alcohol clase A	0,47	0,36	7,13	5,46
Bentonita natrificada	296,53	159,38	38,54	20,72
Arena clasificada(cuarzo)	326,94	326,94	490,42	490,42
Pintura refractaria base	3,66	3,66	87,96	87,96

El costo total de materiales es de 1083.18 Mn equivalente a 943.68 CUC.

Costo de la fuerza de trabajo

Fuerza de trabajo			
Operación	Tiempo	Tarifa	Importe
Corte sist. alim	15,89	2,50	39,72
Preparación de carga	9,54	2,36	22,51
Preparación de carga	3,18	2,99	9,50
Fusión	6,36	3,26	20,73
Elaboración de macho	31,79	2,36	75,02
Elaboración de macho	12,71	2,47	31,39

Elaboración del molde	6,36	3,26	20,73
Preparación de carga	12,84	2,47	31,71
Ensamble	34,96	2,71	94,74
Elaboración de macho	15,89	2,50	39,72
Rebabado	9,54	2,47	23,56
Elaboración de molde	28,61	2,71	77,53
Reverberia	12,71	2,64	33,55
Preparación de carga	3,17	2,50	7,92
Vertido	6,36	2,47	15,70
Rebabado	6,29	2,71	17,04
Elaboración de molde	28,61	2,64	75,53
Vertido	15,89	2,64	41,94
Limp/Terminación	19,07	2,36	45,0052

El costo total de la fuerza de trabajo es de 723.63 Mn.

Costos generales de fundición, incluye los costos de materiales y de mano de obra.

Conceptos de gastos	Total	Total en CUC
Materias Primas y Materiales	2102,74	1963,23
Materiales	1083,19	943,68
Combustibles y lubricantes	18,33	18,33
Energía Eléctrica	454,17	454,17
Útiles y Herramientas	460,19	460,19
Agua	0	0

sub. total gastos de (elab.)	3940,40	659,46
Otros gastos directos	558,00	8,42
Depreciación	389,63	0
Arrendamiento de equipos	168,37	8,42
Gastos de fuerza de trabajo	1385,12	287,84
Salarios	723,62	0
Vacaciones	65,78	0
Contribución Seg. social, Impuesto/ Fuerza de trabajo	307,87	0
Estimulación en divisas	287,83	287,83
Gastos indirectos de producc	1265,18	258,86
Depreciación	25,92	0
Mantenimiento y reparación	1239,26	258,86
Gastos generales y de administración	375,80	37,06
Combustibles y lubricantes	4,20	4,20
Energía eléctrica	3,24	3,24
Depreciación	13,18	0
Alimentos	355,18	29,62
Otros	356,32	67,28
Gastos bancarios	356,32	67,28
Costo de producción	6043,14	2622,68
Margen de utilidad S/ Base autorizada		

	788,08	0
Precio establecido por el MFP	6831,22	0
Componente en pesos convertibles	0	2701.36

El costo total de fundición de una brida es de 3156,02 Mn

3.10.6 Precio establecido para la fabricación total de una brida

El valor total que cuesta fabricar una brida del transportador Jacoby se puede apreciar en la tabla 3.17.

Tabla 3.17 Valor total de fabricación de la brida.

Pieza de fabricación	P/u(Mn)
Brida o platillo	5684,72

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 tonelada 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.

3.11 Impacto ambiental

Las frecuentes roturas en la unión brida – tuvo en los diferentes tramos del transportador del tipo Jacoby, provocan la fuga de mineral y gases tóxicos al medio ambiente; trayendo consigo afectaciones a la salud y al medio que lo rodea. Los tramos están compuestos por bridas soldadas a un tubo, al ocurrir una rotura estas piezas son enviadas a la Empresa Mecánica del Níquel Cdte. Gustavo Machin, la cual para su fabricación ejecuta los procesos de fundición, maquinado y ensamble de los tramos.

Las altas temperaturas de calentamiento durante los métodos de soldadura son potencialmente perjudiciales para el proceso y para el medio ambiente, ya que aceleran rápidamente los procesos de fusión del metal de aporte, metal base, revestimiento y fundentes, teniendo lugar durante el mismo la evaporación, salpicaduras, y oxidación de los materiales y elementos que participan en las reacciones químicas de la zona fundida.

Los trabajos de soldadura son bastante perjudiciales al hombre y al medio ambiente, debido a la incidencia de las radiaciones, gases y altas temperaturas generados por el proceso. Los efectos contaminantes derivados de los procesos de soldadura son mucho más agresivos a la salud cuando las piezas a soldar están recubiertas de sustancias. Las partículas de arena de moldeo por debajo de $0,018 \mu\text{m}$ están en suspensión en el taller, ocasionan afectaciones a la salud de los trabajadores provocando enfermedades como la silicosis.

En el proceso de maquinado se produce gran cantidad de desprendimiento de virutas, estos desechos sólidos 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 como: aceites, pinturas y otras; que se evaporan durante el proceso e inciden en el hombre junto a los gases de la soldadura y los del local, si en el mismo se realiza cualquier otra actividad que emita sustancias al medio.

Factores contaminantes del puesto de trabajo del soldador:

1. Las radiaciones: luz visible, infrarrojas, ultravioletas, gammas y rayos X.
2. Sustancias químicas en las emisiones de gases y vapores en forma de humos, que son los representantes del riesgo oculto.
3. Elevadas temperaturas.

Las radiaciones visibles, ultravioletas e infrarrojos pueden surgir directamente de la fuente de soldadura o reflejarse en otras superficies. Las fuentes de estos tipos de

rayos incluyen la llama del combustible, el arco de soldadura o corte, el rayo láser, el baño de soldadura fundido, el fundente fundido, la escoria fundida, los metales blanco y rojo calientes. Además las radiaciones infrarrojas y ultravioletas pueden causar cambios químicos en la atmósfera circundante con produciendo gases muy tóxicos como: ozono, dióxido de nitrógeno presentes en el aire. Los rayos X y gammas se producen por el equipo que se utiliza para las pruebas no destructivas de la soldadura. Los rayos X también se producen por el haz de electrones.

Los vapores y gases en forma de humos son producidos por las elevadas temperaturas que además de fundir el metal lo evaporan. Este vapor se condensa en pequeñas partículas de metal oxidado que salen en forma de humo de la soldadura. Dependiendo del tipo de soldadura, podrán estar presentes óxidos de Aluminio, Cadmio, Cromo, Cobre, Hierro, Plomo, Manganeso, Níquel, Titanio, Vanadio. Los gases, como el Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Monóxido de Carbono, se generan por la descomposición de los revestimientos de electrodos y la acción de los rayos ultravioleta. Los humos, partículas de metales tóxicos que se producen durante los trabajos de soldadura, generalmente tienen diferentes composiciones.

3.12 Conclusiones del Capítulo

1. Se realizó una comparación entre la composición química de la muestra de acero 35 con la del acero 25 y se determinó que los elementos aleantes en las muestra de acero 35 se encontraban elevado en cuanto al porciento establecido, mientras que para el acero 25 estos permanecen dentro del rango establecido para los aceros de bajo contenido de carbono o sea de 0.22 - 0.28 % C.
2. Mediante la observación de la microestructura de las muestras seleccionadas con el empleo del microscopio óptico, se comprobó que los principales defectos presentes en la pieza son; poros, grietas por contracción, inclusiones de arena y rechupe.
3. Al realizar los ensayos de dureza y microdureza en la unión soldada se obtuvo un valor de dureza Rockwell medido en la escala C HRC = 170 HB, mientras que con el método Vickers se determinó una microdureza de 170 HV en la zona fundida (Z.F) de la pieza. Luego se determinaron los constituyentes en la zona de influencia térmica (Z.I.T) y al ensayar alrededor del cordón de soldadura de 4 - 5 mm entre el metal base y el cordón se localizó una zona compuesta de ferrita y perlita.

Conclusiones Generales

1. Se realizó el estudio microestructural de las muestras seleccionadas y se observó que al efectuar la soldadura con CO_2 , se obtiene una estructura incompleta de ferrita y perlita en las aleaciones de bajo y medio contenido de carbono afectándose así el cordón de soldadura; Mientras que al realizar la unión empleando la combinación del método SMAW – SAW se logra la estructura deseada.
2. Se determinaron las causas que dan origen a la rotura en la zona soldada de la brida del transportador de tornillo sin fin al realizar la soldadura con. Dentro de las cuales se encuentran las siguientes: Fusión incompleta al depositar el material de aporte, se crean tensiones internas en el cordón depositado las cuales provocan el agrietamiento de la unión.

Recomendaciones

1. Emplear el acero de bajo contenido de carbono para la fabricación de las bridas del transportador Jacoby y garantizar que la fundición de la pieza se realice cumpliendo los requisitos técnicos que requiere todo el proceso, es decir, comprobar el peso de los elementos aleantes, realizar una correcta selección de las arenas de moldeo, utilizar cuatro mazarotas exotérmicas ubicadas a 90° una con respecto a la otra.
2. Al estar en funcionamiento el equipo, el técnico u operario en función deben garantizar que la entrada de mineral al transportador no sobrepase las toneladas requeridas ya que al incrementarse la cantidad de mineral dentro de los conductos aumenta la presión y la temperatura y evidentemente estas diferencias de variables tecnológicas pueden provocar la salida de servicio de la pieza.
3. Desarrollar un estudio de factibilidad económica y tecnológica que permita determinar la variante óptima a utilizar en la fabricación de la brida, para evitar los defectos de fundición de la pieza, a partir de las condiciones con que cuenta la entidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

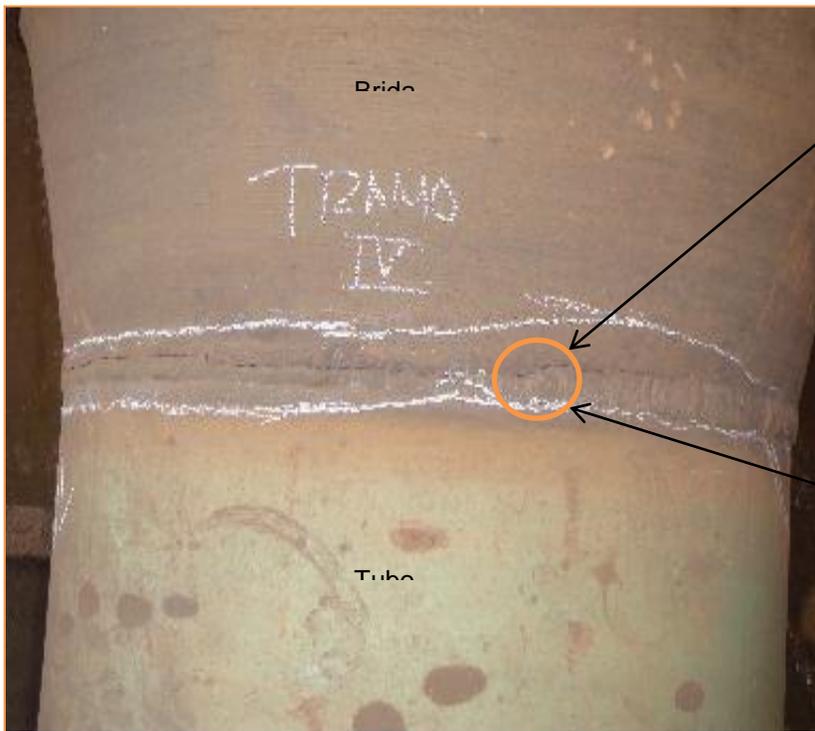
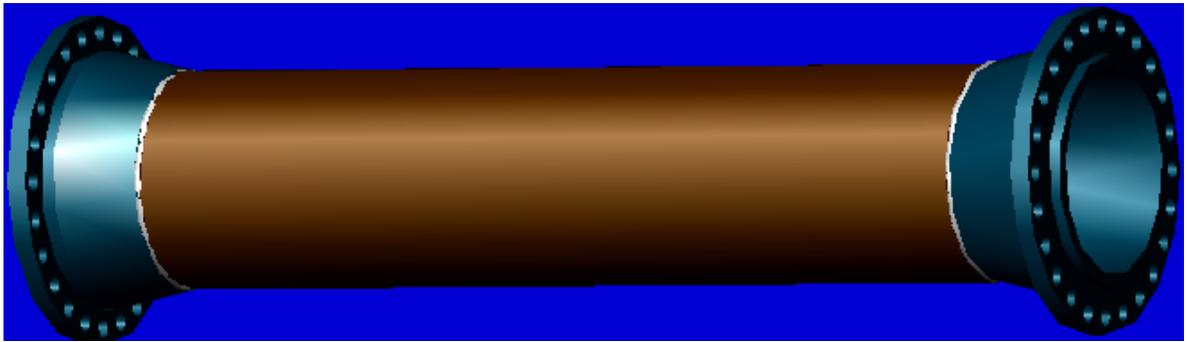
1. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959 – 16 – 0188 - 3. Universidad de Matanzas. 2002.
2. American Welding Society (AWS) “Welding Handbook”. 8va Edición. 1996.
3. Ashby, M. F. Engineering Materials 1. An Introduction to their Properties and Applications. Second Edition. Department of Engineering, University of Cambridge, UK. ISBN 0 7506 3081 7. p 131 – 140. 1996
4. Bailey, N. Weldability of Ferritic Steels. The Welding Institute, 1995.
5. Bakker, F. J. Y Horestreydt A. J. W. Soldadura por arco, Madrid, 1968.
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. 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.
10. 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
11. 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
12. Ensayo de materiales. En: Wikipedia. [En línea]. [Consultado: 2012.05.12]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/www/index.php?title>
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. 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.
15. Glizmanenko, O. L. "Soldadura y corte de metales". La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1975. 472 pp.
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. James M. R. in Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1-4. 1996
21. James M. R. y Buck O. Medidas no destructivas cuantitativas de Tensiones Residuales. CRC, Revisión crítica en ciencias de los materiales en estado sólido. Vol. 9, Issue 1. 1980.
22. Kedzierzawski, P., "Hydrogen Trapping in Iron and Iron Alloys", Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, 1st. Ed., Noyes Publications, 271 - 288, New Jersey, USA. 1985.
23. Key To Steel. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
24. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1ed.Editorial Mir Moscú. 1973. P 359 – 360.
25. 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
26. Lancaster, J. F. Metalúrgia de la soldadura. Sixth Ed., 256-268, Woodhead Publishing, Abington Cambridge, England. 1999
27. 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

28. 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.
29. Masubuchi K. Análisis de estructuras soldadas. Pergamon Press, Elmsford, N. Y. 1980.
30. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
31. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977
32. Meyer, H. J. Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defecte in Welds, Welding Inst. London. 1968.
33. Mikliaev, P. G. Anisotropía en las propiedades mecánicas de los metales. Ediciones Metalurgia. Moscú. 1986.
34. Nangel, D. Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor. Metal Const. Nro 2, Vol. 64. 1969.
35. Nicholls D. M. Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente. Brit. Welding Journal. Nro 3, Vol. 15. 1968.
36. Oystein Grong, Modelación Metalúrgica de la soldadura. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
37. Pérez, P. Y. Tesis en opinión al título de ingeniero mecánico, 2007
38. Pero - Sanz, J. A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
39. Pero - Sanz, J. A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. p 393 - 502. España.
40. 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.
41. Ramírez, G. E. introducción a la técnica de ensayo no destructivos, Ed. Instituto Nacional de técnicas aeroespaciales, Madrid, 1980
42. Rodríguez, H. Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1983. 613 pp.

43. 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.
44. 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.
45. Seferian, D. Metalurgia de la soldadura. Ed. Revolucionaria. 1966. 397 pp.
46. Stout, R. D. and Doty, W. D. Weldability of Steels. Welding Research Council, 1971.
47. Taylor, L. G. Aspectos Metalúrgicos de las propiedades mecánicas de metales soldados. Weld and Metal const. Nro 5. 1975
48. Watanabe, M. Grietas laminares. Welding in Shipbuilding. Welding Inst. London. 1962.
49. Weld Cracking, Lincoln Electric Co. 2001.
50. Wilson, W. G. Minimicion de las grietas laminares mediante la elevación de la ductilidad en la dirección Z. Welding. Journal. Nro 11. 1974
51. Wormigton, H. Grietas laminares en Planchas de Acero calmados con Silicio. Weld and Metal Const. Nro 9, Vol. 35. 1967.
52. 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
53. Zuñiga, R. Tecnología de la soldadura eléctrica por fusión. Edit Pueblo y Educación. 350 pp. 1987.

A nexo1



ANEXO 2

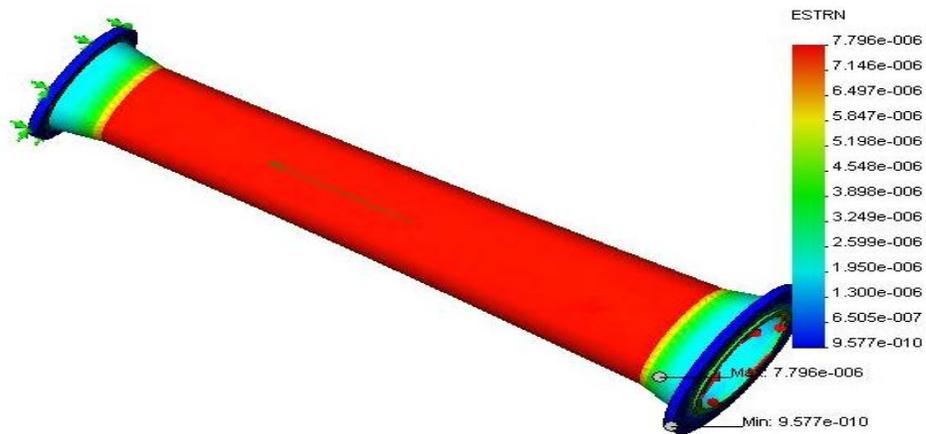
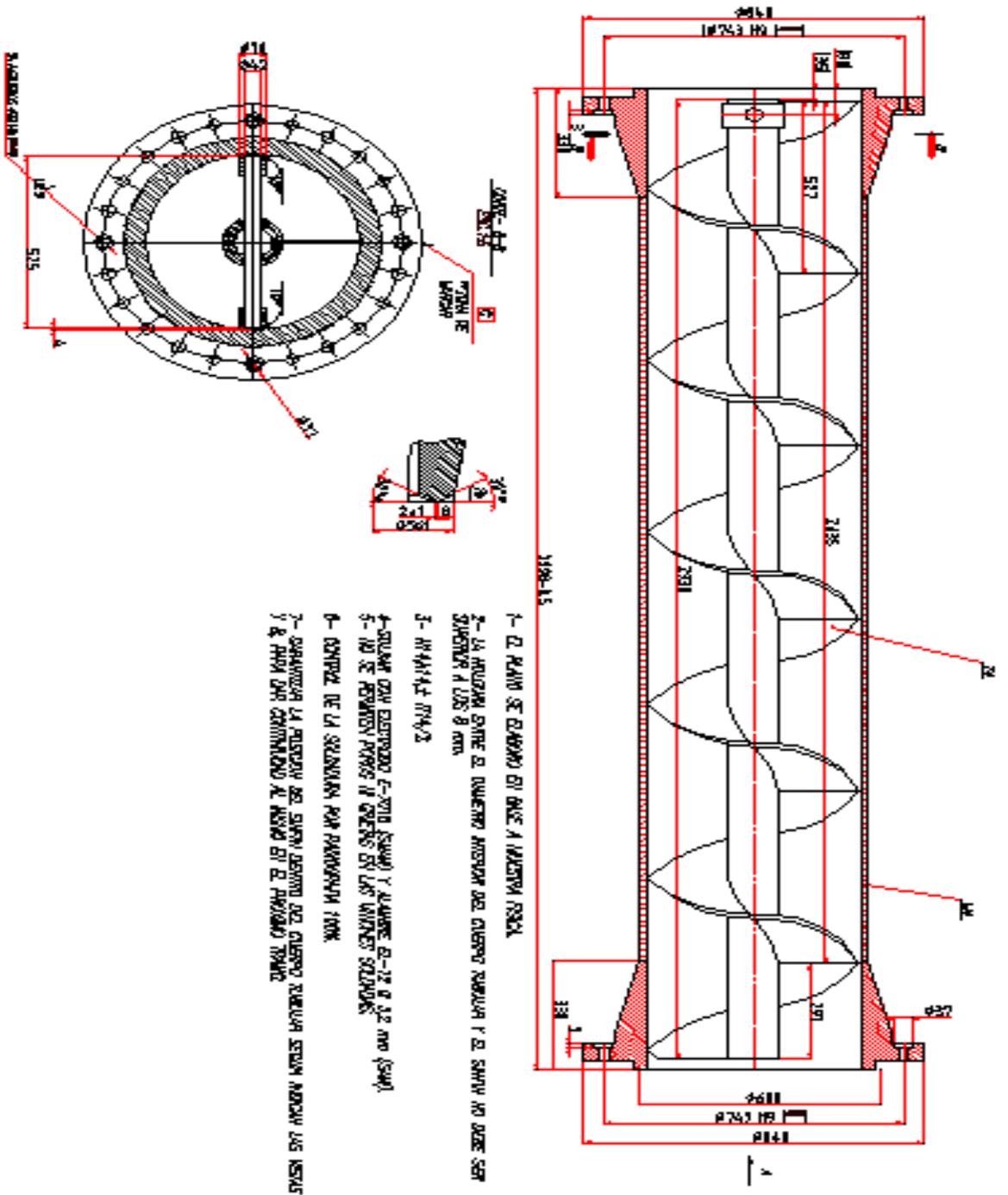


Figura 3.21 Deformación en la unión brida – tubo sometida a torsión

En esta se representa la deformación que ocurre en la unión brida – tubo, cuando la pieza se somete al mayor esfuerzo de trabajo; obteniéndose un valor máximo de deformación de $7.796 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$ y un valor mínimo de $9.577 \cdot 10^{-10} \text{ N/m}^2$. Por lo que se llega a la conclusión de que el torque aplicado no afecta la zona soldada.

ANEXO 3



- 1- EL PAÑO SE ENLACE EN UNO A MAYOR RIGID.
- 2- LA HUELA ENTE EL CUERPO INTERIO DEL CUERPO TUBULAR Y EL SOTTO NO DEBE SER SUPERIOR A LOS 8 mm.
- 3- IN 44142 704/2
- 4- SOLAR CON ELECTRODO E-7018 (EQUIV) Y ALAMBRE E-70 0.12 mm (304).
- 5- NO SE PERMITEN PUNOS NI CORTES EN LOS WIREDS SOLDADOS.
- 6- CONTROL DE LA SOLDADURA POR PENETRACION 100%.
- 7- GARANTIZAR LA RESISTENCIA DEL SOTTO DEBIDO DEL CUERPO TUBULAR SEGUIA MENCION LAS NESTAS Y EL PAÑO DEBEN CONTINUAR AL NIVEL DE EL PANGADO TUBAR.