



**REPÚBLICA DE CUBA
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
INGENIERIA MECÁNICA**

Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico

**Título: Caracterización de la unión soldada disímil AISI 321
laminado y HK 40 empleado en la línea de tubería del
transportador Jacoby.**

Autor: Rolando Rivera Rivera

Tutores: Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié
Ing. Reilis Fuentes Guilartes

Año 56 de la Revolución
Moa - 2014



Declaración de Autoridad.

Yo: Rolando Rivera Rivera

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

Rolando Rivera Rivera

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

Ing. Reilis Fuentes Guilarte



Agradecimientos:

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el Dr. C. Tomás Heraldó Fernández Columbié y el Ing. Reilis Fuentes Guilartes.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

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

A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A todos

Muchas Gracias.



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

A mi madre: Oneida Rivera Rivera.

A mi padre: Rolando Rivera Camacho.

***A mis hermanas: Yisleni Rivera Rivera y
Yoania Rivera Rivera.***

A mis amigos.

***A nuestra revolución, por las posibilidades
que me ofrece.***

RESUMEN

En el trabajo se realiza un análisis del comportamiento de la soldadura en los tramos del transportador de mineral laterítico del tipo Jacoby en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, la cual está realizada con acero laminado AISI 321 y la aleación HK – 40 obtenida por proceso de fundición. Para ello se prepararon probetas de dimensiones de 440 x 145 x 12 mm, las cuales se soldaron por proceso de soldadura manual por arco eléctrico, con electrodos según la AWS E 309 I – 16 y E 312 – 16 de diámetros 3,2 y 4 mm respectivamente, sobre ellas se realizaron ensayos no destructivos en la zona fundida y la zona de influencia térmica (inspección visual, líquido penetrante y radiografía) determinando la calidad que presentan las mismas luego del proceso de soldeo. Por último se realiza la valoración económica, así como las incidencias de estos procesos sobre el medio ambiente.

ABSTRACT

In the work it is carried out an analysis of the behavior of the welding in the tracts of the transporter of mineral laterítico of the type Jacoby in the Company Major Ernesto Che Guevara. The cracking is analyzed which they are subjected the tracts that unite to the transporter, for it will be made it analysis with optic microscopy, mensuration of hardness (HV) and ghasly rehearsal, with which is sought to characterize the behaviour of the cracks, which can be cold or warm keeping in mind the process of operacionalidad of the team or the welding process with which he/she is carried out the union of each one of the tracts.



CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	5
1.2. Reseña histórica de los aceros inoxidables	5
1.2.1. Generalidades de los aceros inoxidables	6
1.2.2. Característica de los aceros inoxidables	7
1.2.3. Aceros inoxidables austenítico	7
1.2.4. Acero inoxidable de la serie AISI 321	8
1.3. Aceros inoxidables fundidos	8
1.3.1. Acero inoxidable de la serie HK - 40	9
1.4. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura	10
1.5. Transformaciones físico - químicas y estructurales en la unión soldada	10
1.5.1. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)	11
1.5.2. Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)	13
1.6. Propiedades del material según los elementos de aleación	14
1.7. Agrietamiento en uniones soldadas	15
1.7.1 Agrietamiento en caliente de aceros inoxidables	16
1.8. Tensiones residuales y distorsión	18
1.8.1 Método de diagnóstico de las tensiones residuales	20
1.9. Métodos de control no destructivo	20
1.9.1. Ensayos con líquidos penetrantes	22
1.9.2. Ensayos con Ultrasonido (UT)	23
1.9.3. Inspección por radiografía (RT)	23
1.10. Conclusiones del capítulo 1	25
CAPÍTULO. 2 MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	26
2.2. Composición química de la aleación AISI 321	26
2.2.1. Composición química del acero HK – 40	26
2.3. Diseño de experimento	27



2.3.1. Métodos empleados para soldar las probetas	27
2.4. Metales de aporte empleados	29
2.4.1. Características del electrodo E 312 – 16	29
2.4.2. Características del electrodo E 309L – 16	29
2.5. Diagrama de Schaeffler	30
2.6. Preparación metalográfica de las probetas	32
2.6.1 Fundido de las probetas de HK – 40	32
2.6.2. Tratamiento térmico a la probeta	32
2.6.3. Corte y desbaste	32
2.6.4. Preparación de la probeta de acero AISI 321	32
2.7. Parámetros de soldadura	33
2.7.1. Determinación del voltaje del arco eléctrico	33
2.7.2. Cálculo de aporte térmico	34
2.8. Realización de los ensayos no destructivos	34
2.8.1. Ejecución de los ensayos de inspección visual	35
2.8.2. Ejecución del ensayo de líquido penetrante	35
2.8.3. Ejecución del ensayo de ultrasonido	38
2.8.4. Ejecución del ensayo de rayos X	39
2.9. Conclusiones del capítulo 2	42
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
3.1. Introducción	43
3.2. Análisis de la composición química del depósito	43
3.2.1. Análisis del depósito del electrodo E 309L-16	44
3.2.2. Análisis del depósito del electrodo AWS E312-16	45
3.3. Resultados de los ensayos de inspección visual (VT)	46
3.4. Resultados del ensayo por el método de líquido penetrante	47
3.5. Resultados de los ensayos por el método de ultrasonido	47
3.6. Resultado de los ensayos radiográficos	48
3.7. Valoración económica	51
3.7.1. Gasto de Energía consumida en la fabricación de un tramo	52
3.7.2. Precios establecido para la fabricación total de un tramo	53



3.8. Análisis del impacto ambiental.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

Conclusiones Generales

Recomendaciones

Referencias Bibliográficas

Anexos

INTRODUCCIÓN

El níquel, después del manganeso, es el metal más usado en ferroaleaciones, pero también tiene numerosas aplicaciones. Proporciona a las aleaciones dureza, tenacidad, ligereza, cualidades anticorrosivas, térmicas y eléctricas.

Se emplea principalmente en aleaciones al níquel y otras, tales como: latones, bronce al níquel, y aleaciones con cobre. Su empleo también está muy extendido en la acuñación de monedas y niquelado. En ocasiones para el comercio del níquel puro se integra en forma de lingotes, municiones y polvo, así como en forma de óxido conteniendo de 75 a 90 % de níquel.

Hoy en día, la producción mundial de níquel procede principalmente de Rusia, Indonesia, Canadá, Nueva Caledonia, Australia, Las Filipinas, Brasil, China y Cuba. Esta se aproxima a 1, 500,000 toneladas anuales, las cuales el 40 % se originan de depósitos lateríticos y la tasa de crecimiento es de 4 %.

La Industria Cubana del Níquel con más 60 años de creada, se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, con ello equipos y aparatos para su desarrollo, lo que permitirá ir incrementando su papel en la economía nacional.

La Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” fue construida entre los años 1973 y 1985 como fruto de la colaboración bilateral entre los gobiernos de Cuba y la antigua Unión Soviética. Con la finalidad de producir concentrado de níquel y cobalto. Actualmente la producción de níquel y cobalto constituye unas de las mayores posibilidades para el desarrollo de la economía cubana, ya que su precio cobra gran auge en el mercado internacional.

Dentro de los equipos empleados en el proceso de producción de la empresa se encuentran los transportadores de mineral, específicamente el de tornillo sinfín, el cual transporta el mineral por un canalón por la acción de una espiral.

Bajo estas condiciones de operación ellos requieren de propiedades especiales extremas que permitan mantener un comportamiento estable y prolongado en el tiempo. Desde la puesta en marcha de la empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara”, los tramos del transportador se diseñaron para fabricarlos con acero estructural (GOST20K) pero, debido al frecuente agrietamiento y fractura en los tramos I y V, a partir de 1996 ese acero se sustituyó por el inoxidable austenítico AISI 321 en el tubo y el termorresistente HK-40 en la brida y se le colocó un refuerzo exterior de 12 mm. En los demás tramos no se manifiesta el fenómeno de la rotura repentina; por lo que no se introdujo ninguna modificación en la forma constructiva y tipo de material.

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

La **Situación Problemática** la constituye:

El tramo cinco del transportador que esta formado por un tubo, unido en sus extremos o puntas por bridas en formas cónicas, esta unión se realiza a través de cordones de soldadura. En los últimos tiempos la planta de hornos de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara se ha visto afectada por las numerosas roturas de dicho tramo, principalmente por la zona soldada en el tramo cinco, el cual presenta roturas con mayor frecuencia, estas roturas están relacionadas con el agrietamiento progresivo de los cordones de soldadura en toda la longitud del mismo.

El **Problema** a investigar lo constituye:

La no existencia de una clara información sobre los ensayos no destructivos en el desarrollo de las grietas en la zona de influencia térmica y la zona fundida del cordón de soldadura realizado por proceso de arco eléctrico con electrodo revestido que une el tramo del transportador de mineral laterítico del tipo Jacoby.

Hipótesis:

La selección adecuada de los ciclos térmicos para realizar la unión soldada con electrodos revestidos del tipo E-309L 16 y E-312 en acero AISI 321 laminado y el acero HK 40, así como una correcta preparación de bordes, permitirá minimizar el efecto del agrietamiento en los cordones de soldadura en los tramos del transportador Jacoby.

Como **objeto de estudio**: Unión soldada en acero AISI 321 laminado y el acero HK 40, empleado en la línea de tubería del transportador Jacoby.

Como **Campo de acción** se establece:

Defectos macroscópicos y microscópicos de la unión soldada disímil AISI 321 laminado y HK 40 empleado en la línea de tubería del transportador Jacoby .

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

Caracterizar a través de ensayos macroscópicos y microscópicos la unión soldada disímil AISI 321 laminado y HK 40 empleado en la línea de tubería del transportador Yacoby cuando se realiza con soldadura manual por arco eléctrico y con electrodo revestidos del tipo E-309L - 16 y E-312 - 16.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Establecer el comportamiento de la unión soldada disímil de las aleaciones AISI 321 y HK – 40 luego de un proceso manual por arco eléctrico y el empleo de electrodos revestidos E-309L 16 y E-312 16.
2. Caracterizar los defectos macroscópicos y microscópicos que ocurren en la unión de soldadura disímil de las aleaciones AISI 321 y HK – 40 luego de realizado el proceso de soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos.
3. Fundamentación de los cambios macroscópicos y microscópicos luego de realizados los ensayos no destructivos en la zona fundida de la unión de soldadura disímil de las aleaciones AISI 321 y HK – 40 luego de realizado el proceso de soldadura manual por arco eléctrico.

Tareas

1. Establecimiento del estado de la sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Caracterización de los materiales empleados en la fabricación de los tramos del transportador sinfín de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
3. Realización del diseño experimental.
4. Análisis de los resultados y caracterización de los defectos obtenidos en la zona fundida de la unión disímil luego del proceso de soldadura con electrodos revestidos.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de soldadura.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

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

El tipo de falla se establece mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos iniciales disponibles con las condiciones de operación del componente respecto a las cargas actuantes. En este caso, se requiere de un análisis más completo, ya que las temperaturas y el tiempo afectan la durabilidad de los mismos bajo la acción de los esfuerzos. Sin embargo la realización de ensayos no destructivos permitirá realizar un análisis por el cual tienen lugar las fracturas en las uniones soldadas.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar una búsqueda de la información existente que permita definir el estado en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2. Reseña histórica de los aceros inoxidables

En 1865 ya se hacían, aunque en cantidades muy limitadas, aceros con 25 y 35 % de níquel que resistían muy bien la acción de la humedad del aire y en general, del medio ambiente; pero se trataba de fabricaciones en muy pequeña escala que nunca se continuaron. En esa época no se llegó a estudiar ni a conocer bien esta clase de aceros. En 1872 Woods y Clark fabricaron aceros con 5 % de cromo que tenían también mayor resistencia a la corrosión que los hierros ordinarios de esa época.

En 1904 - 1910, Guillet y Portevin, en Francia, realizaron numerosos estudios sobre aceros aleados con cromo y níquel, determinando microestructuras y tratamientos de muchos de ellos. Llegaron a fabricar aceros muy similares a los típicos aceros inoxidables que se usan en la actualidad, pero hasta entonces nunca le dieron especial atención a la inoxidabilidad.

El desarrollo original de lo que son actualmente los aceros inoxidables aconteció en los albores de la primera guerra mundial. En forma independiente y casi simultánea, en

Inglaterra y Alemania se descubrieron los aceros inoxidables tal como los conocemos ahora. El metalúrgico inglés Harry Brearly investigando cómo mejorar una aleación para proteger los cilindros de los cañones, encontró que agregando cromo a los aceros de bajo carbono, se obtenía aceros resistentes a las manchas (stainless) o resistentes a la oxidación.

Los doctores Strauss y Maurer, de Alemania, en 1912 patentaron dos grupos de aceros inoxidables al cromo - níquel de bajo contenido de carbono; uno de éstos, con la denominación 18 - 8, ha sido utilizado desde entonces en numerosas aplicaciones.

Las propiedades y composiciones de los aceros inoxidables se mantuvieron en secreto por los países beligerantes mientras duró la primera guerra mundial. Posteriormente, a partir de las pocas aleaciones experimentadas en 1920 y de un limitado número de grados comercialmente disponibles en 1930, la familia de los aceros inoxidables ha crecido en forma impresionante. En la actualidad se cuenta con un gran número de tipos y grados de acero inoxidable en diversas presentaciones, y con una gran variedad de acabados, dimensiones, y tratamientos.

1.2.1. Generalidades de los aceros inoxidables

Se denominan aceros inoxidables a aquellas aleaciones que contienen un mínimo de 10,5 - 11 % de cromo. Los aceros inoxidables o resistentes a la corrosión, adquieren esta propiedad a través de la formación de una capa superficial invisible y muy adherente de un óxido muy rico en cromo, llamada película de pasivación, que se forma y recompone espontáneamente en la presencia de oxígeno. Esta capa es continua, adherente, no porosa, insoluble, y autorreconstituible en la presencia de oxígeno cuando es deteriorada.

La pasividad se forma bajo un rango de condiciones dependiendo de las características del ambiente circundante, pero la presencia de oxígeno es fundamental en todos los casos. En general, la resistencia a la corrosión de un acero inoxidable es máxima cuando la superficie del acero está lo suficientemente aireada o expuesta y libre de cualquier tipo de depósitos. Cuando el contenido de cromo se eleva a 17 – 20 %, típico de los aceros inoxidables austeníticos; o entre 26 – 29 % de cromo, típico de los más recientes desarrollados superferríticos, la estabilidad de la capa de pasivación aumenta notoriamente.

No obstante, el mayor contenido de cromo en el acero puede afectar adversamente las propiedades mecánicas, la fabricabilidad, la soldabilidad. Por lo tanto, es más eficiente mejorar la resistencia a la corrosión agregando o incrementando el contenido de otros aleantes en el acero con o sin ningún incremento de cromo (Beddoes y Pardo, 1999).

1.2.2. Característica de los aceros inoxidable

Su principal característica es su alta resistencia a la corrosión. Esta resistencia es debido a la formación espontánea de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero. Aunque es extremadamente fina, esta película invisible está firmemente adherida al metal y es extremadamente protectora en una amplia gama de medios corrosivos. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno y así evita daños por abrasión, corte o mecanizados.

Para aumentar la resistencia a la corrosión el cromo puede aumentarse y pueden añadirse otros elementos tales como níquel o molibdeno. El grado de impenetrabilidad de la capa de óxido en ciertos ambientes depende no sólo de la composición de la aleación, sino también en el medio específico, de la temperatura de éste y de la concentración del agente corrosivo.

1.2.3. Aceros inoxidable austenítico

Austenítico: constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series 300 AISI (aleaciones cromo - níquel) y 200 AISI (Aleaciones cromo - manganeso nitrógeno). Tienen excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Su configuración metalográfica es austenítica. Esta estructura cristalina es cúbica centrada en las caras (fcc). Esta familia de aceros se obtiene adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno.

El cromo proporciona una resistencia a la oxidación y a la corrosión hasta temperaturas aproximadas de 650 °C en una variedad de ambientes. El níquel y en menor extensión el manganeso, se adiciona a estos aceros para estabilizar la fase austenítica en un amplio rango de temperaturas y evitar así su transformación en martensita cuando son enfriados rápidamente a temperatura ambiente.

Los aceros inoxidable austeníticos son esencialmente aleaciones ternarias de Fe, Cr y Ni, que contienen de un 16 hasta un 25 % de Cr y de un 7 a un 20 % de Ni, estas aleaciones son llamadas austeníticas debido a que su estructura permanece

austenítica, (FCC, Fe - γ) a temperatura ambiente. La mayor parte de estos aceros contienen de un 0,06 a 0,1 % de C. Cabe señalar que algo del Ni de esta aleación puede ser reemplazado por Mn sin alterar la estructura austenítica del acero.

De los numerosos tipos de aceros austeníticos mencionados, en este trabajo haremos referencia al acero inoxidable AISI 321 por sus valiosas propiedades y es el empleado en numerosos equipos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, entre ellos: los tramos del Transportador de Mineral (Yacoby) utilizado en el proceso de secado de mineral.

1.2.4. Acero inoxidable de la serie AISI 321

El acero inoxidable AISI 321 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal de base significa que la zona soldada permanece caliente por más tiempo, resultado de lo cual puede ser una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor.

Contiene una adición de titanio equivalente a cinco veces el contenido de carbono; el titanio es adicionado para evitar precipitar el carburo de cromo durante la soldadura o exposición a altas temperaturas. La máxima estabilización se consigue con un recocido en el rango de 900 a 1000 °C. Frecuentemente es seleccionado en la fabricación de recipientes o estructuras que usan placas de más de ¼” (6,25 mm) de espesor donde el recocido no es práctico. Además ofrece como ventaja principal una resistencia a la corrosión intergranular. Este tipo es principalmente usado en el rango de temperaturas de 400 a 800°C (Peckner, 1994).

1.3. Aceros inoxidables fundidos

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

Plantea De Meyer et al. (2001). Que del total de la producción mundial de aceros inoxidables, el 52 % pertenece a los aceros austeníticos inoxidables al cromo - níquel, la selección de estos materiales para aplicaciones que implican resistencia a la corrosión a altas temperaturas requiere de un conocimiento profundo sobre los

mecanismos y la cinética de la formación de capas superficiales, su composición química, estructura, mecanismos de difusión. Todos estos factores y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas permiten la adecuación del acero para usos específicos.

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

Otro acercamiento al conocimiento de las características de los aceros de la serie H después de ensayos de fluencia lo proporciona Davis (1997), al mostrar micrografías de aceros austeníticos fundidos del tipo HK - 40 después de ensayos con tiempos de rotura de hasta 1 000 horas. En este caso, sólo se reporta la presencia de fases sigma en la aleación HH sin profundizar en otras cuestiones esenciales como la estequiometría, composición y el mecanismo de precipitación, entre otras.

1.3.1. Acero inoxidable de la serie HK - 40

La aleación inoxidable austenítica ACI HK - 40, de producción nacional, tienen amplia aplicación en la industria minero metalúrgica de Cuba en la fabricación de componentes (tramos de ejes centrales, de brazos agitadores y de dientes rascadores) para hornos de reducción del mineral laterítico, donde se requiere una atmósfera totalmente reductora con alto contenido de CO, CO₂ y nitrógeno. La aleación se somete a tratamientos isotérmicos de carburización y de nitruración.

Es conocido que a las temperaturas en que normalmente operan los hornos (650 – 850 °C en ocasiones, hasta 1 000 °C) puede ocurrir la disociación del carbono y el nitrógeno presente en los gases.

Es importante destacar que el cromo, el níquel y el silicio son elementos que desempeñan un papel importante en la reducción de los valores de las profundidades

de capas durante la carburización. La efectividad del cromo es válida para cantidades no menores del 20 % del contenido de aleación (Tjoro et al., 1991). Al aumentar el contenido de níquel se reducen los valores de la carburización, y alcanza el valor óptimo para la relación Fe/Ni₄. Cuando la cantidad de silicio aumenta, los valores de la carburización disminuyen debido a que la presencia de elementos disueltos (Ni y Si) es mayor y, por consiguiente, existen menos espacios vacantes en la matriz austenítica que faciliten la disolución del carbono.

1.4. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura

Según Rodríguez (1983); González (1978); García (1983), la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico), también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono.

El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuanto varían las propiedades del metal al soldar bajo determinadas condiciones. Por ejemplo es posible establecer cuanto varían la resistencia, plasticidad, resiliencia y otras debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad en aceros es la ausencia de grietas (Beckert, 1985).

1.5. Transformaciones físico - químicas y estructurales en 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), y Easterling, (1992), las pérdidas por oxidación de los elementos útiles como el carbono en los aceros, el silicio en las fundiciones, modifican las características mecánicas. Así mismo, la fijación de un tanto por ciento exagerado de carbono, de fósforo o de azufre, así como la absorción de oxígeno y nitrógeno, producen una pérdida en las cualidades de la unión. Por el contrario, el aporte voluntario por micrometalurgia de ciertos elementos especiales conduce a una mejora de las características mecánicas o químicas.

La pérdida de elementos por oxidación (Stout y Doty, 1971) son fenómenos bien conocidos por los metalúrgicos; en soldadura, se complican por la presencia de una atmósfera que rodea al metal fundido y cuya naturaleza depende del tipo de protección

del arco y del baño fundido (tipo de gases de protección, fundentes o de la composición del revestimiento del electrodo). En el caso de los aceros, sabemos que estas pérdidas son en general consecuencia de la reducción del óxido de hierro por los elementos componentes del acero.

1.5.1. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)

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

En la soldadura por arco (Lippold y Kotecki, 2005), la zona de crecimiento de los granos, está más localizada y sus dimensiones pasan por un máximo, en una zona muy próxima a los bordes, disminuyendo bruscamente en las capas próximas al bisel. Este aspecto de la curva se debe al normalizado que provoca en el metal base las sucesivas pasadas del depósito por arco.

Estos cambios de estructura generalmente están ligados a cambios en las propiedades del metal en esta zona debido al tratamiento térmico a que está sometida la misma. Según sea la potencia térmica aplicada en la zona fundida, así variará la zona influencia térmica (ZIT) en el metal base (figura 1.1), donde ocurrirán 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

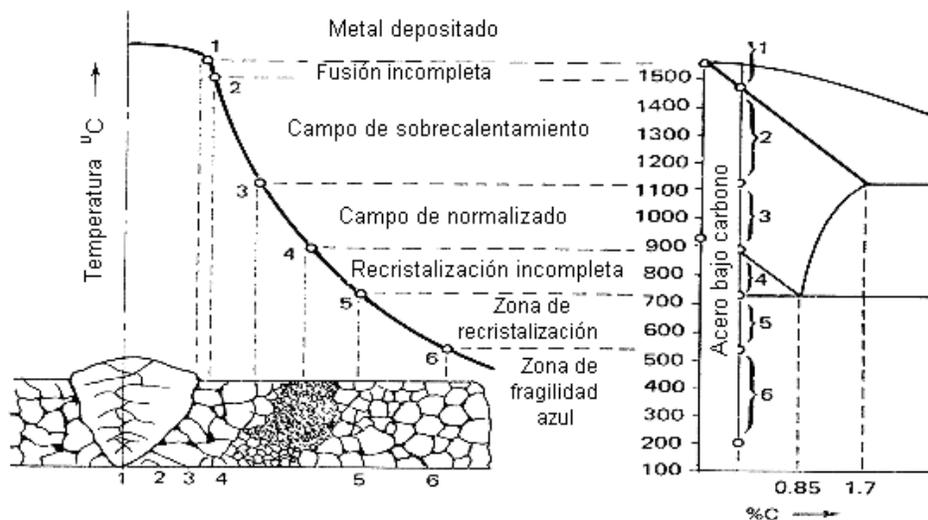


Figura 1.1. Zonas que se presentan en la ZIT durante la soldadura de los aceros al carbono y de baja aleación, según el diagrama Fe – C. (Fuente Zuñiga, 1983).

Los autores Glizmanenko (1965); Bakker y Horestreydt (1968); Rodríguez (1983) y la ANSI/AWS D1.1-96 (1996A) coinciden en afirmar que a partir de las modificaciones

estructurales y físico – química en el metal base, se realiza una clasificación de las diferentes zonas del cordón de soldadura, lo que permite determinar los cambios en la estructura de la zona de Influencia Térmica (ZIT).

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 (1 100 y 1 500 °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.

En los trabajos de Alisten y Tall (1970); García y Burgos (2003), se pudo contactar que los mismos afirman que generalmente el tamaño de los granos formados durante el proceso de soldadura se conserva a temperatura ambiente. Esto significa que las propiedades mecánicas en la zona cercana a la unión no serán uniformes. Los granos grandes producen baja dureza, y los granos pequeños proporcionan mayor dureza a un acero, la dureza es directamente proporcional al esfuerzo último, e inversamente proporcional a la ductilidad.

Por tanto, la zona con granos grandes tendrá poca resistencia a la tensión y elevada ductilidad, mientras que la zona con granos pequeños tendrá elevada resistencia a la tensión y al mismo tiempo elevada fragilidad. Dependiendo de la aplicación de la unión, esta variación en las propiedades mecánicas puede generar problemas de fallas en la soldadura.

1.5.2. Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)

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

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

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

1.6. Propiedades del material según los elementos de aleación

Los componentes químicos confieren diversas cualidades físicas, químicas y mecánicas a los aceros mejorando sus cualidades, en dependencia del elemento y de su cantidad dentro de la aleación, o en detrimento de las mismas.

El carbono es el ingrediente fundamental en el acero, ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad.

El cromo origina la formación de diversos carburos de cromo que son muy duros; sin embargo, el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza, producido simplemente al incrementar su contenido de carbono. La adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura.

El níquel amplía el nivel crítico de temperatura, no forma carburos u óxidos. Esto aumenta la resistencia mecánica sin disminuir la ductilidad. El cromo se utiliza con frecuencia junto con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que aporta el cromo. En la deformación en frío aumenta la resistencia y conformabilidad del acero.

El manganeso se adiciona a todos los aceros como agente de desoxidación y desulfuración, pero si el contenido de manganeso es superior al 1 %, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso. Reduce el intervalo crítico de temperaturas.

El silicio eleva la resistencia, la elasticidad y la conductividad magnética del acero. Un elevado contenido de silicio en el acero dificulta la conformación del acero.

El molibdeno forma carburos y también se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad. El molibdeno baja sustancialmente el punto de transformación. Debido a esto, el molibdeno es de lo más eficaz para impartir propiedades deseables de templabilidad en aceite o en aire.

El azufre forma con el hierro combinaciones químicas, sulfuros de hierro, que hacen que el acero calentado al rojo sea quebradizo. Este elemento es perjudicial en el proceso de tratamiento térmico, el mismo se disuelve en el hierro, no obstante en el conformado en frío no hay elevadas temperaturas que provoquen una alteración en la formación de fase.

El fósforo se encuentra siempre disuelto en los granos de ferrita a los que comunica gran fragilidad. Es un elemento perjudicial porque reduce considerablemente la tenacidad y origina fragilidad en frío

1.7. Agrietamiento en uniones soldadas

La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación, durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente. Las grietas constituyen los defectos más peligrosos en las uniones soldadas y se pueden presentar tanto como defectos externos o internos (Weman, 2003).

Algunos autores Masubuchi (1980); Susuki *et al.* (1984); EL - Hebeary *et al.* (2004); Satoh *et al.* (1975), plantean que el fenómeno del agrietamiento en frío se conoce como agrietamiento retardado o agrietamiento por hidrógeno. Constituye un agrietamiento que se produce generalmente a temperaturas inferiores a los 930 °C inmediatamente después de culminada la soldadura, o luego de varias horas.

Según Hicks (1999) constituyen por su morfología roturas frágiles de poca abertura y poco ramificadas que se producen en la zona afectada por el calor (ZAC) o en el metal de la costura y se orientan transversal o paralelamente al eje de la misma. En general las grietas en frío pueden ser externas o internas por su ubicación. La grieta en frío más frecuente se produce en la zona afectada por el calor en la zona de sobrecalentamiento o de grano grueso. Este tipo de agrietamiento en general es característico de la soldadura de los aceros de medio y alto carbono y algunos aceros de baja aleación.

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

Microestructura endurecida sensible a la fisuración, conteniendo productos de transformación martensíticos y bainíticos.

Concentración localizada suficientemente alta de hidrógeno en términos del contenido de hidrógeno difusible de la soldadura (Maroef *et al.*, 2002; Gedeon y Eagar, 1990).

Esfuerzo elevado causado por la alta restricción estructural que es determinado por la rigidez del ensamble, es decir, espesores y altura del refuerzo del cordón de la soldadura.

La sensibilidad o susceptibilidad a la fractura inducida por hidrógeno de soldaduras se da por una combinación de estos tres factores primarios (Pekka, 2003; Gangloff, 2003; Pitrun, 2004). El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta tasa de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla concentrador de esfuerzos.

La ubicación de estas grietas (Blunt *et al.*, 2002), si se presentan en el metal de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas,

El hidrógeno se disuelve fácilmente en forma atómica hacia el baño de soldadura en estado líquido y a muy alta temperatura, y de aquí puede permanecer en la costura, pasar a la zona afectada por el calor (ZAC) o difundirse hacia la superficie y finalmente salir al medio (Giraldo y Chaves, 2004).

1.7.1. Agrietamiento en caliente de aceros inoxidables

Existe gran probabilidad de ocurrencia de grietas a elevadas temperaturas, en uniones soldadas de aceros inoxidables austeníticos (Radhakrishnan, 2000), para relaciones de Cr/Ni inferiores a 1,6.

Shankar (2003); Schindler (2007) refrieren la ocurrencia de agrietamiento en estos aceros en el proceso de solidificación, la que se produce predominantemente por la segregación de pequeñas cantidades de mezclas de fases secundarias, acompañadas de tensiones de contracción. Aunque el autor considera que la presencia de molibdeno en dichos aceros reduce considerablemente este efecto.

Hazarabedian *et al.* (2000) analizan el comportamiento a la fractura en el envejecimiento de un acero inoxidable con entalla y establecen la probabilidad de

rotura cuando hay presencia de éstas, aunque solo estudian aceros inoxidable dúplex y en ningún momento los someten a temperaturas superiores a 475 °C, por lo que no describen la conducta de estos a dichas temperaturas.

La fragilización en caliente por procesos de solidificación se presenta como una de las causas más comunes de las roturas en partes de hornos y elementos sometidos a elevadas temperaturas de servicio (Bailer-Jones *et al.* 1998; Otegui *et al.* 2001 y Avilés, 2007).

Estudios de fallas realizados de aceros austeníticos de las series 200 y 300 y HH (Mazorra *et al.* 1989; Powell *et al.* 1995; Million *et al.* 1997 y Janovec *et al.* 2003), revelan la precipitación de fases sigma bajo condiciones de operación en plantas petroquímicas, del cemento, hornos para tratamiento de metales y plantas metalúrgicas; pero solo refieren componentes de sección transversal rectangular y sin entallas tecnológicas. Zhang (1999) analiza este fenómeno en los aceros austeníticos AISI 304; 309 y 310 aunque estudia su comportamiento solo en el proceso de soldadura y no durante su trabajo prolongado a altas temperaturas.

Los efectos de fases endurecedoras sobre las propiedades mecánicas de los inoxidable austeníticos (serie 300); así como aleaciones HH fueron estudiados por Hiller (1991) y Velázquez *et al.* (2001) respectivamente, los que proponen modelos termodinámicos, bajo distintas condiciones, con energía de Gibbs de los compuestos individuales que aparecen, enfocándose a la solubilidad y precipitación de carburos y fases sigma en la austenita, aunque no tienen en cuenta el efecto de dichas fases en presencia de concentradores tecnológicos.

Los aceros austeníticos inoxidable resistentes a elevadas temperaturas se someten a un recocido de homogenización, donde los carburos precipitan de manera distribuida en todo el volumen de la pieza, esto garantiza una mayor resistencia mecánica y a la termofluencia (Sourmail, 2003; Castro, 2003; Kind y CO, 2008; AzoMaterial, 2009).

Para medir la susceptibilidad al agrietamiento laminar se han usado diferentes métodos y técnicas. Así, en John *et al.* (2008) se pueden encontrar:

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

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

1.8. Tensiones residuales y distorsión

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

Se denomina esfuerzos residuales ó internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico (James, 1996; Masubuchi, 1980). En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados (James y Buck, 1980 y Alfonso, 2002). La primera clase de esfuerzos residuales, denominados macroscópicos, son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material.

La segunda clase de esfuerzos residuales son denominados micro esfuerzos estructurales, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas. La tercera clase de esfuerzos residuales se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano. Los esfuerzos residuales son siempre consecuencias de deformaciones elásticas y plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica (Macherauch y Kloos, 1986).

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

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

Durante el proceso la situación se complica porque: 1) el calentamiento está muy localizado, 2) la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y 3) la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura con arco eléctrico) (Meriño, 1999). Durante este proceso (figura 1.2), la operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto.



Figura 1.2. Esquema del proceso de soldeo SMAW.

Como se puede observar en la figura 1.2, según avanza el electrodo (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.

1.8.1. Método de diagnóstico de las tensiones residuales

Los métodos de diagnóstico y control que se utilizan para inspeccionar y determinar si el material o cordones de soldaduras poseen algún defecto interno son:

- Control por ultrasonido
- Control por rayos x
- Control por partículas magnético

Estos métodos han tomado gran auge, fue aplicado por primera vez en la URSS por SOKOLOV en los años 1929 - 1930, según Piñero (1982). También la norma europea UNE - EN 10160 editada en el mes de marzo del 2000, avala el método para el examen por ultrasonido de las discontinuidades internas de los productos planos no recubiertos.

Los procesos de soldeo están presentes en nuestro entorno en cualquier tipo de construcción, ya sea de máquinas, de barcos, de trenes, aviones, de puentes, de coches, o en cualquier tipo de unión formado por diferentes piezas, subconjuntos, conjuntos. Las piezas y elementos soldados requieren de la verificación de cómo se elaboró el proceso de fabricación y también sirven para mantenimiento preventivo a nivel industrial, pues la presencia de grietas, nudos, escoria e imperfecciones puede causar la rotura de las piezas.

1.9. Métodos de control no destructivo

Los métodos de control no destructivos tienen la particularidad de brindar información acerca de la existencia de defectos en la soldadura sin ocasionar la rotura de esta.

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de non destructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades mecánicas, físicas, dimensionales o químicas. La recopilación de datos es menos exacta que en los ensayos destructivos a la hora de tomar la medición. Su propósito es detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas (Castillo, 2011).

Los materiales que se pueden inspeccionar son muy diversos, entre metálicos y no-metálicos, utilizados en procesos de fabricación como: laminados, fundidos, forjados y otras conformaciones. Los ensayos no destructivos suelen ser más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de la misma y el daño causado a la pieza a analizar, es imperceptible o nulo y buscan únicamente

verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ensayos destructivos Albares,(1999).

Según L Meller (1985) si comparamos, los métodos de los ensayos no destructivos, con los métodos de los ensayos destructivos, los ensayos no destructivos aplicados a un control de calidad estadístico, permiten comprobar con un cierto grado de seguridad el nivel de calidad de una producción.

Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como: ondas acústicas, elásticas, electromagnéticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada. La aplicación de los métodos de ensayos no destructivos en materiales se resume en tres grupos:

- **La metrología:** es el control de espesores, medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento, niveles de llenado.
- **La defectología:** nos permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales, determinación de tensiones, detección de fugas.
- **La caracterización:** es la evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales, propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencias de calor y trazado de isoterma.

Plantea M. Coehn(1895) que existen numerosos métodos no destructivos para llevar a cabo la inspección de una soldadura, los controles más comúnmente empleado en las industrias son los siguientes:

- a) Control visual
- b) Mediante líquidos penetrantes
- c) Ultrasonido
- d) Radiográfico

Consideran Michael Korchynsky y “Twenty Years Since Microalloying que entre las ventajas de estos métodos se encuentran: simple de usar en áreas donde otros métodos son impracticables y ayuda óptica que permiten mejorar el método. Dentro de las desventajas, se citan: fiabilidad dependiente de la habilidad y la experiencia del operario y requiere accesibilidad para visibilidad directa de la zona. Dentro de las

aplicaciones enumeran a la detección de daños superficiales, de discontinuidades o daños estructurales en todos los materiales.

1.9.1. Ensayos con líquidos penetrantes

Según J. M. Gray, A. J. De Ardo (1895) estos tipos de ensayos, consisten en la aplicación de un líquido sobre la superficie del cuerpo a examinar, que penetra por capilaridad en las imperfecciones de la soldadura. Una vez limpiado el exceso, nos revelará el que ha quedado retenido en la imperfección (poros, fisuras).

Existen dos tipos de líquidos penetrantes, los fluorescentes y los no fluorescentes, aunque los más utilizados son los no fluorescentes, por las siguientes características:

- a) Los líquidos penetrantes fluorescentes contienen un colorante que florece bajo la luz negra o ultravioleta.
- b) Contienen un colorante de alto contraste bajo luz blanca.

A pesar de presentar características disímiles (F.B. Pickering, 1975) ambos líquidos se aplican igual y se deben aplicar según los diferentes procedimientos: limpieza inicial de la pieza, la aplicación del líquido penetrante, medida del tiempo de penetración, eliminación del líquido sobrante, aplicación del líquido revelador, examen de la pieza.

El procedimiento de limpieza consiste en la eliminación de sustancias extrañas como grasas, óxidos, aceites, escorias, pinturas, para dicha limpieza se utilizan diferentes detergentes, disolventes, decapantes, se deja secar totalmente la pieza y se aplica el líquido penetrante, el cual debe penetrar orificios y aberturas muy pequeñas y estrechas y de difícil eliminación una vez dentro de la discontinuidad. Para eliminar el líquido sobrante se puede realizar de varias formas; por inmersión, por pulverización o por rociado de la pieza en un baño de líquido limpiador (Ariel Moreno-Gobbi, 2004).

Considera Angel. G (2007) luego de realizado el procedimiento anterior, se aplica el líquido revelador que es normalmente blanco, y debe aplicarse por inmersión, rociado o pulverizado, con mucho cuidado ya que son líquidos muy volátiles y que una vez aplicados, las zonas de la pieza que contengan restos de líquido penetrante, resaltarán a simple vista, siendo muy fácil su observación, donde deben aparecer marcadas de forma clara y exacta a lo largo de la pieza a examinar, la observación se hará para los líquidos fluorescentes bajo lámparas de mercurio o tubos de luz violeta y para los líquidos normales se hará bajo la luz natural apareciendo puntos rojos en las zonas con

imperfecciones. Como aspecto final hay que eliminar todo tipo de resto de líquidos, ya sean penetrantes o reveladores, limpiándolos con disolventes, detergentes.

1.9.2. Ensayos con Ultrasonido (UT)

El equipo utilizado para la aplicación de estas técnicas es capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas sujetas a las leyes de reflexión al encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Al ser captadas, son analizadas según el objetivo del equipamiento y con la determinación del tiempo transcurrido desde su emisión hasta su recepción, puede conocerse la distancia recorrida, al ser la velocidad previamente establecida Rafael Garcia (1999).

Según J G Peasis (2000) es un método en el cual un haz sónico de alta frecuencia (125 KHz a 20 MHz) es circulado en el material a ser inspeccionado con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales (fisuras, inclusiones). El sonido que recorre el material es reflejado por las interfaces y es detectado y analizado para determinar la presencia y localización de discontinuidades.

Las ventajas más notables de este método la constituyen su alta precisión, fácil de transportar, alta sensibilidad, rápido y fácil de operar, todo lo cual permite obtener resultados inmediatos, sin embargo sus desventajas radican en que se requieren patrones para ajustar el instrumento, de operadores entrenados, la utilización de corriente externa y que debe existir una orientación previa de la ubicación de la grieta para seleccionar el tipo de onda usada. Lo más notable del método es su aplicación, que con el mismo se pueden determinar las discontinuidades en la superficie y cerca de la superficie mediante técnicas de pulsos y ecos (Castillo J,2011)

1.9.3. Inspección por radiografía (RT)

La inspección por radiografía (rayos X), es un método de inspección no destructiva (Luis Béjar Gómez, 2001) que consiste en la absorción diferenciada de radiación penetrante por la pieza que está siendo inspeccionada. Esa variación en la cantidad de radiación absorbida, detectada mediante un medio, nos indicará, entre otras cosas, la existencia de una falla interna o defecto en el material.

La radiografía industrial es entonces usada para detectar variaciones de una región de un determinado material que presenta una diferencia en espesor o densidad

comparada con una región vecina (es un método capaz de detectar con buena sensibilidad defectos volumétricos) Castillo J (2011).

Se trata de una radiación electromagnética penetrante, con una longitud de onda menor que la luz visible, que produce un bombardeo en un blanco generalmente de wolframio, con electrones de alta velocidad.

Según Castillo J (2011) los defectos de los materiales como grietas, bolsas, inclusiones, de distintas densidades, absorben las radiaciones en distinta proporción que el material base, de forma que estas diferencias generan detalles de contraste claro-oscuro en la placa fotográfica colocada detrás de la pieza. Esto es lo que permite identificar defectos en la inspección de una soldadura por radiografía. Para facilitar la labor se usan colecciones de radiografías patrón, en las cuales los defectos están claramente identificados para unas condiciones dadas de tipo de material y tipo de soldadura.

1.10. Conclusiones del capítulo I

- Las bibliografías consultadas brindan una información acerca de los aceros austeníticos empleados en los transportadores Yacoby, sin embargo son escasas las referencias que abordan la aplicación de ensayos no destructivos en estos equipos, luego de ser sometido a procesos de soldadura.
- El proceso de soldadura manual por arco eléctrico y metal revestido permite la unión de aceros símiles y disímiles, sin embargo por el ciclo térmico al que está sometido el material base provoca afectaciones tanto en la zona fundida como en la zona afectada por el calor, generando discontinuidades.
- La elección de ensayos no destructivos para evaluar la calidad en uniones soldadas permiten garantizar mayor responsabilidad y prever cualquier pequeña variación en la tendencia al agrietamiento de cualquier unión soldada.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

En el mundo que vivimos, tan acelerado, la tecnología está haciendo que la productividad alcance niveles cada vez mayores. Hoy en día, las técnicas y procedimientos adecuados para soldar los aceros inoxidable están mejorando, se está desarrollando ya que permite depósitos de cordones, reduciendo el tiempo necesario para soldar, con un rendimiento mejor y uniforme. Para ofrecer una mayor seguridad se desarrollan numerosos ensayos no destructivos que permiten garantizar el funcionamiento con mayor efectividad de las uniones soldadas de los tramos Jacoby de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El objetivo del capítulo es establecer los métodos y procedimientos que serán efectuados a los experimentos relacionados con la soldadura de la unión disímil de acero AISI 321 y acero HK - 40.

2.2. Composición química de la aleación AISI 321

La composición química promedio de la aleación AISI 321 editada por Key to steel (2002), así como la designación establecida por la AISI – SAE; UNS; ASTM y la SAE. El promedio de las mediciones de composición se muestra en la tabla 2.1. Como se observa que la composición química del material está dentro del rango establecido para la aleación, la que se corresponde con el acero austenítico AISI 321 (DIN 1.4541), de acuerdo con las especificaciones de ASTM (Wegst, 1995).

Tabla 2.1. Composición química de las probetas de acero AISI 321.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	Ti%
0,05	0,38	1,3	0,02	0,02	9,82	17,34	0,27	0,33

Los reportes de composición química permitieron descartar la influencia de las posibles variaciones metalúrgicas de los elementos presentes en la aleación como causa probable de la rotura de la unión soldada.

2.2.1. Composición química del acero HK - 40

Las composiciones químicas correspondientes, fueron determinadas mediante un espectrómetro de emisión por plasma, marca Spectromax modelo X. La cual se realizó

en la empresa mecánica del níquel Gustavo Machín Goed de Beshe. En la tabla 2.2, se presentan los elementos componentes y los valores medios de las concentraciones para el acero HK - 40.

Tabla 2. 2. Composición química nominal de las probetas.

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %
0,35 – 0,45	1,75	1,5	0,040	0,040	23 - 27	0,50	19 -22

2.3. Diseño de experimento

Para el desarrollo del diseño de experimento se prepararon cuatro probetas de la aleación HK 40 y cuatro probetas de acero AISI 321, la unión se realizó a tope con preparación de los bordes a 30° , como se muestra en la figura 2.1, y una separación de 2 mm, para lograr una raíz con buenas condiciones.

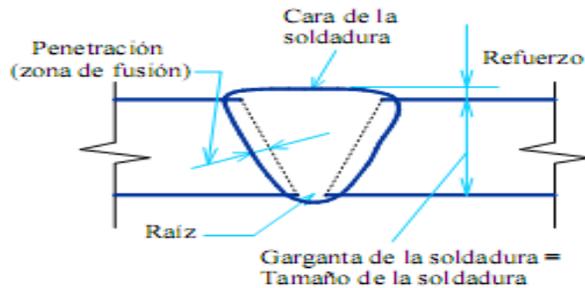


Figura 2.1. Preparación de la unión para la soldadura.

Las probetas se soldaron con dos tipos de electrodos del tipo AWS E 312 – 16 y AWS E 309 L - 16. Este diseño aparece en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Electrodo	Amp	Veloc (m/s)
1	E 312 - 16	95 - 100	0,007
2	E 312 - 16	95 - 100	0,007
3	E 309 L - 16	80 - 90	0,008
4	E 309 L - 16	80 - 100	0,008

2.3.1. Métodos empleados para soldar las probetas

Las probetas se prepararon empleando el método de soldadura SMAW, procediendo de la siguiente forma:

Se soldaron 4 probetas para ello se empleó el proceso SMAW utilizando los electrodos E - 309L - 16 y E - 312 - 16, los cuales tienen diámetro de 3,2 y 4 mm que serán empleados durante la unión soldada.

El método de ensayo consiste en soldar completamente la unión con proceso de arco eléctrico. A partir del método mostrado anteriormente, se prepararon 4 probetas, para cada tipo de electrodo, el objetivo es caracterizar el más apropiado, atendiendo a la selección de los diferentes electrodos se basa en buscar un material de aporte que pueda emplearse para dar solución a los problemas que puedan ocurrir en el cordón de soldadura por las condiciones de la unión disímil.

La preparación de las muestras para la soldadura se realizó según Norma ASTM E - 92.

Se utilizó la máquina de soldar Miller del modelo Mark - VIII multiplazas de 8 puertos. En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran la máquina con que se soldó las probetas.



Figura 2.2 Máquina Miller de 8 puertos



Figura 2.3 Máquina Miller de 8 puertos

Según el manual de operación del equipo, proporciona las siguientes características. Las mismas aparecen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características de la máquina Miller.

Alimentación primaria		230V monofásica - 60/60 Hz
Consumo primario de intensidad máxima		19A (TIG) - 29A (ARCO)
Voltaje en vacío		40 V
Gama de ajuste		5A a 200 A
Factor de Marcha (a 40 °C)	a 100 %	200 A
	a 60 %	150 A
	a 35 %	100 A
Diámetro de electrodo máximo		4 mm
Índice de Protección		IP23
Normas		EN 60974 - 1
Dimensiones (L x a x A)		420 x 175 x 300 mm
Masa		20 kg

2.4. Metales de aporte empleados

El electrodo consta de un revestimiento a base de sustancias químicas que cumple varias funciones y posee además un extremo no revestido que permite fijarlo en el porta electrodo.

2.4.1. Características del electrodo E 312 – 16

Electrodo especial de tipo inoxidable austenítico – ferrítico, con bajo coeficiente de dilatación y depósitos totalmente maquinables, esta aleación trabaja con amperajes mínimos con lo que se evita quemar la zona de unión obteniéndose soldaduras de altos valores mecánicos. Utiliza CA y CD PI. Las características sobresalientes que presenta es que está diseñado para resolver parte de los problemas que se presentan en la soldadura de aceros de alta y baja aleación, aceros fundidos e inoxidables de análisis químicos desconocidos, garantiza uniones de gran resistencia y altos valores mecánicos.

La composición química del metal depositado aparece en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Composición química del electrodo E – 312 - 16

Material	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Ni%	Cr %
E-312 - 16	0,11	1,25	0,02	0,02	0,70	9,2	29,5

2.4.2. Características del electrodo E 309L – 16

El electrodo 309L - 16 posee un revestimiento rutilico, lo que lo hace apto para soldar con CA o CC, electrodo positivo. Este electrodo se caracteriza por un arco estable de transferencia spray y cuyo depósito es de excelente forma y apariencia. La escoria se

desprende fácilmente, además de tener muy buena reanudación de arco por lo que se aconseja usarlo en soldaduras intermitentes. El depósito es de acero inoxidable austenítico. En la tabla 2.6 se ve reflejada la composición química del mismo.

Tabla 2.6 Composición química del electrodo E – 309L - 16

Material	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Ni%	Cr%
E-309L-16	0,03	1,0	0,02	0,02	0,50	13,5	23,0

2.5. Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler interrelaciona la composición química del metal base y del electrodo con la estructura metalográfica de los mismos, este diagrama es utilizado para determinar las condiciones de soldabilidad de los aceros inoxidables.

Campo de aplicación: relaciona la estructura del acero con la composición química total de este, teniendo en cuenta la influencia del resto de los elementos aleantes y agrupándolos en dos grupos, los que favorecen la formación de la fase austenítica (gammágenos, Ni, Mn, C) y los que favorecen la formación de la fase ferrítica (alfágenos, Cr, Mo).

En la figura 2.4 se muestra el diagrama de Schaeffler, el cual se empleará para determinar el porcentaje de ferrita, considerando el metal base y los diferentes tipos de electrodos empleados en la experimentación.

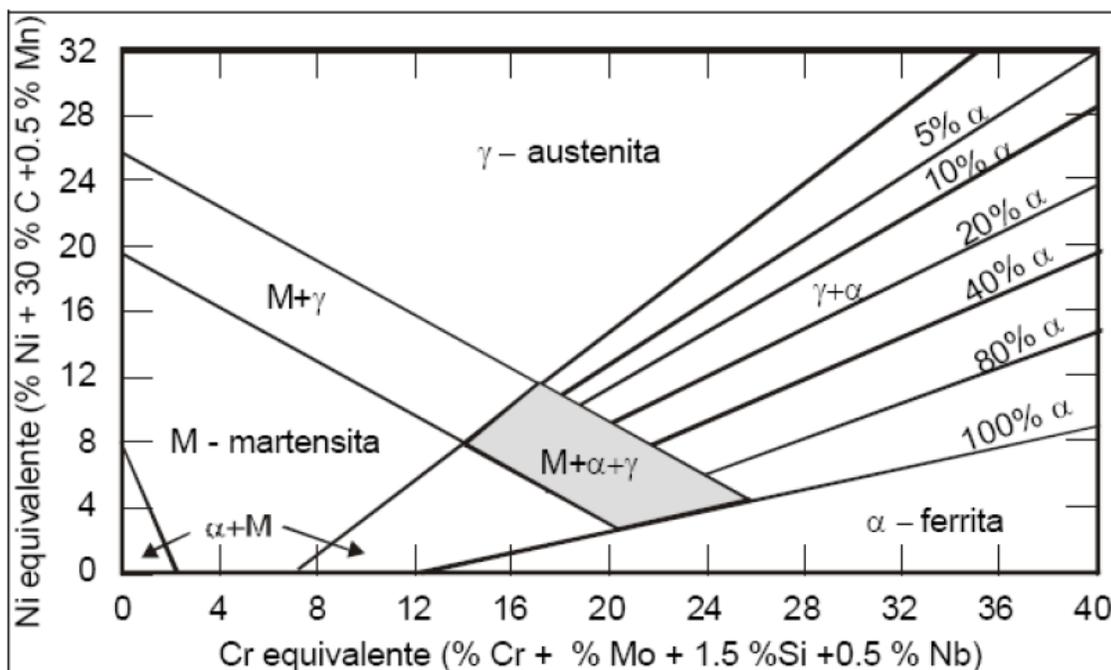


Figura 2.4 Diagrama de Schaeffler (Di Caprio, 1999)

Para determinar el porcentaje de ferrita se determina el cromo y el níquel equivalente, a partir de la composición química del metal base y el electrodo empleado, a través de las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$Creq = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \tag{2.1}$$

$$Nieq = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn \tag{2.2}$$

En la figura 2.5 se muestra el diagrama de Schaeffler con las zonas críticas que se obtienen durante la soldadura de los aceros inoxidable en correspondencia con el [Ni] y el [Cr].

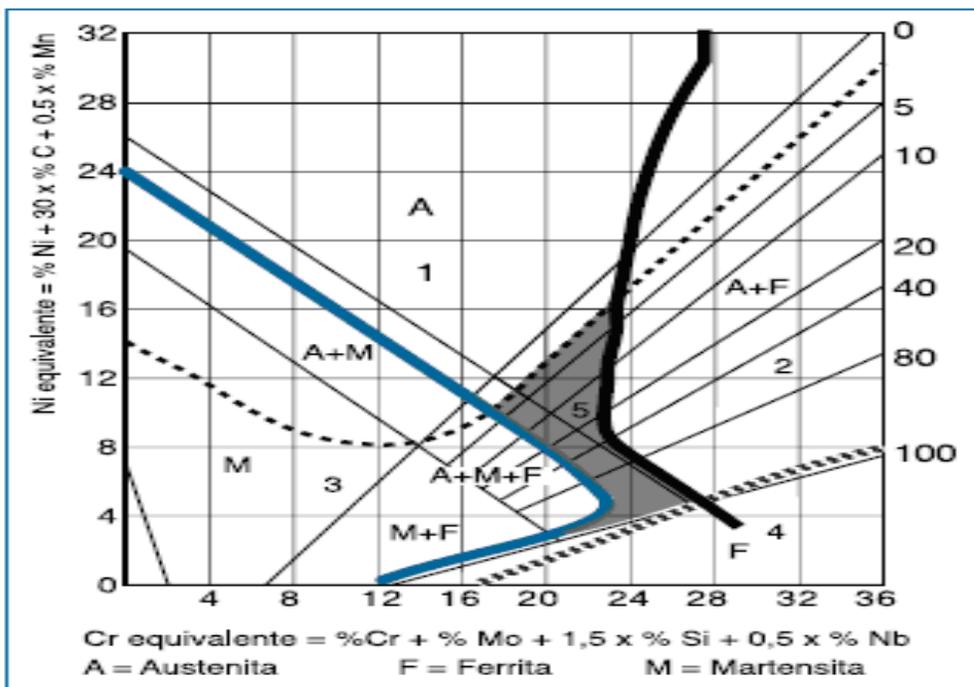


Figura 2.5. Zonas críticas según el diagrama de Schaeffler.

Leyenda:

- 1 - - - - - Fisuración en caliente por encima de 1 250 °C.
- 2 **—** Fragilidad por fase sigma entre 500 y 900 °C.
- 3 **—** Fisuración por temple por debajo de 400 °C.
- 4 **—** Crecimiento del grano por encima de 1 150 °C.
- 5 **—** Metal de soldadura óptimo respecto a solicitaciones mecánicas.

2.6. Preparación metalográfica de las probetas

Las probetas se prepararon teniendo en cuenta un conjunto de operaciones para lograr las condiciones requeridas y así tener óptimas condiciones de soldadura.

2.6.1 Fundido de las probetas de HK - 40

Las probetas de HK - 40 se fundieron en el horno de inducción del taller 08 de la UEB Fundición en una sola colada con los requisitos correspondientes que permitió elaborar una tecnología donde se tuvo en cuenta los cálculos de la composición química para poder obtener una referencia de la cantidad de material empleado en la colada (Ver anexo 1).

Las probetas de acero HK - 40 con una dimensión inicial de 450 x 150 x 20 mm, largo, ancho y espesor respectivamente fueron sometidas a un tratamiento térmico autenizado para el alivio de tensiones y lograr una mejor maquinabilidad.

2.6.2. Tratamiento térmico a la probeta

El acero HK - 40 se sometió a un autenizado en el horno CW M-6,6/M1T4 del taller de maquinado en el área de tratamiento térmico a una temperatura de 1 070 °C y estuvo con una permanencia en el horno de 0,5 h, se tuvieron en cuenta otros aspectos que se pueden ver en la carta tecnológica de tratamiento térmico. (Ver anexo 2).

2.6.3. Corte y desbaste

Las muestras para la soldadura con longitud, ancho, y espesor de 450 x 150 x 20 respectivamente (norma ASTM E3 – 95) se prepararon en una fresadora del tipo 6T 83 HS. Se elaboró una carta de ruta para maquinado que se realizó con una fresa de vástago marca P6 M5 de diámetro 20 mm y 8 dientes. Las probetas se elaboraron con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial, además para que no alterar la composición química de la misma (Ver anexo 3).

2.6.4. Preparación de la probeta de acero AISI 321

Las probetas de acero AISI 321 se cortaron en la cizalla de manivela de cuchilla inclinada para evitar el cambio de la estructura metalográfica de las probetas, ubicada en el área de preparación del taller 06 UEB construcciones metálicas la cual realiza

cortes con un máximo de espesor de 16 mm y una dimensión máxima de 2 000 mm. Las probetas tienen una dimensión de 440 mm de longitud, un ancho de 140 mm y con un espesor de 12 mm.

La preparadora de bordes presenta una longitud máxima de trabajo de 8 000 mm se realizaron los biseles con un ángulo de inclinación de 30° a lo largo de la probeta para una mejor unión al efectuarse la soldadura.

Para la ejecución de los dos procesos se elaboró una tecnología en el departamento tecnológico (Ver anexo 4).

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

2.7. Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura definidos para cada probeta fueron: corriente de soldadura (I_s), tensión de arco (U_a) y velocidad de soldadura (V_s). El diámetro de los electrodos con que se realizó el proceso de soldadura es de 4,0 mm y 3,2 mm con una longitud de 350 mm.

La intensidad de la corriente de soldadura depende del diámetro del electrodo, el cual se selecciona atendiendo: al espesor del material base, al tipo de construcción soldada, además del tipo de revestimiento y la posición del cordón en el espacio que influyen en la magnitud de la intensidad y según Quintero *et al.* (2006), se determina como:

$$I_s = 2,5d_e^2 + 35,5d_e - 18 \quad (2.3)$$

Donde:

I_s - intensidad de corriente de soldadura; A

d_e - diámetro del electrodo; mm

2.7.1. Determinación del voltaje del arco eléctrico

La tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón; influye notablemente en el refuerzo (forma cóncava o convexa del mismo), teniéndose soldaduras planas (con tensiones altas) y abultadas (con tensiones bajas), pero

siempre en el rango de tener un arco estable y según Rodríguez (1987) se determina como:

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 10 \quad (2.4)$$

Donde:

U_a - tensión del arco; V

2.7.2. Cálculo de aporte térmico

El aporte térmico para cada cordón fue calculado mediante las actuales exigencias de mejorar la productividad en la deposición de recargues fue necesario estudiar el efecto de parámetros de soldadura. Para ello se seleccionaron dos grupos relacionados con el aporte térmico. El calor aportado se calculó en base a la ecuación 2.4.

$$HI = \eta \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (2.5)$$

Donde:

Hi - aporte térmico, J/mm,

U_a - voltaje, V

I - intensidad de corriente, A,

V_s - velocidad de soldadura, mm/s

η - eficiencia del proceso de soldadura, %

2.8. Realización de los ensayos no destructivos

Los procedimientos se realizaron en el laboratorio de ensayos donde se prepararon las probetas para garantizar que la soldadura cumpla con las normas requeridas.

Las probetas que se utilizarán en los ensayos correspondiente para la determinación de los defectos en la soldadura son de dos materiales, las probetas de acero HK - 40 se fundieron en la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” en el taller 08 de la UEB Fundición correspondientes a las del transportador Yacoby perteneciente al

tramo cinco de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” por ser uno de los más afectados en la producción de níquel de nuestro país.

Las probetas de AISI 321 se tomaron del mismo material con que se fabrican los tubos del tramo cinco en el Combinado Mecánico del Níquel, las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente preparadas para poder realizar los ensayos, por lo que se propone desarrollar un conjunto de operaciones que permitan obtener la calidad de las probetas deseada. Las operaciones se resumen en la siguiente orden:

2.8.1. Ejecución de los ensayos de inspección visual

El método de inspección visual, se basó principalmente en el dimensionamiento de los cordones de soldadura, y la medición de algunas indicaciones como las escorias residuales después de efectuarse la soldadura, donde se utilizó la cinta métrica y la lupa. Esto se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6 Cordón de soldadura.

2.8.2. Ejecución del ensayo de líquido penetrante

El método de líquido penetrante establece requisitos necesarios para la detección de defectos superficiales por el método de líquidos penetrantes a uniones soldadas por fusión y piezas fundidas. Ejecución del ensayo: Este se realizó durante un ciclo de etapas para su mayor coordinación.

El limpiador penetrante y el revelador, fundamentalmente se especifica que estos tienen que proceder de un mismo fabricante, teniendo que cumplir con diversas propiedades físicas y químicas. Los productos utilizados son de la marca Ardrex. Ver figura 2.7.



Figura 2.7. Limpiador penetrante y revelador.

La superficie a ensayar se limpió 1 pulgada (25,4 mm) en la zona adyacente eliminando todo tipo de contaminantes como óxidos, aceites, grasas y pinturas entre otros que pueden interferir negativamente en el ensayo. La limpieza se realizó con spray limpiador solvente (figura 2.8), cepillo de alambre y unos paños limpios exentos de pelusillas, se esperó un tiempo no mayor de 10 min.



Figura 2.8. Espray limpiador

Esta operación se realizó aplicando el líquido penetrante (Ver figura 2.9) sobre la superficie a ensayar, mediante el método de rociado. Se tuvo en cuenta las condiciones de ventilación apropiadas y la distancia del mismo a la superficie para lograr una aplicación uniforme mediante el método de rociado. Para que el líquido pueda penetrar en los defectos (acción capilar) se verificó el tiempo en correspondencia con el espesor de la pieza a ensayar, el tiempo de penetración fue de 7 min.



Figura 2.9 Líquido penetrante

Con ayuda de paños se removió y secó la superficie de la pieza de manera que en la observación final haya suficiente contraste de las posibles indicaciones sobre el fondo limpio.

Se aplicó a una distancia de 30 cm y con un ángulo aproximado de 45° después de eliminar el exceso de líquido penetrante y de evaporarse el limpiador. Antes de aplicarse se agitó y se suspendió en un disolvente no acuoso, que se evaporará sobre la superficie de la pieza quedando una capa uniforme en una zona no menor de 10 mm adyacentes a la superficie ensayada.

El revelador se aplicó mediante aerosol teniendo en cuenta la ventilación del local y la misma marca del líquido penetrante. Según norma EN 571-1: 1997, el tiempo de revelado para los penetrantes coloreados, bajo luz natural o artificial con una iluminación mínima de 500 lx será de 10 a 30 minutos para obtener las posibles discontinuidades producidas (figura 2.10).



Figura 2.10 Líquido revelador

Se realizó una limpieza final cuando los residuos de los productos del ensayo, puedan interferir con los procesos posteriores o con los requisitos de servicios.

2.8.3. Ejecución del ensayo de ultrasonido

Se empleó un equipo ultrasónico de las siguientes características:

Marca	Modelo
Defectoscopio ultrasónico con pantalla de DLC	USN-52L

La presentación de los resultados será en tubo de rayos catódicos del tipo barrido. Se empleó como acoplante: Gel Echotrace que proporciona una buena transmisión de la onda ultrasónica.

El ensayo se realizó con un defectoscopio ultrasónico del tipo impulso-eco con representación de señales en el tubo de rayos catódicos. De acuerdo a la geometría y a los objetivos del ensayo se utilizó palpadores de incidencias normal con margen de 35° - 90° .

Los palpadores deben tener un área activa no mayor de 600 mm^2 y un rango de frecuencia de 1 - 6 MHz, se realizó con una velocidad de desplazamiento del palpador menor de 150 mm/seg. La frecuencia empleada debe ser elegida de acuerdo al material de ensayo, espesor del mismo, y tamaño mínimo del defecto que se desea detectar.

La superficie estaba libre de irregularidades y cascarillas para no entorpecer el desplazamiento del palpador e influir en la transmisión del haz ultrasónico. La figura 2.11 muestra el defectoscopio ultrasónico empleado para las mediciones.



Figura 2.11. Defectoscopio ultrasónico.

2.8.4. Ejecución del ensayo de rayos X

Se supervisó que todo el equipamiento utilizado este calibrado y verificado, en óptimas condiciones para su uso. La placa se colocó en dependencia de la geometría de las probetas soldada y las técnicas de exposición utilizadas según ASME Sección V. Artículo 2. En el control del procesado de las películas se tuvieron en cuenta la concentración de los químicos, temperatura y tiempo de permanencia en cada solución.

El local de revelado se hermetizó, de tal manera que no permita el paso de la luz blanca. La solución del fijador se comprobó de manera similar al revelador, con la diferencia de un tiempo de 3 min. Después de que la película radiográfica es expuesta a las radiaciones con los equipos presentados en las figuras 2.12 y 2.13.



Figura 2.12 Panel de control



Figura 2.13Tubo de rayos X

Se somete al tratamiento químico, luego de retirarle el papel de protección y la pantalla intensificadora de plomo, se tomaron las películas radiográficas únicamente por los bordes, introduciéndola en los percheros o portas películas en la tina de revelado, en la figura 2.14 se muestra la tina de revelado.



Figura 2.14. Tina de revelado.

En este proceso se agito durante 30 segundos y posteriormente cada 1 minuto por 5 segundos. A continuación se procede al lavado intermedio, en el mismo la película radiográfica se introdujo en agua limpia a una temperatura de 25 °C durante 2 ó 3 min.

Posteriormente se introduce en solución del fijador, la permanencia en este será el doble del tiempo que una película virgen tarda en tornarse transparente. En la figura 2.15 se muestra ejemplo de la radiografía ya revelada en el laboratorio.



Figura 2.15 Radiografía.

Después del lavado final se procede al secado de la película, se escurre durante unos segundos y con ayuda de un eliminador de humedad manual se retiran todas las gotas de agua. A continuación se introduce en el armario de secado automático donde se elimina toda la humedad. (Ver figura 2.16).



Figura 2.16. Armario revelador

Para realizar la revelación de cada una de las muestras analizadas, se empleó un megatoscopio, como se muestra en la figura 2.17, donde a través del mismo se determinará la calidad de las uniones soldadas.



Figura 2.17. Equipo para determinar la radiografía de las probetas soldadas

2.9. Conclusiones del capítulo

- ✚ Se fundamentaron las propiedades a investigar, definiendo los principales parámetros a medir y obtener de las muestras a través del empleo de métodos científicos de investigación y ensayos no destructivos.
- ✚ Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, de tecnologías, de software y equipamiento novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.
- ✚ Se han fundamentado las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo se realizará un análisis de los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, y se establece un conjunto de criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de la hipótesis planteada como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la observación o la realización de los experimentos y cálculos. Se realiza además una valoración económica de la fabricación de los tramos en varios sentidos, así como el impacto medioambiental que trae consigo la rotura de los mismos.

El objetivo del capítulo es analizar los resultados del desarrollo de este trabajo y la explicación de los fundamentos que dan la solución al problema planteado partir de la interpretación de las regularidades observadas, así como la valoración económica y el impacto medioambiental.

3.2. Análisis de la composición química del depósito

La composición química se determinó por el diagrama de Schaeffler, que permite determinar la estructura de un acero conociendo su composición química. Los problemas que presentan determinadas estructuras al soldar, dependiendo de su ubicación, los cuales pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura. Para su empleo se parte del cromo y el níquel equivalente del material base y del material de aporte, teniendo en cuenta que se calcularon a partir de las fórmulas 2.1 y 2.2.

La soldadura de la probeta con los electrodos se realizó con una intensidad de corriente de $I_s = 108$ A y un voltaje de $U_a = 16$, para el E 309 L – 16, un aporte térmico de $Hi = 2742$ y para el E 312 – 16, $I_s = 110$, $U_a = 14$ y $HI = 2444$. A la hora de realizar el proceso de soldadura y evitar la distorsión de las mismas por la incidencia del ciclo térmico, las mismas se colocaron encima de unas planchas de cobre, así se evitaría la transferencia de metal hacia el metal base, es decir el viaje de cátodo de acero al carbono hasta el acero inoxidable, las probetas se suspendieron y se les colocó un refuerzo para evitar el doblé de las probetas, ya que cuando estás soldando acero

inoxidable, la distorsión de calor será más apreciable y para que no se produjera la absorción de carbono debido a las altas temperaturas.

Después de cada pasada se limpió el cordón con un disco y se procedió al otro cordón, con electrodo del tipo E 312 - 16 de 4 milímetros de diámetro, durante cada cordón se esperó un tiempo de 20 min para evitar el sobrecalentamiento de las probetas y el cambio de estructura en su interior.

En el caso del acero HK - 40 y del acero AISI 321, se determinó el cromo y el níquel equivalente teniendo como referencia la composición química de los mismos. Por lo tanto los elementos [Cr] y [Ni] son los siguientes:

Para el acero HK – 40, el resultado del Cr_{equ} fue de 25,61 % y el Ni_{equi} de 33,16 % y para el acero AISI 321 el Cr_{equ} fue de 18,18 % y el Ni_{equi} de 37,9 %.

Al determinar ambos elementos y definir la estructura de ambos aceros durante el proceso de soldadura, tenemos que los mismos tienen la formación de estructuras austeníticas.

3.2.1. Análisis del depósito del electrodo E 309L - 16

Al determinar la composición del depósito del cordón de soldadura se analizó la composición química del material de aporte refiriéndose al epígrafe 2.4.2 del capítulo 2. En la figura 3.1 se muestra la composición química del metal de aporte E 309L - 16.

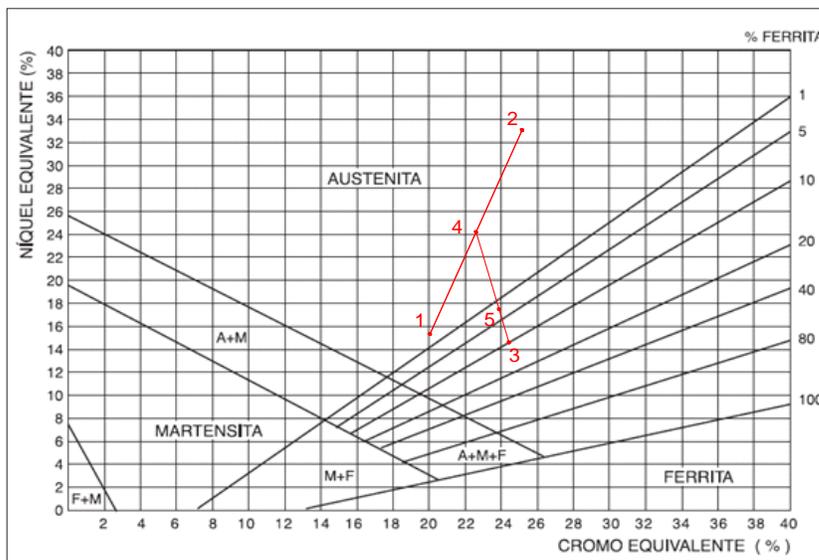


Figura 3.1. Composición química del metal de aporte E 309 L - 16.

- El punto 1 corresponde a la aleación AISI 321
- El punto 2 corresponde a la aleación A 351 grado HK - 40.
- El punto 3 corresponde al material de aporte (electrodo E 309 L - 16).
- El punto 4 es la mitad del segmento formado por los puntos 1 y 2.
- El punto 5 corresponde al material obtenido como resultado del proceso metalúrgico de fusión.

Como se puede observar en el diagrama de Schaeffler la zona fundida contiene 3 % de ferrita, no se genera la fisuración en frío, el crecimiento de los granos, la fisuración por temple por debajo de los 400 °C, y no existe la formación de la fase intermetálica sigma entre 500 y 900 °C por lo que se genera la fisuración en caliente por encima de los 1250 °C.

La composición química del electrodo E 309 L - 16 es:

$$Cr_{equi} = 30,55 \% \text{ y del } Ni_{equi} = 14,9 \%$$

3.2.2. Análisis del depósito del electrodo AWS E 312 – 16

Se procedió a analizar la composición química del metal de aporte empleado en la soldadura de las probetas, se hace referencia en la figura 3.2 donde se muestra el comportamiento del depósito de soldadura del electrodo.

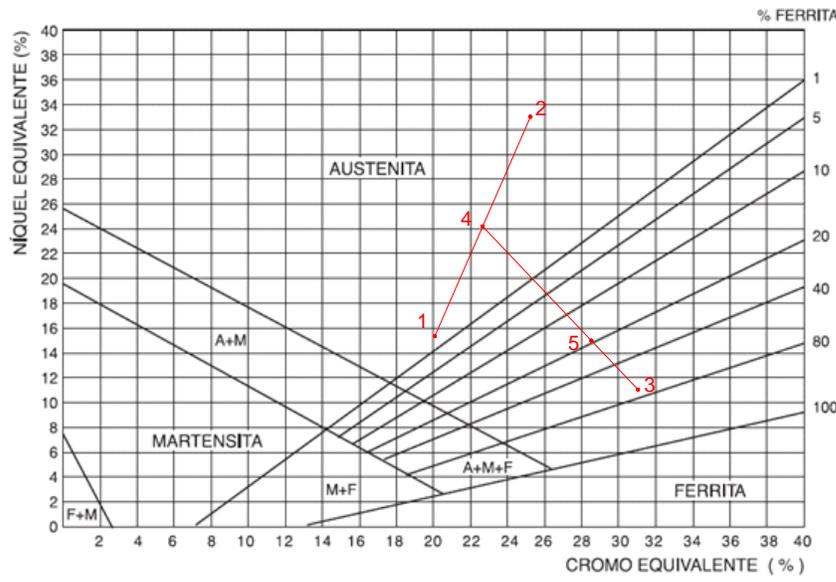


Figura 3.2. Comportamiento del depósito del electrodo E 312 – 16.

- El punto 1 corresponde a la aleación AISI 321.
- El punto 2 corresponde a la aleación A 531 grado HK 40.
- El punto 3 corresponde al material de aporte (electrodo AWS E 312 – 16).
- El punto 4 es la mitad del segmento formado por los puntos 1 y 2.
- El punto 5 corresponde al material obtenido como resultado del proceso metalúrgico de fusión.

Como se puede observar en el diagrama de Schaeffler en la zona fundida contiene 19,8 % no se forma ninguna de las fases representadas en la figura 2.6 del capítulo 2.

La composición química del depósito para el E 312 – 16 es:

$$\%Cr_{equi} = 23,75 \% \text{ y el } \%Ni_{equi} = 14,9 \%$$

3.3. Resultados de los ensayos de inspección visual (VT)

Los resultados de inspección visual realizados a las uniones de soldadura disímiles, del acero HK – 40 y del acero inoxidable AISI 321, se muestran en las figuras 3.3, 3.4 (soldadura con electrodo E 312 – 16) y en las figuras 3.5 y 3.6 la soldadura disímil HK – 40 y AISI 321 soldada con electrodo E 309 L – 16.



Figura 3.3. Soldadura con electrodo E 312–16 Figura 3.4. Soldadura con electrodo E 309 L -16.

Las figuras 3.5 y 3.6 se corresponden a la unión disímil, soldada con los mismos electrodos y en las mismas condiciones, lo cual permite evaluar en más de un depósito la calidad de la unión soldada.

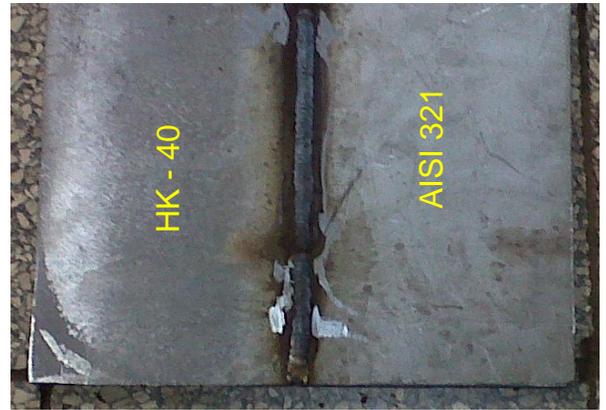
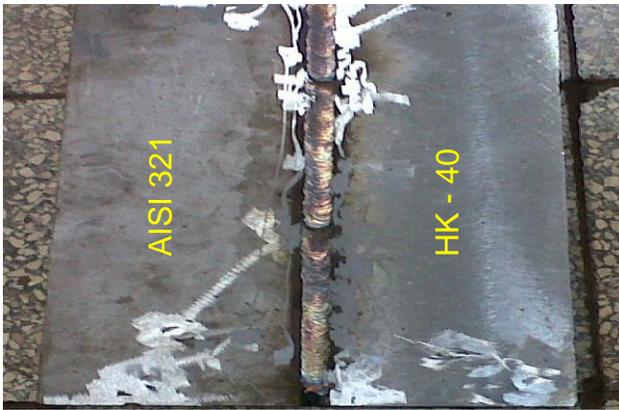


Figura 3.5. Soldadura con electrodo E 312 – 16 Figura 3.6. Soldadura con electrodo E 309 L – 16.

La inspección se le realizó a los cuatro cordones bajo el código AWS D1.1 y se obtuvo los mismos resultados, los cordones de soldadura muestran una buena apariencia, ya que el cordón de soldadura quedó sin ningún socavado en su superficie, poros, mordeduras, y grietas. Se revisó el lado posterior donde no hubo falta de penetración, afilado en los bodes ya que se le aplicó un refuerzo aceptable de $2,5 \text{ mm} < R < 3 \text{ mm}$ y la porosidad fue $< 2 \text{ mm}$ la misma no influye en la calidad del cordón.

3.4. Resultados del ensayo por el método de líquido penetrante

Durante el ensayo se tuvo en cuenta la serie de requisitos mencionados en el capítulo 2, las indicaciones que aparecieron como resultado del ensayo, fueron interpretadas cuidadosamente a fin de no emitir un diagnóstico erróneo. En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran los ensayos por líquido penetrante.



Figura 3.7. Cordón longitudinal



Figura 3.8 Cordón transversal

En las probetas soldadas con los dos tipos de electrodos, al realizarle la prueba con líquido penetrante en principio cualquier indicación proviene de la discontinuidad superficial, se observó que esta fue causada por la rugosidad de las probetas.

En la tabla 3.1 aparece el resumen de los ensayos.

Tabla 3.1 Resumen de los ensayos.

Denominación.	Longitud detectada.	Resultados.	Evaluated según.
Probetas soldadas	12,0 mm.	Satisfactorio.	EN/ 1289 Control de soldadura por líquido penetrante

3.5. Resultado de los ensayos por el método de ultrasonido

Se utilizó el modo de impulso–eco donde se empleó un solo cristal ultrasónico, en este caso la onda emitida por el cristal viaja por la soldadura, se refleja en la superficie límite de la pieza y los defectos y es recibida nuevamente por el cristal piezoeléctrico el que se refleja en la pantalla del TRC los ensayos se les realizaron a las cuatro probetas se pudo conocer que no tuvieron defectos que pudieran dañar las probetas solo en la probeta dos soldada con E321-16 no se detectaron interferencias y defectos en la unión soldada.

En las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se muestra los datos de las probetas para la realización del ensayo.

Tabla 3.2 Datos del elemento inspeccionado

Nombre del elemento: Probetas
Dimensiones: Desde 0 hasta los 12 mm en el patrón
Material: Acero inoxidable AISI 321 y HK - 40

Tabla 3.3. Datos del ensayo

Fecha: 13/04/2014.
Modelo de equipo: DMS 2E.
Procedimiento utilizado: L-P-025 Medición por el método ultrasónico.
Palpador: DA 301 de 5 MHZ.
Bloque patrón: Rango de espesores desde 2,55 hasta los 40 mm.
Campo: 3; 15; 25; 35 y 45 mm.
Frecuencia: 51; 56; 60 y 72 Hz.
Velocidad: 5 898; 5 910; 5 939 y 5 990.
Modo de calibración: 1 punto.
Espesor de la plancha: 12 mm

Las mediciones de ultrasonido se realizaron en las probetas por separado, primeramente se les efectuó a dos muestras, la mediciones fueron en tres puntos aleatorios, con el objetivo de obtener la mayor información posible en este ensayo. En la tabla 3.4 aparecen los resultados de estas mediciones realizadas a las dos primeras probetas, así como los puntos considerados y en la tabla 3.5 los resultados realizados a las muestras 3 y 4.

Tabla 3.4 Resultados de la medición en tres puntos por escalones

Patrón No. 1 y 2	Puntos de mediciones		
1	4,90	4,89	4,91
2	8,00	8,00	8,01

Tabla 3.4 Resultados de la medición en un punto por escalón

Patrón No. 3 y 4	Punto de medición
3	2,55
4	5,12

Para las muestras 1 y 2 se comenzó a partir del borde de la pieza a todo lo largo del cordón de soldadura, lo cual dio como resultado un cordón sin grietas internas, y socavaduras, que cumple con las condiciones de ejecución según las normas de la AWS.

3.6. Resultado de los ensayos radiográficos

Las interpretaciones de los resultados en las cuatro películas radiográficas fue en general un poco compleja y se requirió muchas veces de la experiencia del técnico, por lo que se dieron indicaciones de forma general. Las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 revelan los resultados de las radiografías.



Figura3.9.Radiografía para electrodo E 312-16 Figura3.10.Radiografía para electrodo E 312-16



Figura 3.11 Radiografía para electrodo E309L-16 Figura 3.12 Radiografía para electrodo E309L-16

En las radiografías realizadas se pudo observar que los cordones no presentaron grietas, lo cual estuvo influenciado por la no existencia de líneas bien definidas para indicar su curso, en la radiografía no apareció una línea recta ennegrecida por lo que no hubo presencia de falta de penetración en las probetas.

No obstante, en la micrografía realizada con el electrodo E 312 – 16, muestra No 2, se presentó un círculo ennegrecido en el segundo cordón soldado, lo que presumiblemente pudiera estar asociado a la formación de un poro ventricular. No se pudo apreciar ningún otro defecto revelado en la radiografías. En las tablas 3.7, 3.8 y 3.9, se muestran algunos parámetros medidos durante el ensayo.

Tabla 3.6. Datos de los elementos inspeccionados

Nombre del elemento: Probetas soldadas. Dimensiones: 440 x 145 x 12 mm. Material: Acero inoxidable ASI 321 y HK - 40.

Tabla 3.7. Datos del ensayo

Procedimiento utilizado: L-P- 021. “Ensayos por rayos X”. Tipo de exposición: Una pared, vista sencilla. Dimensiones del foco: 3 mm. Kv: 200 y mA: 4,5. Tiempo de exposición: 2:50 seg. Distancia fuente película: 700 mm. Tipo de película: D7. Espesor de la plancha: 12 mm. Norma de aceptación: EN ISO 5817: 2003. Niveles de calidad de las imperfecciones en las uniones soldadas. Proceso de revelado: Manual. Tiempo de fijación: 5:00 min. Tiempo de revelado: 35 seg.
--

Tabla 3.8. Resultados de la inspección.

Código del soldador	Densidad de la imagen	Sensibilidad de la imagen %
5	2,92	1,22
5	3,21	1,22
5	2,80	1,22
5	2,95	1,22

La tabla anterior especifica que el código del soldador (5), es un soldador homologado, con basta experiencia en la realización de los procesos de soldadura.

La densidad de la imagen se refiere al número atómico del material, para las muestras 2 y 4 se observan densidad de imágenes con mayores valores, esto está asociado a que ambas muestras se corresponden con el acero HK – 40, el cual fue obtenido por fundición, y durante este proceso el acomodo de los granos y la formación de estructura interna, no se comportan de igual manera que en los aceros obtenidos por laminado, como es el caso del acero AISI 321.

Observaciones y recomendaciones:

La discontinuidad encontrada en la muestra No 2, asociada a un poro vermicular en el cordón de soldadura C12.01, por sus dimensiones no se consideran defectos (invalidantes) de acuerdo a la norma aplicada EN ISO 5817: 2003. Niveles de calidad de las imperfecciones en las uniones soldadas.

Los resultados de los ensayos fueron interpretados por el técnico Misael Fitó Cardoza especialista B en ensayos físico, químicos y mecánicos ya que las probetas soldadas de acero inoxidable AISI 321 y del HK – 40, no tuvieron ningún defecto en los cordones por lo que están validadas como aprobadas en la realización de los ensayos.

3.7. Valoración económica

Al abordar la valoración económica de los ensayos realizados por conceptos de mano de obra, materiales, sustancias químicas, materiales de aporte y energía eléctrica. En la tabla 3.9 se muestran los valores de la realización de los ensayos como la cantidad de material empleado, y los precios de los equipos.

Tabla 3.9 Valores de la realización de los ensayos.

Denominación	Cant.	Precio		Importe		Importe total
		CUP	CUC	CUP	CUC	
AISI 321 S=12 (T)	0,05	0,00	6310,38	0,00	315,52	315,52
Electrodo AWS-E-309 Ø3,2 (kg)	1	1,80	5,42	1,80	5,42	7,22
Electrodo AWS-E-309 Ø4 (kg)	3	1,58	13,03	4,74	39,09	43,83
Electrodo AWS-E-312 Ø3,2 (kg)	1	3,10	22,20	3,10	22,20	25,30
Electrodo AWS-E-312 Ø4 (kg)	3	0,72	17,62	2,17	52,86	55,03
Precio Preparación	1	53,6	36,82	53,60	36,82	90,42
Fundición probeta HK-40	1	327,63	574,52	327,63	574,52	902,15
Análisis Lab. Probeta HK-40	1	20,25	18,29	20,25	18,29	38,54
T.Térmico Probeta HK-41	1	75,35	56,47	75,35	56,47	131,82
Análisis microestructural	1	21,43	5,84	21,43	5,84	27,27
Proc. Maq. Prob. HK-40	1	230,48	335,2	230,48	335,20	565,68
Proceso de soldadura	1	3,29	6,3	3,29	6,30	9,59
Corte de los Cupones	1	5,57	23,86	5,57	23,86	29,43
Inspección Visual	1	3,47	0,00	3,47	0,00	3,47
Líquido Penetrante	1	4,3	51,46	4,30	51,46	55,76
Ultrasonido	1	21,53	52,45	21,53	52,45	73,98
Radiografía	1	14,49	47,44	14,49	47,44	61,93
Sub-Total					1 643,74	2 436,93

Una vez realizado el trabajo se tuvo en cuenta una estimación del costo de inversión del mismo, además de algunos gastos, tanto de materiales como de materia prima. Con la realización del trabajo, es beneficiada económicamente la empresa, ya que se puede incrementar la durabilidad de la pieza en cuestión.

Además se puede lograr una mejor calidad en la soldadura, ya que los resultados obtenidos durante las investigaciones sin dudas permitirán mejorar la fabricación de los tramos del Jacoby, y con ello un funcionamiento más eficiente del transportador en general.

3.7.1 Gasto de energía consumida en la fabricación de un tramo

En la tabla 3.10 se relacionan las principales máquinas que consumen gran cantidad de corriente.

Tabla 3.10. Gasto de energía.

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

3.7.2. Precio establecido para la fabricación total de un tramo

El valor total que cuesta fabricar uno de los tramos tres y cuatro del transportador Jacoby se puede apreciar en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Valor total de cada tramo

Pieza de fabricación	P/u (Mn)
Tramo uno	15 440,10
Tramo cinco	15 690,99

Cuando se requieren realizar operaciones de cambio de tramos averiados, el tiempo de parada de una línea es de 20 horas como promedio, en cada una se dejarán de procesar 800 toneladas de menas lateríticas que garantizarían la extracción de 11,2 toneladas de sinter 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.

3.8. Análisis del impacto ambiental

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

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

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

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

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ❖ El transportador esta trabajado bajo los regímenes de trabajo normales, o sea según los ensayos no existe ningún problema con la soldadura, por lo que las causas de la rotura está dada por la diferencia de estructura que se forma al ocurrir grandes tensiones provocadas por la soldadura.
- ❖ Se determinó el comportamiento microestructural de las muestras disímiles soldadas con los electrodos E 312 – 16, E 309 -16, donde se realizó la caracterización del depósito del cordón de cada uno.
- ❖ Durante la ejecución de procesos de soldadura en espacios confinados se debe prestar especial atención por la emanación de gases y humos que causan serias afectaciones a la salud.

Conclusiones generales

- Al realizar la unión soldada con el electrodos E 312 – 16, E 309 L - 16, se logró un resultado satisfactorio con los dos, a pesar de los defectos encontrados en una de las probetas, lo cual fue corroborado a través de los ensayos no destructivos y el diagrama Schaeffler.
- Los ensayos no destructivos realizados a las muestras soldadas, muestran que los cordones soldados presentan buena calidad y buena apariencia, por lo que es posible lograr uniones satisfactorias en esta unión disímil cuando se suelda con los electrodos seleccionados y las técnicas utilizadas en el presente trabajo.
- Al realizar la valoración económica del proceso de soldadura disímil, donde se consideró los diferentes tipos de electrodos, las máquinas y la mano de obra incurre en un gasto de \$ 2 436,93.
- Durante los procesos de soldadura SMAW deben evitarse las posiciones de soldadura por encima o por debajo del nivel del hombro, que requieran flexión o torsión para evitar las afectaciones al sistema óseo-muscular.

Recomendaciones

- Someter a ensayos mecánico de tensión y doblado muestras de AISI 321 y de HK 40, para determinar la resistencia mecánica de la unión disímil.
- Determinar en próxima investigación la resistencia a la corrosión en las juntas de las aleaciones de AISI 321 y del HK 40, lo cual constituiría un aporte importante en la soldadura de materiales disímiles.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959 – 16 – 0188 - 3. Universidad de Matanzas. 2002.
2. Alpsten, G.; Tall, L., "Residual stresses in heavy welded shapes", *Welding Journal*, vol 49, marzo pp. 123-127, 1970.
3. ANSI/AWS D1.1-96 Structural Welding Code: Steel. The American Welding Society, 1996.
4. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API RP 570: Inspection, repair, alteration and rerating of in - service piping system, Second Edition - Addendum 2, USA, 2001. 111
5. American Welding Society (AWS) "Welding Handbook". 8va Edición. 1996.
6. 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
7. Baek, J., Kim, W., Kim, Y. Comparative study for various repair methods of in-service pipeline using full scale burst test. In: WORLD GAS CONFERENCE, 23º, 2006, Amsterdam, Netherlands. 11 p.
8. Bailey, N. *Weldability of Ferritic Steels*. The Welding Institute, 1995.
9. Bakker, F. J. Y Horestreydt A. J. W. *Soldadura por arco*, Madrid, 1968.
10. Barreiro, A. J. *Aceros especiales*, 3ª. ed. Madrid, 1966.
11. Beckert, Manfred. *Grundlager der Schweisstechnik*. Berlín. Ed. Veb Verla
12. Bengton, U., *Design requeriments materials properties a basic for materials selection*. American society for testing. USA: 230 - 250, 1991.
13. Bonifaz, E., *Finite Element Analisis of heat flor in single pass are welds*. *Welding Journal* .May 2000.
14. Burgos, J., *Tecnología de soldadura*. Ed. Pueblo y Educación. 1987.
15. Blunt, Jane and Nigel C. Balchin (2002). *Health and Safety in Welding and Allied Processes*. [Cambridge](#): Woodhead. [ISBN 1-85573-538-5](#).
16. Bruce, W.; Harwig, D.; Harris, I.; Gordon, J.; Sullivan, M.; Neary, C., *Development of internal repair technology for gas transmission pipelines*. GTI CONFERENCE AND EXHIBITION, 2004, Phoenix, Arizona, USA.

17. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 p. ISBN 0 – 471 - 32013 - 7.
18. 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
19. Castillo, J., El microscopio metalográfico y preparación de muestras para examen metalográfico. Informe técnico ISMMM. Tutor Dr. C Tomás Fernández Columbié, Moa, 2012
20. Cisilino, A.; Chapetti, M.; Otegui, J., Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines. International Journal of Pressure Vessel and Piping, v. 79, p. 67 – 76, 2002.
21. Cortés, P.; D'oliveira; A., Trincas de Solidificação e Liqueção de Aços Inoxidáveis AISI 904L Soldados por Arco Eléctrico, 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Curitiba PR, 2001.
22. Cho, J.; Lee, B.; Moon, Y.; Van Tyne, C., Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments. Journal of materials processing technology 155-156 1690-1695, 2004
23. EL- Hebeary, R., Shennawy, M. y Abdel - Aziz, A., "Control del Riesgo del Hidrógeno Inducido en grietas de la Soldadura del Acero, 2004 IIW. Congreso Internacional, 19 - 33, Cairo, Egipto 2004
24. EMPRESA CUBANA DEL PETROLEO. Regulación para el transporte de hidrocarburos gaseosos por ducto, Código DO -DU/R 0101, Revisión 00, Cuba, 2000. 81 p.
25. Fazzini, P. G; Otegui, J. L. Influence of old rectangular repair patches on the burst pressure of a gas pipeline. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v.83, p. 27-34, 2006.
26. García, P; Casto, M., Metodología para la enseñanza práctica de soldadura por arco eléctrico. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983. 256 p.
27. García, Y.; Burgos, J., Obtención de campos de temperaturas en juntas soldadas mediante el empleo de MEF. Revista de la Facultad de Ingeniería. 18 (2) 12 – 21,

2003. Disponible en <http://www.relevo.com.ve/programa/indice/ria-pbp>. Acceso Mayo 2011
28. García, Y.; Burgos, J.; Gil, F.; Rivalta, J., Obtención de Tensiones Residuales a lo Largo de un Cordón de Soldadura Mediante Métodos Analíticos y Experimentales. Soldagem Insp., Vol. 11, No. 2, 4 -9, 2006
29. Gedeon, S. A., Eagar, T. W. Análisis termodinámico de la absorción del hidrógeno en la soldadura. Revista de soldadura. Julio 264s - 271s. 1990.
30. 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.
31. González, Vázquez. Manual de Soldadura a Fuego. Plátano Editora. Lisboa. 1978. 198 pp.
32. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial MIR. 1983. p. 53 - 89.
33. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial MIR. 1983. p 17 – 22.
34. Guliar, A. P. Metalografía, Tomo 1 y 2. Editorial. MIR MOSCÚ. 1978.
35. Glizmanenko, O. L. "Soldadura y corte de metales". La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1975. 472 pp.
36. Grace, P. In - service welding of steel pipelines. SECOND NATIONAL STEEL CONFERENCE, 2003, Australia.
37. Hicks, John (1999). *Welded Joint Design*. New York: Industrial Press. [ISBN 0-8311-3130-6](https://doi.org/10.1002/9781118131306).
38. James, M.; Back, O., Medidas no destructivas cuantitativas de Tensiones Residuales. CRC, Revisión crítica en ciencias de los materiales en estado sólido. Vol. 9, Issue 1. 1980.
39. James, M., In Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1-4. 1996.
40. John, W.; Price, H.; Anna, R.; Ziara-Paradowska, Suraj, J.; Finlayson, T., Comparison of experimental and theoretical residual stresses in welds: the issue of gauge volume. International Journal of Mechanical science. 50 (11) 513 – 521, 2008.
41. Kedzierzawski, P., "Hydrogen Trapping in Iron and Iron Alloys", Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, 1st. Ed., Noyes Publications, 271 - 288, New Jersey, USA. 1985.
42. Key to Steel. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/> .

43. Kiefner, J.; Trench, Ch., Oil Pipelines Characteristics and Risk Factors: Illustrations from the Decade of Constructions. Report for American Petroleum Institute, USA, 2001.
44. Kurzydowski, K. J., Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyurulnyk, O.; Ciupinski,. Susceptibility to stress corrosion in transport oil pipeline steels exposed to long time service conditions. 2001. Extracted on June 17 of 2004 from web site <http://www.half.kth.se/forskning/ecf15/ECF-proceedings/Kurzydowski%20K-%20etal.pdf>.
45. Lancaster, J., Metalurgia de la soldadura. Sixth Ed., 256-268, Woodhead Publishing, Abington Cambridge, England. 1999.
46. Lajtin, Y., Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1ed.Editorial Mir Moscú. 1973. P 359 – 360.
47. Lamber A. y Herrero E. Libro de registro de datos y averías. Planta de Hornos de Reducción: Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara. Moa, Cuba. 2000-2006.
48. Lippold, J.; Kotecki, D.,Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005.
49. 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.
50. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
51. 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. Transaccions ASME, 56, (4), pp. 249 - 254. 1934.
52. Masubuchi K. Análisis de estructuras soldadas. Pergamon Press, Elmsford, N. Y. 1980.
53. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977.
54. Meyer, H. J. Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defecte in Welds, Welding Inst. London. 1968.
55. Mikliaev, P. G. Anisotropía en las propiedades mecánicas de los metales. Ediciones Metalurgia. Moscú. 1986.
56. Modenesi, P. J., Apolinário, E. R., Pereira , I. M., “TIG welding with single-component fluxes”, Journal of Materials Processing Technology, V. 99, pp. 260-265. 2000.

57. Nangel, D. Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor. *Metal Const.* Nro 2, Vol. 64. 1969.
58. Nicholls D. M. Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente. *Brit. Welding Journal.* Nro 3, Vol. 15. 1968.
59. Oddy, A.; McDill, J., Burn through prediction in pipeline welding. *International Journal of Fracture*, v. 97, n. 4, p. 249 - 261, 1999.
60. Oriani, R. A. La física y la metalurgia Aspectos del Hidrógeno en el metal. ICCF4, Fourth International Conference on Cold Fusion", Lahaima Maui, Electrical Power Research Institute 3412, Hillview Av., Palo Alto CA 94304, USA. 1993.
61. Oystein Grong, Modelación Metalúrgica de la soldadura. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
62. Palmer - Jones, R.; Paisley, D., Repairing Internal Corrosion Defects in Pipelines - A case study. In: INTERNATIONAL PIPELINES REHABILITATION AND MAINTENANCE CONFERENCE, 4º, 2000, Prague.
63. Papadakis, G. Major Hazard pipelines, a comparative study of onshore transmission accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.12, p. 91-107, 1999.
64. Paris, P.; Erdogan, F., , "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, V. 85, pp. 528-534. 1963.
65. Pástor, Mario R. Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Ecuador: Editorial ESPOCH, 2002. p.56.
66. Ramírez, A.; Cerpa, S.; Mejías, G.; León, J.; Quintero, A., Soldadura de un acero inoxidable duplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. *Revista Latinoamericana de Metalurgica y Materiales* 2006; 26 (1): 43-50.
67. Pérez, P. Y. Tesis en opinión al título de ingeniero mecánico, 2007.
68. Pero - Sanz, J. A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
69. Pero - Sanz, J. A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. p 393 - 502. España.

ANEXO 1. Fundición de la probeta



EMPRESA MECANICA DEL NIQUEL

Taller de Fundición



Carretera Sagua - Moa Km 1½. Moa C. P. 83300.



6-

REGISTRO DE CALCULO DE CARGA

Marca de la Aleación Ac HK-40 (nueva) Horno Utilizado: Horno de Inducción Fecha de Elaboración: 11,10,2013

Composición química, %	ELEMENTOS																				
	C		Si		Mn		Cr		Ni		P		S								
	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	
	0.3	0.5	0.5	1	0.75	1.5	23	27	18	22	0.001	0.05	0.001	0.05							
Análisis deseado, %																					
Cálculo para el análisis químico deseado.																					
Composición de la Carga Metálica	Peso, Kg	0.4		0.75		1.15		25		20		0.05		0.05							
		%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg										
Palanquilla	39.95	0.23	0.092	0.4	0.16	0.4	0.16					0.04	0.016	0.05	0.02						
Fe Cr 0.06	38							63.1	23.98												
Ni-Sinter	20									92	18.4										
Fe Si 75	0.7			75	0.525																
Mn Met	0.85					99	0.842														
Carbón Antrasita	0.5	60	0.3																		
Subtotal	100	60.23	0.392	75.4	0.685	99.4	1.001	63.1	23.98	92	18.4	0.04	0.016	0.05	0.02						
Adiciones																					
CaSi	0.1																				
Al	0.1																				
Perdidas o ganancias																					
TOTAL	100.2	60.23	0.392	75.4	0.685	99.4	1.001	63.1	23.98	92	18.4	0.04	0.016	0.05	0.02						

Realizado por: Ramón Rodríguez Rodríguez

Firma: _____

		CARTA DE RUTA PARA MAQUINADO R-05/ST-P-001		EMPRESA MECANICA DEL NIQUEL “Cmdte. Gustavo Machin Hoed de Beche” Grupo Técnico			
No. Plano: M/F		Denominación: Probeta		Material: HK-40		Hoja: 1	No. Hojas:
Orden de trabajo: 000-B901				Semiproducto: S=20 x 150x 450		Masa:	
Fecha: 03/03/14	Operación Tecnológica			Herramientas:		N	S
G. Homogéneo 165	Instalar en plato de 4 muelas, alinear, refrentar cara a obtener espesor de 12 mm Supervisor XI = 0.26			PSSNR-19 GC-4025		45	0.46
Cat. Sal.: VII							
Tpc: 0.4							
T. Efectivo: 2.5							
G. Homogéneo 6T83HS	Instalar en la mesa de la máquina con la ayuda de bridas, refrentar a obtener longitud total de 440 mm, refrentar laterales compartiendo medidas a obtener ancho de 145 mm, elaborar bisel en un lateral de 30°, manteniendo 1 mm desde el borde. Supervisor X = 0.26			Fresa de vástago Ø32 Z=2		125	80
Cat. Sal.: VII							
Tpc. 0.30							
T. Efectivo: 1.90							
G. Homogéneo	Ayudante II = 0,26 Gruero IV = 0,38 Afilador VII = 0,11						
Cat. Sal.:							
Tpc:							
T. Efectivo:							
G. Homogéneo							
Cat. Sal.:							
Tpc:							
T. Efectivo:							
G. Homogéneo							
Cat. Sal.:							
Tpc:							
T. Efectivo:							
Elaboró: Yoenis	Firma:	Fecha: 03/03/14	Aprobó: Miguel		Firma:	Fecha:	Tecnología No:
Observaciones: Las dimensiones a las que se hace referencia en esta tecnología se medirán con instrumentos de precisión no menor que 0.02 mm. Las cintas métricas y las reglas utilizadas deben estar calibradas por un órgano competente.							

PAUTA DE INSPECCIONOrden de trabajo:(1) **000-B901**Denominación:(2) **Probeta**Número de plano: (3) **np**Hoja: (4) 1 de 1

Número del Objeto de la Inspección (5)	Punto de Inspección (6)	Documento (7)	Informe/ Registro (8)	Punto de Parada/Aviso (9)	Certifica			Observaciones (13)
					Producción (10)	Cliente (11)	Calidad (12)	
1.2	Torneado	Plano y tecnología	RPCPF	---	X	---	X	

Elaborado por: (14) **Yoenis**
Tecnólogo

Firma: (15) _____

Aprobado por: (16) **Miguel**
J' de Tecnología

Firma: (17) _____

