



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN ELECTROMECAÁNICA

TITULO: Comportamiento de depósitos de soldaduras
en ejes de giro de las Excavadoras Э4А6/45
recuperadas en la Mina dela Empresa
“Comandante Ernesto Che Guevara”

AUTOR: Ing. Juan José Fernández Cruz

TUTOR: Dr.C. Alberto Velázquez Del Rosario

“Año 55 de la Revolución”
Moa, 2013

RESUMEN

Se realiza un estudio de la viabilidad de reacondicionamiento de los dientes de los ejes de giro de las excavadoras $\exists 4A6/45$ de la Mina de la Fábrica “Cte. Ernesto Che Guevara”. Para ello, se aplican recargues de defectos en forma de canales simulados en bloques de acero AISI 4140 con la aplicación de dos variantes: recargue con electrodo austenítico U.T.P-068HH sin precalentamiento (variante A) y recargue con electrodos ferrito-perlíticos de alta resistencia U.T.P-642 y U.T.P-6020 con precalentamiento (variante B). Adicionalmente, se practicó tratamiento térmico postsoldadura a la variante B para evaluar sus efectos en la calidad del recargue. Para ambas variantes, se utilizó proceso SMAW con depósitos de siete capas con diferentes diámetros de electrodo y parámetros de soldadura seleccionados acordes con el tipo del material y la soldadura a utilizar. La calidad del recargue se evaluó a partir de la realización de ensayos metalográficos utilizando microscopía óptica y electrónica de barrido y ensayos de dureza. Los resultados de los análisis metalográficos, ensayos de dureza y la valoración económica demuestran que es factible la restauración de los ejes de giro utilizando la variante B al obtenerse depósitos de soldadura con el mínimo de defectos, valores adecuados de calidad microestructural y resistencia mecánica que restituyen el estado técnico y de explotación de los ejes de giro y permiten su reincorporación al proceso productivo con bajos costos.

ABSTRACT

A study about the viability of reconditioning of rotating geared-shaft from diggers model $\exists 4A6/45$ belonging to the open cast mine from "Cmder. Ernesto Che Guevara" Nickel Enterprise is done. Refilling of channel-shaped simulated defects in AISI 4140 steels blocks using two variants: refilling with U.T.P-068HH austenitic electrode without preheating (variant A) and refilling with high strength U.T.P-642 and U.T.P-6020 ferritic-pearlitic electrodes and preheating (variant B) were used. Additionally, postwelding heat treatment was applied to samples from variant B in order to evaluate its effects on the quality of the refilling. For both variants, SMAW process with seven layers deposits using different electrode diameters and welding parameters according to the kind of material and the welding process was applied. Metallographic analysis using optical and scanning electronic microscopy and hardness tests were done in order to evaluate the quality of the refilling. Results of Metallographic and hardness tests and the economic evaluation proved the feasibility of variant B with postwelding heat treatment for the reconditioning of rotating geared-shaft from diggers model $\exists 4A6/45$ because minimum defects, adequate values of microstructural quality and mechanical strength that re-establish the good technical conditions and use with low costs, were obtained.

Contenido

INTRODUCCIÓN	4
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
1.1Introducción	9
1.2Fundamentos del desgaste en los metales.....	11
1.2.1. Desgaste por abrasión en equipos de laboreo minero	11
1.2.2. Desgaste por adhesión (metal-metal).....	12
1.2.3. Desgaste por temperatura.....	14
1.2.4. Desgaste por corrosión.....	14
1.4 Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura.....	16
1.5 Características del acero AISI 4140	17
1.5.1Formas de suministro.....	18
1.5.2 Aplicaciones.....	18
1.5.3 Propiedades	18
1.6 La soldabilidad de los aceros	20
1.7 La soldadura SMAW en la recuperación de piezas	21
1.8 Transformaciones físico - químicas y estructurales en la unión soldada	22
1.9 Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)	23
1.10 Modificaciones estructurales y físico – químicas en el metal base (MB)	23
1.11 Fenómenos Térmicos en la Recuperación de Piezas por Soldadura.....	24
1.11.1 Fundamentos de la transferencia de calor en la soldadura.....	25
1.12 Forma y distribución del calor el proceso SMAW	28
1.13 Determinación de las variables para el método de SMAW	29
1.14 Aparición de estructuras frágiles durante la recuperación	30
1.15 Principales causas de los defectos en la recuperación.....	31
1.15.1 Agrietabilidad	32
1.15.2 Porosidad	34
1.16 Atenuación de las fallas en la soldadura de recuperación.	34
Recocido de alivio de tensiones.....	36
Normalizado	36
Termomejoramiento	36
Transformaciones durante la explotación de las piezas recuperadas.....	37
Particularidades tecnológicas en la aplicación de los recargues	38
La actividad minera y el uso de las excavadoras en el Grupo Empresarial	
Conclusiones del Capítulo I	41
CAPÍTULO 2. MATERIALES, MÉTODOS Y CONDICIONES EXPERIMENTALES	42
2.1. Introducción	42
2.1.Establecimiento del plan experimental	42

2.1.1.Método de soldadura a aplicar.....	42
2.1.2.Variantes a aplicar	43
En este caso, se seleccionan dos variantes:.....	43
VARIANTE A.....	43
VARIANTE B.....	43
Recargue con electrodo austenítico U.T.P-068HH sin precalentamiento	43
Recargue con electrodos ferrito-perlíticosU.T.P-642 y U.T.P-6020 con precalentamiento.	43
2.1.3.Procedimientos y parámetros a utilizar.....	43
ASME QW-251.2: Variables Esenciales	43
ASME QW-251.3: Variables No Esenciales	43
QW-253-1: Norma para simulación de los defectos y los procedimientos de recargue.	43
QW-402.16: Juntas (Preparación de la superficie)	43
QW-403.20: Metal base	43
QW-404.12: Metal de aporte	43
QW-405.4: Posición	43
QW-406.4: Pre calentamiento y temperatura entre pasos.....	43
QW-407.6: Tratamiento térmico posterior	43
QW-409.4. Características eléctricas.....	43
QW-410.38: Técnica (Múltiple o capa simple)	43
2.1.4.Obtención de bloques para la simulación de defectos de soldadura	43
2.1.5.Verificación de la composición química del material de los bloques	44
2.1.6.Simulación de defectos según las dos variantes seleccionadas Código ASME44	
Dimensiones de los defectos simulados:	44
2.1.7.Defectoscapía capilar a los defectos.....	45
Se aplicaron ensayos de defectoscopía capilar (líquido penetrante) en los canales maquinados para rellenar con electrodos austenítico y ferrito-perlítico y simular las soldaduras.	45
2.1.8.Establecimiento de los parámetros y tecnologías de soldadura según Código ASME	45
2.1.8.1.Cálculo del carbono equivalente	45
2.1.8.2.Cálculo de la temperatura de precalentamiento	46
2.1.8.3.Caracterización de los electrodos a utilizar en ambas variantes	48
2.2.Procedimiento tecnológico del relleno de los defectos en los bloques según las tecnologías diseñadas para las variantes A y B.....	48
2.3.Tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones	53
2.4.Toma y preparación de las muestras	53
2.5 Limpieza y lavado de las superficies a investigar	54
2.6 Ataque químico de las muestras	54
2.7 Análisis metalográfico.....	54
2.8.Medición de la dureza.....	55
Conclusiones del capítulo II.....	55
 CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS	56
3.1 Introducción.	56
3.2 Análisis químico	56
3.3 Carbono equivalente	56
3.4 Temperatura de precalentamiento.....	57
3.5 Defectoscapía capilar	58
3.6 Análisis macro y microestructural de la variante A.....	58

3.7 Análisis macro y microestructural de la variante B.....	61
3.8 Análisis microestructural de la variante B con tratamiento térmico de alivio de tensiones.....	64
3.9 Ensayos de Microdureza.....	65
3.9.1 Comportamiento de la dureza en los especímenes de la variante A.....	65
3.9.2 Dureza en los especímenes de la variante B	68
3.9.3 Dureza de los especímenes de la variante B con Tratamiento Térmico de alivio de tensiones.....	70
3.9.4 Aplicación de los resultados obtenidos en la investigación	72
3.9 Análisis del impacto ambiental.....	74
Conclusiones del capítulo III.....	76
CONCLUSIONES GENERALES	77
RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXO No. 1.	84

INTRODUCCIÓN

En el 2011 el níquel representó el 30% de las exportaciones de la isla que generaron ingresos globales de 9.000 millones de dólares por delante de los medicamentos biotecnológicos y de alta tecnología, el azúcar, el tabaco y el ron, lo que ha desempeñado un papel importante dentro del desarrollo económico nacional. En dichos resultados se destacan la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara y la Pedro Soto Alba, del municipio de Moa pertenecientes al grupo Empresarial CUBANIQUEL. Estas industrias, respaldadas por la existencia en la isla de importantes yacimientos de mineral laterítico, luchan por consolidar posiciones en el marco de la economía nacional.

Según expertos del sector, es necesario concluir las inversiones que permitan la rehabilitación de esa rama con el objetivo de alcanzar un volumen anual de producción superior al obtenido en el año precedente. En el 2002 la producción se aproximó al récord de 76 mil 600 toneladas, tras los grandes esfuerzos para resolverse las dificultades con equipos de acarreo y con los sistemas del proceso tecnológico.

El intenso crecimiento de la producción y el consumo ascendente del mineral que en la actualidad se extrae, promueven problemas recientes y crecientes para todo el ciclo de producción desde la proyección geólogo-minera, la explotación y producción, hasta la comercialización, las ventas y la extinción de la minería y la empresa.

Especial importancia tiene en este proceso el acarreo del mineral a través de las excavadoras. Sin embargo estos equipos presentan fallas y averías debido a que están expuestos a un continuo empleo, lo que provoca que el estado de envejecimiento sea prematuro y limite la disponibilidad de su uso; aunque también existen dificultades en la planificación del sistema de mantenimiento preventivo, restringiéndose así la extracción minera y empeorando los costos de producción.

Si se tiene en cuenta que la utilización de estos equipos tiene gran importancia y que resulta determinante su integración a la actividad minera para el logro del

plan de producción y los objetivos de la empresa, es necesario hacer un estudio profundo que muestre las características y recomendaciones acerca del estado en que deben conservarse para garantizar la seguridad de trabajo de la máquina en óptimas condiciones ambientales.

Protocolo de la investigación

El hombre se ha valido de herramientas y máquinas para modificar el medio donde habita. Con el transcurso del tiempo, esas herramientas y máquinas se han hecho más sofisticadas y especializadas a medida que lo exigen las necesidades. Es así como viejas y nuevas ideas, seleccionadas después de muchos triunfos y fracasos, se han unido dentro del campo de la ciencia y la tecnología, para dar por resultado un vehículo de fuerza poderosa y alto rendimiento que ha permitido cambiar la cara del mundo favoreciendo el proceso de desarrollo industrial, fundamentalmente la actividad minera: las excavadoras. La evolución de las excavadoras a nivel internacional ha tenido gran auge en la minería, la de construcción, la industria petrolera y agrícola por su capacidad productiva y posibilidades de desplazamiento por diferentes trazas del terreno y relieve.

Las excavadoras en Cuba son utilizadas principalmente en la industria niquelífera, minera, materiales de la construcción, agricultura cañera y no cañera. Estás garantizan altos niveles de movilidad de masa de material con gran fiabilidad y resultan por esta razón, insustituibles en los procesos productivos. Muestra de ello es el año 2000, donde la producción de níquel alcanzó el primer rubro exportable del país aumentando su papel protagónico en la economía nacional.

En el Lineamiento 224 aprobado en la Primera Conferencia Nacional se señala: Mejorar la posición de la Industria del Níquel en los mercados, mediante el incremento de la producción, elevación de la calidad de su productos y reduciendo sus costos, logrando una mejor utilización de los recursos minerales. Mejorando la reparación y el mantenimiento de las instalaciones industriales, de acuerdo con el programa aprobado. Es por ello que cualquier investigación que se realice en este campo con el objetivo de evaluar el

aprovechamiento eficiente de los medios de extracción minera y transporte para esta actividad requiere vital importancia para el perfeccionamiento de tecnologías, su rentabilidad y disminución del impacto ambiental en este sentido.

Dentro del Complejo Tecnológico del Grupo Empresarial Cubaníquel se encuentra la fábrica Ernesto Che Guevara de Moa, donde se realiza el proceso de fabricación de níquel por la tecnología carbonato amoniacal a través de la extracción del mineral a cielo abierto. En la ECG las excavadoras se han convertido en uno de los medios más importantes y solicitados en este tipo de actividad.

Actualmente en la mina de la fábrica de níquel "Comandante Ernesto Che Guevara de la Serna" las excavadoras están sometidas a un uso continuo y explotación intensa, presentando fallas y averías originadas por el desgaste de los dientes de los ejes de giro. Se han realizado varios intentos de recuperación de los mismos utilizando electrodos de las más diversas características sin lograr resultados aceptables.

Situación problemática. La pérdida de eficiencia de las excavadoras por causa del desgaste de los dientes de los ejes de giro, provocan un incremento de los gastos de explotación debido a los insumos por concepto de mantenimiento y afectaciones medioambientales (ruido, polvo, derrame lubricantes) producidas por envejecimiento del equipamiento, lo que genera la necesidad de búsqueda de alternativas tecnológicas que garanticen la restitución de la vida útil de dichos elementos sin incurrir en costos ni inversiones de consideración.

Problema científico

Inexistencia de una tecnología de soldadura viable y científicamente argumentada para el reacondicionamiento de los ejes de giro de las excavadoras modelo 94A6/45 de la mina de la Empresa Ernesto Che Guevara.

El **objeto de estudio** lo constituye:

Tecnología para la recuperación por soldaduras de los dientes de los ejes de giro de las Excavadoras $\exists 4 A6/45$.

Para dar solución al problema planteado se propone como **objetivo general**:
Diseñar y validar una tecnología de soldadura viable para el reacondicionamiento de los dientes de los ejes de giro de las excavadoras $\exists 4A6/45$ de la mina de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Como **hipótesis científica** se plantea la siguiente:

La selección de un electrodo de alta resistencia y los parámetros adecuados de control de soldaduras, permitirán establecer una tecnología de recargue científicamente argumentada basada en la obtención de un depósito de soldadura con el mínimo de defectos, valores adecuados de calidad microestructural y resistencia mecánica que restituyan el estado técnico y de explotación de los ejes de giro y permitan su reincorporación al proceso productivo.

Para cumplimentar el objetivo propuesto y verificar la hipótesis planteada, se trazaron las **tareas de trabajo** siguientes:

1. Búsqueda bibliográfica para el establecimiento del estado de arte del objeto de estudio.
2. Planificación, diseño y realización de experimento.
3. Elaboración y aplicación de una tecnología para la recuperación de los dientes de los ejes de giro.
4. Validación de la tecnología propuesta para la recuperación de los dientes sobre la base de la realización de los correspondientes ensayos metalográficos y de medición de dureza
5. Evaluación técnico-económica y ambiental de la variante propuesta

Aportes Metodológicos:

Se establece una metodología para la recuperación de los dientes de los ejes de giro para las Excavadoras $\exists 4$ A6/45 que puede generalizarse a otros tipos de engranaje existentes en la industria del níquel.

Los resultados de la caracterización y de la metodología propuesta describen las características del objeto de estudio y pueden ser introducidos en temas de algunas asignaturas de las carreras Ingeniería Mecánica y Metalurgia.

Valor Práctico:

La aplicación de la tecnología propuesta permite:

1. La recuperación de retroexcavadora hasta obtener parámetros de explotación.
2. Estabilizar la extracción de mineral de níquel y minimizar los impactos ambientales.
3. Reducción de la magnitud de las inversiones.
4. Disminución de las importaciones.
5. Perfeccionar la tecnología de recuperación de partes y piezas para industria minera.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El recargue o relleno superficial consiste en la aplicación de una capa de metal sobre una superficie de trabajo (Burgos 1996, 1987). Este método se emplea tanto para la producción de nuevas piezas como para recuperar aquellas que se han desechado por haber perdido sus dimensiones originales o la propiedad requerida en la superficie (Dumovic, 2003). En todos los casos se trata de aportar a la superficie rellena determinadas propiedades de resistencia. El efecto económico que se obtiene indudablemente está dado por el volumen de metal que se requiere depositar con características especiales respecto al volumen total de la pieza y la vida útil que este garantice.

La selección del tipo de aleación de recargue a depositar en una determinada superficie depende de las condiciones de trabajo a que está sometida la pieza a rellenar (Lincoln Procedure Welding Handbook. 2000, Dumovic, 2003)).

Esto implica determinar con la mayor exactitud posible el mecanismo de desgaste que está presente en las condiciones de servicio en función de seleccionar el sistema aleante conveniente y así contrarrestar su efecto destructor sobre la superficie.

Mientras que los resultados finales producidos por el desgaste son similares, las causas que los producen son diferentes, por lo tanto, es esencial entender los mecanismos involucrados antes de realizar la selección del material de recargue para determinado elemento de máquina o el procedimiento a utilizar para su reparación o fabricación (en el caso de piezas bimetálicas).

Con respecto a los tipos de desgaste, hay que plantear que diferentes autores aprecian el estudio de los fenómenos de desgaste en dependencia de criterios propios (Morales, 2006 y Rodríguez 1992), presentándose generalmente distintos esquemas de clasificación, siendo muy común encontrar la que los divide en abrasión, adhesión, altas temperaturas, corrosión, fatiga superficial (rodadura) y cavitación.

La abrasión es el mecanismo de desgaste más común en las piezas metálicas. Según Cruz (2007) y Burgos (1996) el 50% de los elementos de máquinas en la industria, las máquinas agrícolas de la construcción y el transporte fallan por desgaste, aunque en la mayoría de los casos se presente una combinación de dos o más mecanismos.

Es común encontrar que electrodos de recargue superficial destinados a aplicaciones frente al desgaste se clasifican generalmente según la dureza del metal que depositan; sin embargo, hay que tener en cuenta que la dureza sólo da una indicación muy relativa de la resistencia al desgaste. Un metal depositado más duro que otro puede resultar menos resistente al desgaste.

También puede ocurrir que recargues que presenten la misma dureza a menudo registren comportamientos disímiles. Lo que está claro es que la micro estructura es la propiedad determinante en la resistencia frente a determinados tipos de desgaste (Burgos, 1996).

En un depósito de recargue ésta quedará establecida por la composición química de la aleación (lo que a su vez dependerá del número de capas) y los ciclos térmicos a que quede sometido, lo que está influido por la temperatura máxima que alcance, el depósito, la velocidad de enfriamiento a partir de ésta o el período de tiempo de la aleación en determinados rangos de temperatura (que a su vez depende de la cantidad de calor aportado, la geometría de la pieza a recuperar, la técnica de cordoneo, las propiedades termo físicas del metal base y la temperatura de éste en el momento de la realización del depósito).

No obstante a lo anteriormente planteado, la norma AWS A5.13 del 2000 clasifica las aleaciones para recargue base hierro según su composición química y en función de esta la recomienda para el recargue frente a determinados ambientes de desgaste.

El presente capítulo tiene como objetivo:

Establecer el estado de arte y sistematizar el conjunto de conocimientos que existen en relación con el tema abordado para fundamentar la investigación.

1.2 Fundamentos del desgaste en los metales

Rabinowicz (1995) clasifica los desgastes en cuatro formas fundamentales: desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, desgaste corrosivo y desgaste por fatiga superficial.

En las piezas metálicas, el desgaste se puede definir como una pérdida gradual del metal ocurrida en un cierto tiempo y mediante un mecanismo que actúa sobre éste. Cuando la pieza o partes de la misma se deforman o se desgastan de tal manera que no puedan trabajar adecuadamente, se deben reemplazar o reconstruir. Por lo tanto, es esencial entender dichos mecanismos involucrados antes de realizar la selección del material de recargue a utilizar.

Los mecanismos de desgaste primario y secundario se encuentran distribuidos en la industria en las proporciones indicadas en la tabla 1:

Tabla 1. Distribución de los tipos de desgaste en la industria (Rabinowicz 1995)

Mecanismo de desgaste	Proporción de casos (%)
Abrasión	50
Adhesión (metal-metal)	15
Altas temperaturas	8
Corrosión	5
Otros	22

La clasificación de los tipos de desgaste incluye factores mecánicos, térmicos y químicos se realiza de la forma siguiente:

1.2.1. Desgaste por abrasión en equipos de laboreo minero

Es una acción esmeriladora causada por sólidos abrasivos deslizantes que rozan y pulen una superficie:

a) Abrasión pura o de baja tensión: Es el resultado de una acción de socavación provocada por pequeñas partículas, tales como arena, polvo o tierra. Una variación de este tipo de desgaste es la erosión, que ocurre cuando

partículas arrastradas por un movimiento rápido de aire o líquido golpean el material. Un movimiento abrasivo produce virutas de metal.

b) Abrasión de alta tensión: Es un desgaste que agrega una fuerza de compresión a la abrasión de baja tensión.

c) Abrasión por desgarramiento: Este desgaste combina la abrasión de alta tensión con impacto, produciendo deformación plástica dentro del metal base.

1.2.2. Desgaste por adhesión (metal-metal)

Caraballo (2003), hace un análisis exhaustivo del mecanismo micro y macro-estructural del desgaste adhesivo.

Según este autor, el desgaste adhesivo se produce cuando dos superficies metálicas se rozan entre sí, generando de este modo calor. La resistencia al deslizamiento tiene dos causas: las microsoldaduras temporales entre las aristas sobresalientes de ambas superficies y las trabas que se producen por deformaciones y diferencias por la dilatación que genera el propio rozamiento. En este caso, se desgarran pequeñas porciones de la superficie, lo que causa daños de importancia. La fricción se origina por la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que experimentan los metales en contacto al moverse uno sobre otro. Esta resistencia al movimiento depende de las características de las superficies.

Caraballo (2003), W. N. Kaszezejew y W. M. Glazkow, al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, confirmaron que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales. Esta teoría explica la resistencia por la interacción entre puntos de contacto y la penetración de las asperezas y establece que la fricción depende de los factores siguientes:

- la interacción molecular (adhesión) de las superficies
- la interacción mecánica entre las partes.

La fuerza de resistencia que actúa en una dirección opuesta a la dirección del movimiento se conoce como fuerza de fricción. Existen dos tipos principales de fricción: fricción estática y fricción dinámica. La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema.

Existen tres leyes de la fricción:

1. La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal.
2. La fuerza de fricción es independiente del aparente área de contacto entre las superficies deslizantes.
3. La fuerza de fricción es independiente a la velocidad de deslizamiento.

Los modos de desgaste, no suelen presentarse de forma aislada, sino conjuntamente y aún en etapas sucesivas, dependiendo de las condiciones de trabajo a que está sometida la pieza (Caraballo, 2003). La acción conjunta de los distintos tipos de desgaste conduce a la destrucción del estado superficial del material o la pieza.

El desgaste metálico y abrasivo están caracterizados por el deslizamiento y arranque de la superficie metálica, la única diferencia radica en que uno ocurre entre metales y el otro con un abrasivo metálico o no metálico; por lo que el modo de acción será análogo en los dos casos. En el primer instante del funcionamiento, se caracteriza por la destrucción mecánica de las asperezas, que son despuntadas hasta un aumento de la superficie real de contacto y hay un reparto suficiente y regular de la carga.

Este es el período más difícil del rodaje, debido a los efectos dinámicos de choque, entre las asperezas y los efectos térmicos de calentamiento microlocalizado. El gradiente térmico creado da lugar a la dilatación diferencial de la pieza y como consecuencia a la creación de tensiones y además disminuye el límite elástico. Todo esto puede dar lugar a un período en el que el deterioro de la superficie puede llegar a ser elevado o mantenerse dentro de los límites captados en dependencia de la resistencia del metal a choques térmicos.

Luego de la destrucción mecánica de las asperezas en el caso de que las cargas sean pequeñas y exista fricción, siempre habrá cizalladura y las débiles microsoldaduras formadas se rompen en la misma entrecara sin desgarrar los metales presentes. Se trata de un deterioro mecánico debido a las interacciones atómicas o moleculares, en la que sólo hay que cortar una transferencia de metal de molécula a molécula. En este caso el desgaste es pequeño. Si uno de los metales del par de fricción es más blando,

generalmente la ruptura no tiene lugar en la entrecara sino en gran proporción en el metal más blando y solo ocasionalmente en el más duro.

Ahora bien, si las cargas son importantes con fricción, durante el deslizamiento se produce arrastre y acumulación de material delante de las asperezas, aumentando las áreas de contacto, las microsoldaduras son muy densas y se acumulan esfuerzos crecientes hasta el deterioro total de la superficie, sin regeneración posible, haciendo inservible la pieza.

En el caso de sobrecargas y fricción pura, la elevación de la temperatura en la zona de contacto producida por todas estas resistencias mecánicas, alcanza valores que pueden producir transformaciones estructurales deseables o no, y cuyo efecto sobre el desgaste, puede ser importante. Si se logra en el proceso de fricción una estructura de martensita con un 5 -10 % de austenita retenida, el desgaste será pequeño.

Lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean, esto se traduce como un aumento de la acritud en las subcapas del material.

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material.

1.2.3. Desgaste por temperatura

Influye sobre estructuras endurecidas por tratamiento térmico, reblandeciéndolas. Esto puede causar cambios de fase que incrementen la dureza y fragilidad, y puede acelerar el ataque químico, tal como la oxidación y exfoliación.

1.2.4. Desgaste por corrosión

Es el deterioro de un metal como consecuencia de una reacción química o electroquímica con el medio.

1.3 Corrección de los efectos del desgaste

Existen varios métodos de corrección de los efectos del desgaste. De todos ellos, el recargue es el más difundido. El recargue antidesgaste en la capa superficial tiene por objeto, no solamente reconstituir la pieza usada, sino también aumentar su resistencia. El metal depositado es, entonces, diferente al metal base.

Estos recubrimientos se efectúan en dos casos generales:

- En una pieza nueva, en las dimensiones deseadas para que, después de recubierta y trabajada, puedan obtenerse las dimensiones exigidas para la pieza (recargue preventivo)
- En una pieza usada que se desea volver a poner en servicio, después de haberla revestido de un metal mejor capaz de resistir el desgaste posterior (recargue de reparación)

De acuerdo con Cary y Helzer (2005), el interés que representa el recargue antidesgaste se explica fácilmente. En la actualidad, el fabricante dispone de una abundante selección de aceros y aleaciones especiales capaces de crear piezas de toda especie destinadas a trabajar en condiciones muy severas. Sin embargo, estos materiales son cada vez más caros, muchas veces de una elaboración compleja y, en general, insuficientemente dúctiles para poder construir enteramente las piezas de que se trata. Por consiguiente, limitando su empleo a aquellos lugares especialmente sujetos al desgaste, es decir, recargando localmente por medio de estas aleaciones especiales aceros ordinarios baratos y dúctiles, se llega a una solución mucho más económica, al mismo tiempo que se reducen los tiempos muertos necesarios para la sustitución de la pieza usada.

Sería fácil seleccionar una aleación de recargue si todos los componentes metálicos estuvieran sujetos solamente a un mecanismo de desgaste, pero, usualmente, se produce una combinación de dos o más factores (Pástor, 2002). Esta situación hace que la selección de la aleación sea más complicada, por lo que se aconseja elegir el mismo recargue en una situación de compromiso entre cada uno de los diferentes mecanismos de desgaste. El

análisis inicial debe centrarse en el proceso de desgaste principal y, luego, se deben considerar los secundarios.

1.4 Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura

Según (Lajtin, 1973; Guliaev, 1983 y Pero-Sanz, 2000), los aceros al carbono representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería. Son aleaciones Fe – C donde el contenido de carbono no supera el 1,00 %, el manganeso no supera el 1,65 %, el cobre y el silicio no superan el 0,60 % y en los que el fósforo y el azufre aparecen solo como impurezas.

Plantea Callister (1999) que la característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. En estos aceros, los principales factores que afectan a sus propiedades mecánicas son el contenido de carbono y la microestructura.

Básicamente, la resistencia a la tensión, a la cadencia y la dureza, se incrementan al aumentar el contenido de carbono; por el contrario, la elongación, la reducción de área y la tenacidad disminuyen notablemente con dicho incremento. Dentro de este tipo de aceros se encuentran los denominados endurecibles por temple para los cuales el contenido de carbono debe ser al menos de un 0, 25%, aceros con un contenido de carbono aproximado a un 0,4 – 0,5 %, son usados ampliamente para la construcción de estructuras y diversas partes de maquinaria, como pernos, tornillos, ejes, engranajes (Bengton, 1991), debido a su alta resistencia mecánica, a su resistencia al desgaste a su elevada dureza y a sus favorables condiciones económicas como son su bajo coste y la garantía de abastecimiento (Várela, 2003).

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

- a) Gran cantidad de calor generado por el arco.
- b) Necesidad de empleo de fundentes.

- c) Uso de electrodos de materiales reactivos.
- d) Incompatibilidad (en ocasiones) de las propiedades mecánicas del metal de aporte y el metal base.

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

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

Todo lo anterior conlleva a unas pobres propiedades mecánicas de la unión soldada.

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

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

1.5 Características del acero AISI 4140

Clasificación

Acero aleado al cromo molibdeno para temple, de mediana templabilidad.

Efectos de los elementos de aleación

Cromo (Cr):

El cromo es un elemento de aleación menos costoso que el níquel y forma carburos simples (Cr_7C_3 y Cr_4C) o carburos complejos $[(\text{FeCr})_3\text{C}]$. Estos carburos tienen alta dureza y buena resistencia al deterioro. El cromo es soluble hasta 13% en hierro gamma y tiene solubilidad ilimitada en ferrita alfa. En los aceros de bajo carbono, el Cr tiende a entrar en solución incrementando de esta manera, la resistencia y la tenacidad de la ferrita.

Molibdeno (Mo):

El molibdeno es un elemento de aleación relativamente costoso, tiene una solubilidad limitada en hierros gamma y alfa, y es un fuerte formador de carburos. Además ejerce un fuerte efecto de templabilidad y, de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Los aceros con molibdeno son menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, que los demás aceros aleados.

Los aceros al Cromo-Molibdeno (serie 41xx) son relativamente baratos y poseen buenas características de endurecido profundo, de ductilidad y de capacidad para soldarse.

1.5.1 Formas de suministro

Este acero se surte en forma de palanquillas y barras para forja, barras en estado laminado, estirado y/o tratado térmicamente y en rollos.

1.5.2 Aplicaciones

Se ha empleado ampliamente en elementos de máquinas de responsabilidad, para recipientes sujetos a presión, partes estructurales de los aviones, ejes de automóviles, piezas forjadas y/o mecanizadas que se usan en estado templado y revenido, como por ejemplo, bulones de alta resistencia.

1.5.3 Propiedades

Punto crítico superior $\text{Ac}_3 = 793\text{ }^\circ\text{C}$.

Punto crítico inferior $\text{Ac}_1 = 749\text{ }^\circ\text{C}$.

Coeficiente de dilatación térmica en estado recocido (promedio $\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Entre 0 y 100°C = 11,2

Entre 0 y 300°C = 12,4

Entre 0 y 500°C = 13,6

Maquinabilidad

En estado:

Estirado en frío = 66%

Laminado en caliente y recocido = 56%

Soldabilidad

Carbono equivalente máximo = 0,89%

Propiedades de templabilidad

Templabilidad: Bainítica.

Diámetro crítico ideal 99% M = 60,9 mm

Diámetro crítico ideal 50% M = 106,9 mm

Diámetro crítico real H = 0,5 (aceite) 99% M = 29 mm

50% Martensita = 67 mm.

Diámetro crítico real H = 1,0 (agua) 99% M = 39 mm

50% Martensita = 85 mm

Composición química por colada (en % del peso, según Bengton, 1991)

Carbono (C): 0,38 – 0,43

Manganeso (Mn): 0,75 – 1,00

Silicio (Si): 0,20 – 0,35

Azufre (S): 0,040 máximo

Fósforo (P): 0,035 máximo

Cromo (Cr): 0,80 – 1,10

Molibdeno (Mo): 0,15 – 0,25

Temperaturas de Tratamiento (°C)

Forja: 1000 – 1200

Normalizado: 870 – 925

Recocido: 815 – 870

Recocido de globulización: 755

Temple: 830 – 860 con enfriamiento en aceite

Revenido: Según características requeridas

Tabla 2. Propiedades Mecánicas del acero AISI 4140 (según Bengton, 1991)

Estado	Límite de fluencia (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Dureza			Alargamiento (%)
			HB	HV	HRC	
Laminado en caliente	680	1030	311	326	33	15
Normalizado	670	1020	311	326	33	17
Recocido	380	650	192	202	-	25

Equivalencias

Los aceros que se indican a continuación satisfacen aproximadamente las características indicadas del acero AISI 4140: SAE 4140, DIN 42 CrMo, AFNOR 42 CD 4 y BS 708 A 42

1.6 La soldabilidad de los aceros

Según Rodríguez (1983); González (1978) y 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, el método de fusión, existencia de impurezas, el 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 cuánto varían las propiedades del metal al soldar bajo determinadas condiciones. Es posible establecer cuánto 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).

La falla catastrófica de buques durante la II Guerra mundial, el fenómeno del agrietamiento de las soldaduras y la soldabilidad de los metales fueron incluidos en las prioridades de los investigadores (Baker et al, 1970). Las investigaciones resultantes en estos fracasos se extendieron más allá de la calidad de las juntas soldadas reales por abarcar los numerosos factores, incluso el ambiente, las condiciones de operación y las consideraciones de tensiones residuales.

La multiplicidad de este estudio es una ilustración importante de cómo la definición de soldabilidad debe abarcar mucho más de la calidad mecánica de la junta soldada. Los factores adicionales a ser considerados incluyen los efectos de ambiente, fatiga, y corrosión de tensión. Soldabilidad, entonces, es un término cualitativo que puede definirse como la facilidad con que se logra una junta satisfactoria utilizando procesos de soldadura dentro de un rango de condiciones de servicio. (Séferiam, 1966 y Rodríguez, 1983)

La soldabilidad generalmente estudia la diferencia entre el agrietamiento en caliente y el agrietamiento en frío. El agrietamiento en caliente es un término asociado con la fractura al solidificar el metal de la soldadura, mientras el agrietamiento en frío abarca el agrietamiento del metal solidificado.

1.7 La soldadura SMAW en la recuperación de piezas

En la soldadura por arco de metal protegido (Shield 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 (Cisilino, 2002).

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 (Meriño, 1999). Aun cuando la principal función del arco consiste en proveer el calor necesario para fundir al metal, también cumple otras funciones importantes para el éxito de una soldadura.

El arco puede ajustarse para transferir metal fundido desde el electrodo hasta la pieza de trabajo, para remover películas superficiales que pudieran existir sobre la pieza de trabajo, y promover reacciones complejas entre la escoria, el metal base, y el gas protector de tal forma que se puedan crear cambios metalúrgicos significativos en la junta.

Según Easterling (1992), a medida que avanza el electrodo 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.

1.8 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); Easterling (1992), que las pérdidas por oxidación de los elementos útiles como el carbono en los aceros y 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 micro metalurgia 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 gas de protección, fundentes o de la composición del revestimiento del electrodo). En el caso de los aceros, estas pérdidas son en general consecuencia de la reducción del óxido de hierro por los elementos componentes del acero.

1.9 Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)

Las modificaciones estructurales pueden agruparse en dos grupos según Rodríguez (1983); Guliar (1978) y Bailey (1995); las que afectan el grano del metal y 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).

1.10 Modificaciones estructurales y físico – químicas 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.

Los 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 ZIT en el metal base donde ocurrirán modificaciones alotrópicas dando origen a toda una serie de estructuras que pueden ir desde el semitemple del tipo bainítico, hasta el hipertemple totalmente austenítico. Estas modificaciones variarán en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (Barreiro, 1966; Bakker y Horetrydt 1968).

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 poder determinar los cambios en la estructura en la ZIT.

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 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.

1.11 Fenómenos Térmicos en la Recuperación de Piezas por Soldadura

Según Baek (2006) durante cualquier proceso de rellenado por soldadura, el establecimiento de los parámetros del régimen que garanticen un buen

resultado en cuanto a calidad del depósito y durabilidad de la piezas restauradas, está en función del metal base y la forma y dimensión de la pieza, la cuales definen la masa total que garantiza la fusión y el posterior enfriamiento de la zona rellena.

Es usual en la literatura especializada en soldadura, la determinación y(o) recomendación de los parámetros de relleno en función de las capas que se quieran depositar, los materiales de aporte recomendados y, en última instancia, el espesor del metal base.

Esto es totalmente válido si de uniones de piezas se trata; pero si por el contrario, el uso de los métodos de soldadura se dirige al relleno de superficies con el proceso, por lo general, más demorados, donde lo fundamental son las propiedades de la capa depositada y no la resistencia a la unión, entonces hay que comenzar a tener en cuenta aspectos tales como: condiciones de frontera (forma general de la pieza) y posibles variaciones estructurales que pueden ocurrir y ocurren por calentamiento extensivo de las piezas durante el relleno con múltiples pasadas.

1.11.1 Fundamentos de la transferencia de calor en la soldadura

En el proceso de soldadura la energía suministrada por arco eléctrico u otra fuente de calor, se utiliza para fundir el metal base y de aporte, la distribución de temperatura en el cuerpo sometido a relleno será responsable de las variaciones de las estructuras que se obtengan y de la aparición de defectos que invaliden o no el uso de la pieza recomendada.

Las estructuras obtenidas y los defectos permisibles definen las propiedades mecánicas de los recubrimientos y de las piezas en si.

Las temperaturas que se alcanzan en las diferentes zonas de las piezas dependerán, en última instancia, de la conductividad térmica y de las condiciones de transmisión del calor con el ambiente y de la forma y la posición relativa de la pieza que se va a rellena. Todo lo anterior lo recoge la física como problema de campo en la transmisión del calor y gracias a ello se puede analizar como sistema los aspectos materiales-forma-régimen.

Los problemas de campo y en especial, de temperatura, están definidos por sistemas de ecuaciones en derivadas parciales, en los cuales están presentes

El calor producido durante el proceso de soldadura viene dado por la ecuación 1:

Donde:

U: Voltaje (V).

V: Velocidad de deposición (m/s).

Claro está, la ecuación (1), en su forma simplificada, explica como fuente de calor el arco eléctrico, al cual está dirigida, fundamentalmente, esta sección, por ser este el más difundido de los métodos de soldadura. No obstante, la fórmula de la variación de la transmisión del calor es válida para cualquier otra fuente de energía, y los análisis a los que aquí se arriben pueden servir de referencia segura al estudiar cualquier método de soldadura.

El estudio y comprensión de los fenómenos térmicos y las nuevas tecnologías se pueden aplicar en el amplio mundo de la soldadura. El objetivo es brindar a tecnólogos y especialistas las herramientas básicas que les permitan reflexionar sobre la vital importancia que para la obtención de un buen

resultado tecnológico tiene, la selección adecuada del régimen, métodos y condiciones de rellenado por soldaduras.

La ecuación diferencial que gobierna las condiciones del calor en un sólido anisotrópico tiene la forma siguiente:

(Luikov, A.V.; Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies, Pergamon Press, New York, USA (1966).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q = \mu_c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

La ecuación (2) se puede simplificar para el caso de los cuerpos isotrópicos, que, por lo general, son más comunes en problemas de soldadura; aunque se debe aclarar que en caso de soldaduras heterogéneas los análisis que posteriormente se harán, se deben relacionar con la ecuación (3) y no con su simplificación:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Analizando los términos de manera independiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

La ecuación (4) brinda la variación de la temperatura en función de la distancia y la integración de estos términos determina la variación de la temperatura en función de la forma del campo sometido a la acción de una fuente de calor.

Q: Cantidad de calor de la fuente de energía

K: coeficiente de conductividad térmica del material.

α : Coeficiente de difusividad térmica $\alpha = \frac{k}{c}$ que depende también del tipo de material.

$\frac{\partial T}{\partial t}$: Variación de la temperatura en función del tiempo.

metal de base, de este, 10% va a la raíz y el 45% del calor restante pasa al interior de la pieza por conducción.

De ahí la importancia que reviste la adecuada selección de la polaridad a la hora de utilizar, de forma beneficiosa, la distribución del calor en la recuperación. Cuando la polaridad es invertida es menor la cantidad de calor sobre la pieza, menor dilución, menor pérdida de propiedades.

1.13 Determinación de las variables para el método de SMAW

A continuación se exponen los fundamentos que rigen los procesos de determinación de las variables, según Cary y Helzer (2005). Según especificación del código ASME QW-251.2, las Variables Esenciales son aquellas en las cuales un cambio, que se describe en las variables específicas, es considerado que afecta las propiedades mecánicas del conjunto soldado, y requiere recalificación de la Welding Process Specification (WPS)

Las Variables No Esenciales, según especificación del código ASME QW-251.3, son aquellas en las cuales un cambio, que se describe en las variables específicas, puede ser hecho en la W.P.S sin recalificación. Es el metal de base la primera variable esencial de cualquier proceso de recuperación de pieza por soldadura. El cambio de este y su forma obligan a calificar nuevamente el proceso, pues la conductividad térmica al variar, altera los fenómenos térmicos del proceso de soldadura. La determinación de la composición química, la estructura y la dureza de la superficie que se va a rellenar, brindan una información elemental sobre los posibles tratamientos y explotación de las piezas y será la información que sirva para la selección adecuada del metal de aporte. La forma constituye también una variable esencial pues de esta dependerá también la transmisión del calor y, por tanto, el enfriamiento más o menos rápido de la zona fundida.

El metal de aporte es otra variable esencial del proceso de rellenado por soldadura. De ella dependerá, en gran medida, la cantidad de calor necesario para su fusión. Por la importancia del calor que se produce en el proceso de soldadura en el arco eléctrico, es que constituyen variables esenciales la corriente, el voltaje y la velocidad de soldadura, especialmente en piezas sometidas a resiliencia. Estas tres variables permiten alguna variación sin tener

que calificar el proceso nuevamente. Esto explica la forma de presentación de los parámetros del régimen en la mayor parte de la literatura especializada que da rango para los diferentes métodos y diámetros de alambres o electrodos.

Sin embargo, la correcta selección de las variables esenciales no siempre garantiza la calidad del metal depositado. Existen un grupo de variables no esenciales que tienen un peso decisivo en la calidad del metal depositado y están relacionadas con las condiciones ambientales o de contorno a la zona que se va a rellenar. Lograr un proceso isotérmico es, prácticamente, la aspiración máxima de los estudiosos de la soldadura y es por ello que la mayoría de las recomendaciones existentes para los diferentes materiales, aparecen la temperatura entre pasadas como un importante parámetro. Mantener estable la temperatura entre pasadas, ya sea alta o baja en relación con el tipo de aporte que se haga, está en función de las condiciones de frontera (temperatura ambiente, posición relativa de la piezas, corriente de fluidos), donde se debe equilibrar la cantidad de calor que se aporta en la soldadura con la cantidad de calor que se disipa al medio ambiente o a la pieza misma.

Es este uno de los motivos fundamentales que provoca que regímenes probados en un lugar, no tengan igual comportamiento en otro y es por ello que las transferencias tecnológicas no se pueden realizar solamente como una transacción comercial, sino que requieren de investigación y prueba en cada lugar. En este sentido el código ASME establece que la calificación de los procesos sea considerada en cada lugar.

La calificación de los procesos establece en sí la validación que permita con una combinación determinada de variables esenciales y no esenciales, con el equipamiento real, los operarios y materiales que se utilizan, comprobar la calidad del depósito por soldadura.

1.14 Aparición de estructuras frágiles durante la recuperación

Durante la recuperación de piezas de aleación Fe-C que posean un carbono equivalente mayor de un 25%, existe la probabilidad de aparición de la estructura martensítica durante el enfriamiento en la zona de influencia térmica (Baek et al, 2003). Por lo general, los elementos de máquinas se elaboran de

materiales con un carbono equivalente superior. En el momento del aporte del material, existirá un alto gradiente térmico entre el punto de aportación y el resto de la pieza.

En las proximidades de la zona de aportación, el material base sufre la transformación de su red cristalina: pasa de cúbica centrada en el cuerpo correspondiente al Fe- α y a la cúbica centrada en las caras del Fe- γ . Inmediatamente que esto ocurre, el carbono, precipitado en forma de carburos, comienza a disolverse. Si el enfriamiento se produce lentamente se regresará a la estructura perlítica y precipitará el carbono en exceso en forma de carburos.

De no tomarse precauciones durante el enfriamiento puede sobrepasarse la velocidad crítica de temple. Ello implica que la variación de la red cristalina se efectuará, pero el carbono no se podrá difundir quedando atrapado en el interior de la red. La estructura de la red que se obtiene no será cúbica, sino tetragonal, característica de la martensita. Las tensiones internas se incrementarán y la tendencia al agrietamiento será alta. La forma de contrarrestar este fenómeno revincula con el empleo de un precalentamiento, reducir la velocidad de enfriamiento o un tratamiento térmico posterior a temperatura de 180 a 650 °C, según la composición química y la complejidad geométrica de la pieza. Otra de las razones por la que se puede producir agrietamiento se relaciona con la precipitación y coalescencia de fases de alta dureza como los carburos, boruros y nitruros.

1.15 Principales causas de los defectos en la recuperación

Como todos los procesos físicos, la obtención de la perfección es prácticamente imposible, por lo que la cantidad de piezas reacondicionadas por soldadura, estará determinada por el límite de los defectos permisibles por las sollicitaciones que tenga la pieza en su funcionamiento y la capacidad de trabajar sin que se produzca el fallo de ésta. Es por ello que los críticos de la aceptación o rechazo de piezas reacondicionadas estarán en función no sólo de los clásicos criterios de aceptación de las uniones soldadas, sino en función del funcionamiento y papel relativo de la pieza reacondicionadas en el mecanismo o agregado donde trabaja.

En la mayor parte de los manuales dedicados al tema de la soldadura, los autores dedican un capítulo a los defectos que se producen en el proceso de soldadura y cómo atenuarlos. Por ello a continuación se presentan los aspectos que en el caso de la recuperación de piezas, pueden constituir las fuentes más importantes de defectos, cuya influencia puede llegar a impedir que se alcancen las propiedades de explotación requeridas.

1.15.1 Agrietabilidad

En los procesos de recuperación por métodos de soldadura, resulta imprescindible el análisis riguroso del sistema pieza- material de aportación- régimen del proceso, con vistas a lograr la menor afectación del material base, los niveles más bajos de tensiones durante el proceso y el control adecuado de las transformaciones estructurales que necesariamente ocurrirán (Baker et al, 1970).

La aparición de fisuras o grietas, durante o después del proceso, indicará, generalmente, dificultades en las definiciones tecnológicas asumidas.

El ciclo térmico durante la soldadura se caracteriza por su alta velocidad de calentamiento y enfriamiento, el desplazamiento de la temperatura máxima del proceso en la zona de la pieza y un corto tiempo de permanencia de los materiales base y de aportación en las temperaturas superiores a la de la fusión. El perfil térmico específico estará determinado por las características de la pieza y el proceso seleccionado para su recuperación.

Las dendritas crecen en forma elíptica, según la forma isoterma de cristalización. La composición química varía de una dendrita a otra y puede existir en los espacios interdendriticos acumulación de elementos aleantes o impurezas. Estas micro segregaciones dendríticas se incrementan cuando el material aportado posee composición química diferente al material base, cuestión común en el reacondicionamiento de piezas. Este fenómeno toma su mayor magnitud en la primera pasada.

Durante el proceso que acompaña el cambio de estado aparecen, además, defectos en la red cristalina entre los que se destacan las dislocaciones. Ellas influyen en la concentración de elementos aleantes e impurezas a su alrededor.

Según Baker et al (1970), otros factores importantes que se deben tomar en consideración durante la solidificación del depósito, son las diferencias volumétricas que aparecen, las cuales provocan deformaciones estructurales que incrementan el nivel tensión.

Todos estos aspectos pueden originar la aparición de grietas a causa de que tanto la resistencia, como la plasticidad de los materiales metálicos a temperaturas cercanas a la línea de sólidos, son bajas. Estos factores pueden resultar agudos según sea el diseño del elemento de máquina que se va a recuperar.

La forma más efectiva de contrarrestar este tipo de agrietamiento es mediante la utilización de precalentamiento, cuya temperatura dependerá, fundamentalmente, de la composición química de los materiales.

El calentamiento que recibe la pieza durante su recuperación por método de soldadura, puede originar la aparición de fisuras a causas de la transformaciones estructurales que ocurren en la zona de influencia térmica. En la franja afectada por el calor tiene lugar la cristalización de la estructura, el envejecimiento así como la aparición de fases de gran fragilidad. Para evitar la ocurrencia de la factura en estos casos, resulta, importante determinar las condiciones de enfriamiento, o los tratamientos térmicos requeridos una vez concluido el proceso de rellenado (León 2004).

La presencia de hidrógeno procedente de la atmósfera cercana al arco, o de la humedad del revestimiento o fundente, se puede convertir en otra fuente de agrietamiento.

El hidrógeno reduce, en forma considerable, su solubilidad al pasar la aleación del estado líquido al sólido. Una parte abandona el depósito, pero otra se difunde en el metal y se aloja en los espacios interreticulares alrededor de las dislocaciones y de otros defectos estructurales. Esto introduce la fragilización por hidrógeno que conduce a una baja ductilidad y resistencia al impacto. Además, al pasar del estado atómico al molecular, el hidrógeno provoca presiones que superan las 10^5 atm (Flinn y Trojan, 1991), esto puede determinar la aparición de micro grietas en el material.

1.15.2 Porosidad

Según EL-Hebeary et al (2004), la porosidad en el depósito se deriva fundamentalmente de:

- Reacciones metalúrgicas que ocurren durante la soldadura cuyo productos aparecen en forma gaseosa.
- Insuficiente protección del baño metálico de los gases atmosféricos.
- Alta velocidad de solidificación determinada por los parámetros de soldeo.
- Los óxidos disueltos en la aleación líquida, provenientes del revestimiento o del fundente, pueden reaccionar con componentes del metal base y dar origen a la aparición de gases. Tales es el caso en los aceros, de la presencia del monóxido de carbono, producto de la reducción de óxidos metálicos provocados por el carbono de la matriz. Este gas da origen al CO_2 que puede quedar atrapado en el depósito y crear porosidad.

La solubilidad de los gases atmosféricos, por lo general, decrece sensiblemente con la solidificación de la aleación metálica. Si el cambio de estado se produce rápidamente no podrá abandonar el depósito, lo que da origen a la presencia de poros en el material.

La aparición de una porosidad que supere los límites permisibles implica reanálisis de los parámetros seleccionados del proceso, así como la forma de secado del material de aportación.

1.16 Atenuación de las fallas en la soldadura de recuperación.

Según Folleto Recuperación de piezas por el método de Soldadura, CIME, Grupo Científico Técnico- Técnico, 1996, los depósitos sanos con porosidad mínima, libres de escorias y ausentes de agrietamiento, se logran con regímenes adecuados en los que se tenga en consideración la adecuada selección del método y los parámetros de soldeo, las características del metal de base y los de aportación, así como las condiciones de frontera analizadas. En este complejo problema la atenuación de las fallas se vinculan, íntimamente, con los tratamientos térmicos empleados antes, durante y después del depósito.

En la recuperación de piezas, por lo general se enfrenta el problema de realizar el depósito en un material destinado a un elemento de máquina de responsabilidad. Este hecho en los aceros se relaciona con contenido medio y alto de carbono y generalmente con la presencia de elementos aleantes. En tales casos existe alto riesgo de aparición de estructura martensítica en la zona de influencia térmica. Este peligro se agudiza por el desplazamiento que tiene lugar en las curvas de transformaciones de la austenita durante el enfriamiento continuo, que trae aparejado una reducción de la velocidad crítica de temple. Desde el punto de vista práctico esto significa que el recargue actúa en el material como si se le incrementara el carbono y los elementos aleantes a la superficie de la piezas que se recuperan. Este factor, entre otros, otorga considerables ventajas económicas a estos procesos, siempre que se logre la correcta definición de la tecnología (Dumovic, 2003).

En forma general se puede afirmar que el pre calentamiento se utiliza cuando resulta necesario preparar la estructura de la pieza que se va a recuperar para el rellenado. Con ello se atenúa el peligro del agrietamiento. Si el nivel de dureza alcanzado en esta zona no supera los 300 HV existe baja probabilidad de agrietamiento. En la recuperación de piezas elaboradas de materiales difíciles de soldar tanto el precalentamiento, como la reducción de la velocidad de enfriamiento después del proceso, revisten fundamental importancia (Bálsamo, 1995).

En ocasiones no basta precalentar, sino que requiere mantener la temperatura durante el proceso o a veces se requiere volver a ella inmediatamente después del depósito (Cruz y Scotti, 2007). En otros, sin embargo, será necesario un calentamiento adicional una vez finalizado el rellenado. En la selección de una u otra variante las características de las piezas representan un importante papel.

Realizar el depósito con precalentamiento, representa para el soldador condiciones muy difíciles de trabajo; por ello es recomendable emplear dos soldadores o más con vistas a su utilización en forma alternada, sin perder la temperatura requerida.

El poscalentamiento es empleado, con frecuencia, en la recuperación de piezas cuando se requiere:

- Aliviar tensiones después de la recuperación.
- Mejorar la estructura obtenida del relleno.
- Alcanzar las sollicitaciones de servicios requeridas del elemento de máquina, no alcanzable con el depósito.

Recocido de alivio de tensiones

Las piezas se someten a un calentamiento entre 600 y 650 °C, con tiempo de mantenimiento en el orden de los 3 o 4min/mm de espesor en la sección rellena, o en la que se considere más crítica. El enfriamiento debe ser lo más lento posible, preferiblemente en horno o con un control estricto.

Normalizado

Las piezas se calientan unos 50 °C por encima de la temperatura de transformación austenítica. El tiempo de mantenimiento se calcula sobre la base de 2 min/mm de espesor y se enfría al aire tranquilo (sin corriente)

Termomejoramiento

Para el termomejoramiento de uniones soldadas, se pueden emplear dos variantes:

- a. La pieza se someten a temple y revenido en condiciones normales para la marca de acero en cuestión. En este caso el material de aportación, por lo general, resulta similar al metal de base.
- b. Después del depósito se someten las piezas a un calentamiento por encima de los 550 °C, o entre los 200 y 300 °C, en dependencia del material de aporte. Esto se emplea cuando el material de relleno sufre el temple en el momento del depósito y solo requiere un revenido final, o también cuando el mecanismo de endurecimiento se realiza por precipitación de segunda fase que se disuelve durante el relleno.

En cada caso se deberán tomar las precauciones necesarias para evitar la oxidación o decarburación de la superficie. De no contarse con un horno que permita controlar la atmósfera, se pueden emplear diversos medios como son el carbón vegetal o las limallas de hierro fundido.

Existe también la posibilidad de mejoramiento de las propiedades del depósito, empleando pasadas múltiples. En este caso, cada capa trata térmicamente a la anterior. Con ello se logra afinar la estructura, exceptuando la última capa, la cual por lo general, se elimina con el maquinado final. Claro que esta variante solo será recomendable cuando por las características del elemento de máquina o las condiciones de taller disponibles, no resulten posibles regímenes de calentamiento de mayor homogeneidad.

Transformaciones durante la explotación de las piezas recuperadas

Cuando la pieza es sometida a explotación, en su superficie de trabajo pueden aparecer con el tiempo transformaciones en la estructura de las capas superficiales que traen aparejado el deterioro. Al incrementarse el desarrollo de estos fenómenos se provoca la salida de estos elementos. Los procesos de recuperación mediante soldadura permiten, en amplio rango, restablecer las propiedades perdidas. Son empleados en contrarrestar el deterioro superficial, comúnmente en magnitudes que superan las décimas de milímetros y además posibilitan abordar la aparición y desarrollo de las grietas (Bálsamo et.al, 1995).

Según Buchely et. al (2005), las transformaciones superficiales poseen carácter diverso. Las hay de carácter mecánico, donde la interacción de las irregularidades superficiales representa el papel principal. También se desarrollan fenómenos de tipo térmico que tienen como origen la variación superficial de la temperatura de las partes en contacto. Finalmente, se manifiestan las transformaciones fisicoquímicas, que pueden llevar a la aparición de nuevos elementos estructurales o la desaparición de otros.

En el desarrollo de este fenómeno influyen, en forma determinante, factores relacionados con las características del propio elemento de máquina como pueden ser: la rugosidad superficial, la estructura del material, el tipo de interacción con el medio o pieza conjugada y otros. Estas transformaciones también las pueden acelerar o frenar elementos como: temperatura de trabajo y características de los parámetros de explotación.

La superficie original irá transformándose en el transcurso de la explotación y pueden aparecer variaciones de su geometría, de sus propiedades químicas, de su dureza, de su estructura y del estado tensional. Finalmente, la superficie

de trabajo resultará dañada en dependencia de los factores que más han influido en el tipo de deterioro. En la mayor parte de los deterioros, se encuentran presentes las deformaciones plásticas.

La capa deformada, por lo general, no sobrepasará la magnitud de varias décimas de milímetros (Janecki, 1969). La práctica tecnológica recomienda la eliminación de esa fina capa durante la preparación superficial de la pieza que se va recuperar, puesto que la aparición de los mecanismos de deformación, obstaculizan el restablecimiento de las propiedades de la pieza.

De no eliminarse, existe el peligro al aportar material metálico, de que estos mecanismos continúen actuando sobre la capa e influyendo, en forma determinante, en el comportamiento de la vida útil de las piezas recuperadas.

Particularidades tecnológicas en la aplicación de los recargues

En la mayoría de los casos son necesarias consideraciones especiales para el recargue que no son requeridas en la soldadura de unión ni en la soldadura de reconstrucción, por ejemplo, la búsqueda de una menor dilución, sobre todo, cuando se trata de aceros de medio o alto contenido de carbono, de secciones gruesas o sometidas a esfuerzo.

En el recargue se prefieren los menores amperajes posibles, menores diámetros de electrodos y la menor velocidad de soldadura, con vistas a aminorar la entrada de calor al metal base y fundir la menor cantidad de este. Es indispensable la identificación del material base para elegir el procedimiento de soldadura más adecuado. Si no se conoce el contenido de carbono aproximado del acero y si las piezas tienen algún tipo de tratamiento de superficie, lo más indicado sería un análisis de laboratorio. Si esto no resulta hay que recurrir a ensayos prácticos. Con los ensayos de durezas se comprobará también si existe una diferencia apreciable entre el valor de la dureza en la superficie con relación al lugar de la piezas analizadas, lo que es un indicador de la existencia de algún tipo de tratamiento.

La actividad minera y el uso de las excavadoras en el Grupo Empresarial Cubaníquel

La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad. Casi desde el principio de la edad de piedra, hace 2,5 millones de años o más, ha

venido siendo la principal fuente de materiales para la fabricación de herramientas. Se puede decir que la minería surgió cuando los predecesores de los seres humanos empezaron a recuperar determinados tipos de rocas para tallarlas y fabricar herramientas. Al principio, la minería implicaba simplemente la actividad, muy rudimentaria, de desenterrar el sílex u otras rocas. A medida que se vaciaban los yacimientos de la superficie, las excavaciones se hacían más profundas, hasta que empezó la minería subterránea (Fritzsche, 1965; Heise y Herbst, 1943; Herrera, 2006; Rzhevsky, 1987).

Todos los materiales empleados por la sociedad moderna han sido obtenidos mediante minería, o necesitan productos mineros para su fabricación. Puede decirse que, si un material no procede de una planta, entonces es que se obtiene de la tierra. Incluso las otras actividades del sector primario — agricultura, pesca y silvicultura— no podrían llevarse a cabo sin herramientas y máquinas fabricadas con los productos de las minas. Cabe argumentar por ello que la minería es la industria más elemental de la civilización humana.

Los métodos de minería se dividen en cuatro tipos básicos. En primer lugar, los materiales se pueden obtener en minas de superficie, explotaciones a cielo abierto u otras excavaciones abiertas. Este grupo incluye la inmensa mayoría de las minas de todo el mundo. En segundo lugar, están las minas subterráneas, a las que se accede a través de galerías o túneles. El tercer método es la recuperación de minerales y combustibles a través de pozos de perforación. Por último, está la minería submarina o dragado, que próximamente podría extenderse a la minería profunda de los océanos (Galabru, 1962; López-Pedraza, 1957, Luengo, 1970 y Henschen y Okonek, 2005).

En Cuba uno de los métodos más utilizados para la industria niquelífera es el proceso de extracción del mineral a cielo abierto, donde sus inicios están en la perforación de la roca y luego se traslada en camiones a través de las excavadoras $\exists 4 A6/45$ de carga frontal.

Estas excavadoras $\exists 4 A6/45$ se consideran como una máquina única, calculada para el servicio a largo plazo con accionamiento eléctrico, de tipo

que camina, de giro completo (360°) que permite el movimiento de tierra a través de su composición con equipos de dragalina. Está destinada fundamentalmente para la excavación de los suelos de categoría I a IV. Los valores bajos de presión del terreno, tanto cuando está operando y trasladándose, en combinación con la elevada maniobrabilidad, facilitan a la excavadora ser utilizada en suelos blandos y en condiciones de trabajo restringidas como es el caso de nuestro municipio, Moa, donde las precipitaciones son abundantes y dificultan el laboreo minero.

Conocer y conservar estrictamente los requerimientos de ingeniería y las técnicas de prevención de riesgos, tanto financieros como técnicos-operacionales, le permitirá a la entidad y al país lograr la optimización de los planes de extracción que es la garantía de la producción de la fábrica Cdte. Ernesto Che Guevara.

Para garantizar una operación segura del equipo y de su operador debe cumplirse:

- Que la excavadora sea operada correctamente (que se evite sobrecargas innecesarias y movimientos superfluos del cubo).
- Que toda la maquinaria sea atendida de manera minuciosa y oportuna.
- Que toda la maquinaria sea debidamente lubricada en el tiempo debido de conformidad con las indicaciones contenidas en las Instrucciones de operación.
- Que todos los mecanismos y los equipos que hayan perdido la operación normal de sus componentes debido al desgaste o flojedad sean ajustados de manera oportuna.
- Que las partes desgastadas sean reemplazadas en el tiempo oportuno.
- Que todos los tipos de reparaciones (rutinario y capital) se realicen en el tiempo debido de acuerdo con los programas de mantenimiento elaborados en las instalaciones del usuario.

- Que la excavadora se utilice de acuerdo con el propósito para el cual está destinada.

Por tanto se le confiere gran importancia al uso y mantenimiento correcto de estos equipos para su explotación en la actividad minera (Henschen y Okonek, 2005). En el caso que se analiza, los ejes de giro de las retroexcavadoras $\exists 4$ A6/45 son un importante elemento a considerar y preservar durante su funcionamiento.

Estos elementos fallan debido al desgaste de los dientes durante la explotación; lo que origina inestabilidad operativa con los consiguientes daños a la economía de la empresa producto a los altos costos que lleva la reposición, además de afectar el plan de producción por las interrupciones operacionales. Sin embargo, aún no se han reportado trabajos previos de recuperación de estos elementos.

Conclusiones del Capítulo I

1. La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente en la calidad de una superficie recargada por lo que la validación de la inexistencia de este defecto es un aspecto a tener en cuenta en cualquier Welding Process Specification que se emplee. Con el equipamiento real, los operarios, los materiales que se utilizan teniendo en cuenta siempre las condiciones de frontera.
2. Los ejes de giro debido al desgaste que aparece en los dientes durante la explotación de los mismos están presentando inestabilidad operativa trayendo como consecuencia grandes daños a la economía de la empresa producto a los altos costos que lleva la reposición , además de afectar el plan de producción.
3. La bibliografía consultada, aporta información sobre la recuperación de piezas por rellenado por el método SMAW así como las diferentes variables que hay que tener en cuenta al elaborar un procedimiento para realizar un depósito sin defectos y con propiedades semejantes al metal de base; pero en ninguna se aborda el tema relacionado con el comportamiento de depósitos de soldadura realizado con electrodos autentico (U.T.P-68 HH) y electrodo ferrito-perlitico (U.T.P-6020) sobre acero laminado A.I.S.I 4140.

CAPÍTULO 2. MATERIALES, MÉTODOS Y CONDICIONES EXPERIMENTALES

2.1. Introducción

Para asegurar los regímenes de producción continua de la Empresa “Comandante Ernesto Guevara”, es de suma importancia la estabilidad en el funcionamiento de las excavadoras de mineral. Esto motiva la necesidad de tener una tecnología de restauración de los dientes de los ejes de giro que asegure el buen funcionamiento y la restitución de la vida útil de los elementos, así como la resistencia del material a elevadas cargas con valores comparables a los ofrecidos por el fabricante.

La realización de experimentos ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de averías en elementos y equipamientos industriales y es por ellos que se requiere de la realización de los mismos para tales propósitos.

En este capítulo se plantea como objetivo:

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

2.1. Establecimiento del plan experimental

2.1.1. Método de soldadura a aplicar

Se selecciona el método de soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido (Shield Metal Arc Welding, SMAW). Este es un proceso de soldadura relativamente sencillo y versátil, factible de aplicar en cualquier lugar y posición.

2.1.2. Variantes a aplicar

En este caso, se seleccionan dos variantes:

VARIANTE A	VARIANTE B
Recargue con electrodo austenítico U.T.P-068HH sin precalentamiento	Recargue con electrodos ferrito-perlíticos U.T.P-642 y U.T.P-6020 con precalentamiento.

2.1.3. Procedimientos y parámetros a utilizar

Los procedimientos y parámetros a utilizar se seleccionaron según lo establecido por el código ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2010. Se tuvieron en cuenta, además, los patrones de calidad para el análisis y establecimiento de parámetros de control y aceptación según las normas:

ASME QW-251.2: Variables Esenciales

ASME QW-251.3: Variables No Esenciales

QW-253-1: Norma para simulación de los defectos y los procedimientos de recargue.

QW-402.16: Juntas (Preparación de la superficie)

QW-403.20: Metal base

QW-404.12: Metal de aporte

QW-405.4: Posición

QW-406.4: Pre calentamiento y temperatura entre pasos

QW-407.6: Tratamiento térmico posterior

QW-409.4. Características eléctricas

QW-410.38: Técnica (Múltiple o capa simple)

2.1.4. Obtención de bloques para la simulación de defectos de soldadura

Según el Código ASME QW-253-1, para la simulación de soldaduras de recargue en defectos de piezas voluminosas, se establece el relleno en cavidades o canales estandarizados que simulen los defectos.

Se elaboraron dos bloques de acero AISI-4140 de dimensión 500 x 300 x 185 a partir de una barra laminada fabricada en España por la firma GONIO que se extrajo del almacén de la Empresa Ernesto Che Guevara, de las cuales se tomaron una para la variante (A) y una para la variante (B).

2.1.5. Verificación de la composición química del material de los bloques

Se comprobó la composición química de los bloques para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigar. El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro cuántico de masa Belec Compact Port (Mobile Spectrometer for Metal Análisis) con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el laboratorio de corrosión de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. A cada espécimen se les aplicaron 3 chispazos separados uno del otro. Finalmente se toma una media de los resultados obtenidos por las chispas y se realiza una comparación para verificar si los valores se encuentren dentro del rango establecido.

2.1.6. Simulación de defectos según las dos variantes seleccionadas Código ASME

Los canales de defectos se elaboraron con una fresadora del tipo 6T82SH fabricada en la antigua URSS. El corte se realizó con una fresa de vástago de acero rápido P18 de tres diámetros diferentes 30,15 y 6 y número de dientes 6, 4 y 2 respectivamente. Los defectos simulados en las probetas A y B se elaboraron con abundantes refrigerantes con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad de rugosidad superficial utilizando los parámetros de corte normado.

Dimensiones de los defectos simulados:

Variante A

A1= 150 x 60 x 20 mm

A2= 60 x 30 x 15 mm.

A3= 60 x 30 x 15 mm

Variante B

B1= 150 x 60 x 20 mm

B2= 60 x 30 x 15 mm.

B3= 60 x 30 x 15 mm

Los defectos simulados en forma de canales en las probetas con la denominación A1 y B1 representan configuraciones de canales más largos y profundos y están separados de los demás, como se muestra en los Anexos 1, 2, 3 y 4. Asimismo, Los defectos simulados en forma de canales en las probetas con la denominación A2, A3 y B2, B3 representan configuraciones de canales más pequeñas donde las tensiones que surjan durante el proceso SMAW interactúan mutuamente y fueron simulados de esa forma intencional (ver Anexos 1, 2, 3 y 4).

2.1.7. Defectoscapía capilar a los defectos

Se aplicaron ensayos de defectoscopía capilar (líquido penetrante) en los canales maquinados para rellenar con electrodos austenítico y ferrito-perlítico y simular las soldaduras.

2.1.8. Establecimiento de los parámetros y tecnologías de soldadura según Código ASME

2.1.8.1. Cálculo del carbono equivalente

Considerando la composición química establecida por el estándar, se debe conocer la influencia de los elementos de aleación en la templabilidad de la unión soldada. Para ello, se calcula el carbono equivalente según la ecuación (6) (Séferiam, 1966 y Rodríguez 1987):

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

(6)

Donde:

Ceq - carbono equivalente; %

Mn - % de Manganeseo

Cr - % de Cromo

V - % de Vanadio

Mo - % de Molibdeno

Ni - % de Níquel

Cu - % de Cobre

Cuando los valores de $C_{eq} \leq 0,41$, no se requiere la realización de precalentamiento.

En cambio, cuando $C_{eq} > 0,41$, sí se requiere de la realización de precalentamiento y tratamiento térmico postsoldadura. En el caso que se analiza, existen dimensiones considerables (espesor) de la capa a recargar por el desgaste excesivo en los dientes de los ejes de giro (figura #1) y posibilidades de la transformación de la austenita en martensita bajo las condiciones de soldadura.

Estos factores pudieran incrementar los riesgos de agrietamiento en caso de existan altos valores de C_{eq} del acero. En tales casos, para obtener una unión soldada homogénea se requieren, como medidas especiales especificadas por la norma, aplicar procesos adicionales de precalentamiento y tratamiento térmico.

2.1.8.2. Cálculo de la temperatura de precalentamiento

Existen numerosos métodos propuestos para determinar o estimar la necesidad de precalentar en el proceso de soldadura. Estos métodos consideran algunos o todos los factores que influyen en la fisuración en frío como son composición química del acero, difusión de hidrogeno, calor portado, espesor del metal de base, tensiones residuales en la soldadura y resistencia de la junta (Quesada 1988).

Para determinar la temperatura de precalentamiento real para el material de los bloques, es necesario conocer el Carbono Equivalente, calculado según la ecuación (7) (Séferiam, 1966 y Rodríguez 1987), sobre la base de la base de la composición química del material a soldar:

$$T_{\text{prec}} = 350\sqrt{CT - 0,25} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .$$

.7)

Donde:

CT = Carbono Total

$$CT = C_Q + C_E \quad (8)$$

Donde:

C_Q = Carbono químico de la composición química

$$C_Q = C \frac{Cr + Mn}{9} + \frac{Ni}{8} + \frac{Mo}{13} . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .$$

.(9)

C_E = Carbono equivalente del espesor

$$C_E = 0,005 \times e \times C_Q .$$

.(10)

Con e = espesor del diente a recargar, mm

$$e = 30 \text{ mm}$$

El precalentamiento se efectuará con llama oxiacetilénica y el control de la temperatura con un pirómetro óptico digital.

2.1.8.3. Caracterización de los electrodos a utilizar en ambas variantes

La composición química y propiedades mecánicas de los electrodos utilizados, se muestran en la tabla 1, según Organización-Bohler Thyssen Soldaduras, S.A. (2006). Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de los electrodos utilizados.

TIPOS DE ELECTRODOS	CARACTERÍSTICAS
UTP-068 HH (ENiCrFe-3; DIN 1736: EL-NiCr19Nb)	Electrodo austenítico, de alto contenido de Ni, estabilizado con Nb. Composición: C < 0,05 %; Si < 0,59 %; (4-6) % Mn; (18-22) % Cr; 67 % Ni; Mo < 0,2 %; Ti < 0,5 %; Nb (2-2,5) %; Fe (2-4) %. Propiedades: $\sigma_T > 620$ MPa; $\sigma_{0,1} > 320$ MPa; $\delta > 35$ %; $a_{K(20)} > 80$ J; $a_{K(-196)} = 65$ J.
UTP-642 (DIN E4343 B10)	Electrodo ferrito-perlítico básico. Composición: 0,1 % C; 0,7 % Mn; 0,2 % Si. Propiedades: $\sigma_T = 440-540$ MPa; $\sigma_{0,1} > 320$ MPa; $\delta = 26$ % min.
UTP 6020 (AWS E-110 18M; DIN EY 6257 Mn2NiCrMoB))	Electrodo ferrito-perlítico de alta resistencia bajo en hidrógeno. Composición: 0,06 % C; 1,6 % Mn; 0,4 % Si; 1,8 % Ni; 0,3 % Cr. Propiedades: $\sigma_T = 765-845$ MPa; $\sigma_{0,1} > 665$ MPa; $\delta = 18$ %; $a_{K(-40)} = 51$ J.

2.2. Procedimiento tecnológico del relleno de los defectos en los bloques según las tecnologías diseñadas para las variantes A y B

Durante cualquier proceso de rellenado por soldadura, el establecimiento de los parámetros del régimen que garanticen un buen resultado en cuanto a la calidad del depósito y durabilidad de la pieza restaurada, está en función del metal base, de la forma y dimensiones de la pieza, las cuales definen la masa total que garantizará la fusión y el posterior enfriamiento de la zona rellenada.

Es usual en la literatura especializada en soldadura, la determinación y/o recomendación de los parámetros del régimen rellenado, en función de la capa que se quiera depositar, los materiales de aporte recomendados y, en última instancia el espesor del material base.

Esto es totalmente válido si de uniones de piezas se trata, pero si, por el contrario, el uso de los métodos de soldadura se dirige al relleno de superficies con procesos, por lo general, más demorados, donde lo fundamental son las

Para los estudios de estos fenómenos y poder establecer las diferencias que existen entre la soldadura de construcciones y la utilizada para el reacondicionamiento de piezas, se basará el análisis en los fenómenos de la transferencia del calor en la soldadura como forma de relacionar el metal base, la estructura constructiva y los parámetros del régimen.

Se utilizó electrodo UTP 068 HH depositando siete capas con diferente diámetro de electrodo sin precalentamiento. Para calcular la intensidad de corriente se utiliza la formula empírica (Burgos, 1987).

Donde

D = Diámetro del electrodo (mm)

Tabla 2. Parámetros reales para la soldadura SMAW

# de capas	D (mm)	I (A)	Espesor de capa (mm)	Tipo de electrodo
1	2.4	71.56	2	UTP-068 HH
2	2.4	71.56	2	UTP-068 HH
3	3.2	115.44	3	UTP-068 HH
4	3.2	115.44	3	UTP-068 HH
5	4.0	176.00	4	UTP-068 HH
6	4.0	176.00	4	UTP-068 HH
7	3.2	115.44	3	UTP-068 HH

El espesor de cada capa depositada se determinó haciendo mediciones sucesivas durante el proceso de rellenado con la utilización de un pie de rey de profundidad. Independientemente de que esta variante no utiliza precalentamiento, el proceso como tal produce un calor aportado (Q_a) que es un factor que ejerce un efecto determinante en las propiedades del depósito de recargue, debido a que establece el nivel de dilución que se obtendrá en el mismo.

En una aplicación determinada como el recargue, este calor no es necesariamente el mismo que el requerido en la soldadura estructural; los productos para la soldadura de recargue aportan un cordón o una superficie localizada de metal con el fin de contrarrestar determinadas condiciones de trabajo que afectan el funcionamiento y la pieza, por lo que requieren suficiente calor de aplicación para obtener una fusión adecuada con el metal base. La mezcla entre los dos metales debe minimizarse.

Si se utiliza mucho calor aportado durante la soldadura de recargue se diluirá la aleación

de aporte con el metal base, por lo que se reducirá la efectividad de las propiedades de resistencia al desgaste del material. Por otra parte, el calor excesivo causa la evaporación de elementos aleantes y la oxidación del metal de aporte. Para calcular el calor aportado utilizaremos la expresión (12) (Burgos,1996.)

$$Q_a = \frac{I_s \cdot U_a}{V_s} \cdot \eta \quad (\text{KJ/mm}) \quad (12)$$

Donde:

Q_a = Calor aportado

I_s = Corriente de soldadura

U_a = Voltaje

V_s = Velocidad

η = Eficiencia térmica del proceso Smaw 50-85% (Seferian 1966)

De la ecuación (12) se desprende que el calor aportado aumentará con el incremento de la intensidad de corriente y el voltaje de soldadura, siendo esto contrario para un incremento en la velocidad de soldadura. Este último parámetro del régimen en la soldadura manual es realmente difícil de controlar, dependerá fundamentalmente de la habilidad del soldador, así como de la corriente, la polaridad y el tipo de electrodo que se esté utilizando. En el caso del voltaje de soldadura éste va a ser fijado según el tipo de fuente y dependerá de la corriente y las características del consumible.

Los valores del voltaje y la velocidad de soldadura se toman de Alberta Apprenticeship (1997) y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para la soldadura SMAW.

# de capas	I (A)	d (mm)	voltaje (V)	Veloc. de sold. (mm/seg)	Qa (kJ/mm)
1,2	2.4	71.56	12-18	0.85-2.55	40.410
3, 4,7	3.2	115.44	12-18	0.85-2.55	65.189
5,6	4.0	176.00	16 -24	0.85-2.55	99.388

Las otras variables tanto las esenciales, no esenciales como las esenciales suplementarias para la especificación de este procedimiento (WPS) son especificadas en el QW-253.1 de la sección IX del código de Calderas y Recipientes a presión de la ASME, lo cual, con la aplicación de la metodología elaborada por Fernández et al. (2007), permitirá detallar el proceso tecnológico empleando la variante seleccionada.

Variante B: Relleno de soldadura SMAW con electrodo ferrito-perlítico del tipo UTP-642 y UTP-6020. Con precalentamiento a 315 °C.

La intensidad de la corriente se calcula con la ecuación (11) (Burgos, 1987) y el espesor de las capas por pasadas, se especifica en la tabla 3.

Tabla 3. Espesor de las capas variante (B) por método SMAW.

# de capas	D (mm)	I (A)	Espesor de capa (mm)	Tipo de electrodo
1	2.4	71.56	2	UTP-642
2	2.4	71.56	2	UTP-642
3	3.2	115.44	3	UTP-642
4	3.2	115.44	3	UTP-642
5	4.0	176.00	4	UTP-642
6	4.0	176.00	4	UTP-6020
7	3.2	115.44	3	UTP-6020

En esta variante tecnológica se aplica una capa de “amantequillado” realizada con electrodo UTP—642 donde los cordones 1 y 2 se hacen con diámetro de 2.4 mm para aportar el menor calor posible durante el proceso. Esto produciría un mínimo valor de la dilución que provoca que la capa resultante entre el metal de aporte y el metal base sea de propiedades mecánicas y composición química más apropiada al tener valores inferiores de carbono y menor valor de los elementos de aleación para el proceso de soldadura de las capas 3, 4 y 5 (capas intermedia) y las finales (capas de ataque) 6 y 7 elaboradas en este caso con electrodos duros UTP—6020.

Cada depósito fue seguido de una limpieza y golpes de martillo. El calor aportado se calcula de la misma forma que en la variante A (ecuación 7) y los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo del calor aportado

# de Capas	d	I	Voltaje (V)	Veloc. Sold (mm/seg)	Qa (Kj/mm)
1,2	2.4	71.56	12--18	0.85—2.55	40.410
3,4,7	3.2	115.44	12--18	0.85—2.55	65.189
5,6	4.0	176.00	16--24	0.85—2.55	99.388

Las variables para la especificación de este procedimiento (WPS) son especificadas en el apéndice QW-253.1 de la sección IX del código de Calderas y Recipientes a presión de la ASME. Ello permitirá detallar el proceso tecnológico empleado en esta variante.

2.3. Tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones

Una muestra de la variante B se sometió a un tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones con el objetivo de evaluar los efectos del tratamiento térmico post-soldadura en la dureza de las zonas de la junta. Para ello, se utilizó una mufla Tipo Nabarthern de 30-3000 °C bajo las condiciones siguientes:

- Temperatura de calentamiento: 650 °C
- Velocidad de calentamiento: 200 °C/hora
- Tiempo de permanencia: 1.5 hora.
- Enfriamiento en el horno hasta: 100 °C

2.4. Toma y preparación de las muestras

Terminado el proceso de soldadura en los defectos simulados en forma de canales y cumpliendo estrictamente con todas las variables recogidas en los WPS correspondientes a cada variante (A y B) se tomaron las probetas para obtener los especímenes de prueba por las líneas 1 y 2 (probeta A) y 4 y 5 (probeta B), conteniendo en ellas secciones transversales y longitudinales de los defectos soldados desde A1 hasta A3 y desde B1 hasta B3. La preparación de las muestras se hizo según la Norma ASTM E 3-95.

El pulido de las superficies se desarrolló según las Normas NC 10 - 56:86 y ASTM E3 – 95. Señalizaron operaciones de corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico. Las probetas se elaboraron con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidades superficiales. El desbaste a grandes rasgos consiste en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos.

El pulido se hizo siguiendo las normas ISO 9001 con los papeles abrasivos tipo 180, 400, 600 y 1000 con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para obtener una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL. Con

el objetivo de lograr el acabado final, se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

2.5 Limpieza y lavado de las superficies a investigar

Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades originadas en el maquinado, se limpió la superficie con agua tetracloruro de carbono. Una vez pulidas las probetas, se lavaron de nuevo con agua destilada, se secaron con papel de filtro y finalmente se lavaron con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasas o suciedades.

2.6 Ataque químico de las muestras

Una vez pulidas las muestras, estas se atacaron químicamente con el objetivo de resaltar la estructura obtenida. Para ello se empleó Nital al 5 % (solución de 5 ml de HNO_3 en 100 ml de Etanol), según lo especificado por ASTM E-262-Practice A. El tiempo de ataque sobre la superficie pulida fue de 15 segundos.

2.7 Análisis metalográfico

Para la observación de la micro estructura y homogeneidad de las muestras, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de corrosión de La Empresa Ernesto Che Guevara de Moa el cual está dotado de una ámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

Todos los especímenes de prueba fueron examinados en dirección perpendicular a la superficie de corte pudiéndose apreciar las zonas de metal fundido, zona de influencia térmica y la zona de metal base con sus características específicas. Los parámetros de radiación (tabla 5) se seleccionaron observando el incremento de la sensibilidad de las pruebas según los valores de prueba y variaron con el espesor de los especímenes de prueba.

Tabla 5. Parámetros de radiación

Espécimen	Espesor (mm)	voltaje (KV)	Corriente (mA)	Distancia focal (μm)
F1	11.0	130	5	900
F2	28.5	190	5	900
F3	11.0	130	5	900
A1	14.5	140	5	900
A2	14.5	140	5	900
A3	21.5	160	5	900

2.8 Medición de la dureza

Las mediciones de la dureza se realizaron con un medidor digital del tipo Inspection Technologies (Krautkramer mic 205) Microdur I I.

Conclusiones del capítulo II

- Se fundamentaron las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización de los principales factores que pudieran influir en el comportamiento del depósito en los ejes de giro de las Excavadoras Θ 4 A6/45 recuperados mediante soldadura SMAW.
- Se describen métodos y técnicas experimentales de investigación que serán aplicadas y están estructurados metodológicamente con un enfoque dialéctico, sistémico y controlado que posibilitan la ejecución ordenada del proceso investigativo.
- Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías y equipamiento que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción.

Después de establecidos el Estado del Arte y el conjunto de procedimientos, materiales, equipos y métodos de investigación a emplear, se procedió a la realización de los experimentos y la sistematización de los criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de la hipótesis planteada. Como consecuencia, se obtuvieron un grupo de resultados y regularidades que, a través del análisis y procesamiento de las mismas conjuntamente con los macro y micro análisis metalográficos y el comportamiento de la dureza con y sin tratamiento térmico, se complementan con la valoración económica del significado de la restauración de los ejes de giro para la fábrica en dos escenarios y su influencia en el impacto medioambiental. El objetivo del presente capítulo es:

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

3.2 Análisis químico

El promedio de tres análisis en puntos diferentes del acero que se utilizó para elaborar las probetas de ensayos de las variantes A y B se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Composición química de las muestras (% masa)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Σ Otros elementos	Fe
0,37	0,9	0,4	0,03	0,03	1,1	1,02	0,5	0,1	95,55

Como se observa, los valores de composición obtenidos se encuentran dentro del rango establecido para la aleación establecida en el epígrafe 2.2.2 del capítulo II. Se comprueba, así, que el material utilizado es un acero microaleado de medio contenido de carbono del tipo AISI 4140.

3.3 Carbono equivalente

Al sustituir los valores de los elementos reportados en la tabla 10 en la ecuación (6), se tiene que:

$$C_{eq} = 0,37 + \frac{0,9}{6} + \frac{1,1+0,5}{5} + \frac{1,02}{15} = 0,9$$

Este valor de carbono equivalente sugiere que el material patrón posee una mala soldabilidad, con templabilidad similar a la de un acero al carbono con 0,9 % de C. La presencia de Mn, Cr y Mo en la constitución del acero incrementan considerablemente su templabilidad (Rodríguez, 1983; Ashby y Jones, 1999) y, por ende, las posibilidades de obtener estructura martensítica en la zona afectada por el calor durante el enfriamiento después de la soldadura.

Debido a los altos valores de C_{eq} del acero, las dimensiones considerables (espesor) de la capa a recargar por el desgaste excesivo en los dientes de los ejes de giro (ver figura #1) y las posibilidades de la transformación de la austenita en martensita bajo las condiciones de soldadura, se comprueba que se requieren medidas especiales para obtener una unión soldada homogénea, consistentes en aplicar procesos adicionales de precalentamiento y tratamiento térmico.

3.4 Temperatura de precalentamiento

Para determinar la temperatura de precalentamiento, se procede al tratamiento de las ecuaciones (7), (8), (9) y (10) con sus respectivos parámetros. Luego, sustituyendo y efectuando, se tiene que:

$$C_Q = 0,37 \frac{1,1+0,9}{9} + \frac{1}{8} + \frac{0,5}{13} = 0,75$$

$$C_E = 0,005 \times 30 \times 0,75 = 0,11$$

$$CT = 0,75 + 0,11 = 0,86$$

$$\text{y finalmente, } T_{Prec} = 350\sqrt{0,86 - 0,25} = 273 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

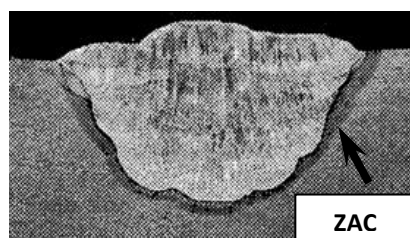
Según Quesada (1988), el método de cálculo de la temperatura de precalentamiento de Séferiam (1966) no tiene en cuenta la energía neta aportada por el proceso de soldadura y por esta razón, las temperaturas resultantes son superiores a las reales en aproximadamente 25 a 50 °C. Por lo tanto, al resultado de T_{Prec} obtenido se le adiciona 42 °C y finalmente la temperatura de precalentamiento para ambos bloques es de 315 °C.

3.5 Defectoscapía capilar

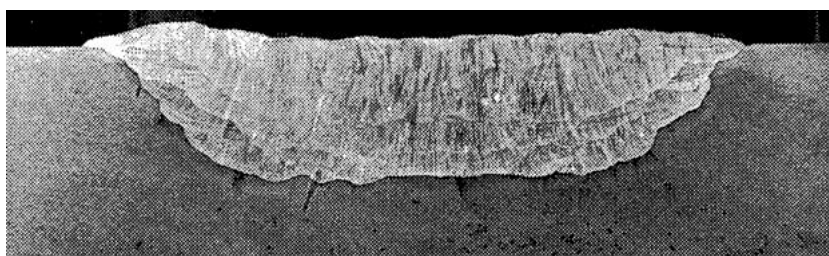
Los reportes de los Anexos 5 y 6 muestran los resultados de los ensayos de defectoscopía capilar con la utilización de líquido penetrante en los canales maquinados para rellenar con electrodos austenítico y ferrito–perlítico y simular las soldaduras. Las superficies se presentan con una homogeneidad adecuada, por lo que se acepta que la misma está libre de defectos y apta para el recargue utilizando las dos variantes seleccionadas.

3.6 Análisis macro y microestructural de la variante A

Las macrográficas de la figura 1 muestran la macroestructura típica de los especímenes recargados con variante A (electrodo austenítico). La flecha de la figura 1 a) indica la zona afectada por el calor ZAC.



a)



b)

Figura 1. Macroestructuras representativas de la soldadura empleando variante A.

El espesor máximo de la zona afectada por el calor es de aproximadamente 4 mm. La ZAC en la figura 1b) no se aprecia con nitidez por el insuficiente ataque del reactivo químico durante la preparación de la muestra. En ambos casos (sección transversal y longitudinal) se observan estructuras dendríticas superpuestas de las pasadas sucesivas del recargue. Estas dendritas se orientan desde la superficie del cordón de soldadura hacia el metal base. La dendrita es una estructura con ramificaciones repetitivas características de

procesos de crecimiento de cristales durante el enfriamiento del metal fundido. Su crecimiento influye sobre las propiedades que posee el material resultante.

Las micrografías de la figura 2 revelan la presencia de las microgrietas que se propagan desde el metal base hacia la zona del metal fundido. La flecha indica claramente cómo la boca de la macrogrieta del metal base es el germen de propagación de una microgrieta que se extiende hasta el interior del metal fundido; mientras que la microgrieta de la figura 2 b), con raíz en el metal base, apenas alcanzó el límite de la zona afectada por el calor con la del metal fundido.

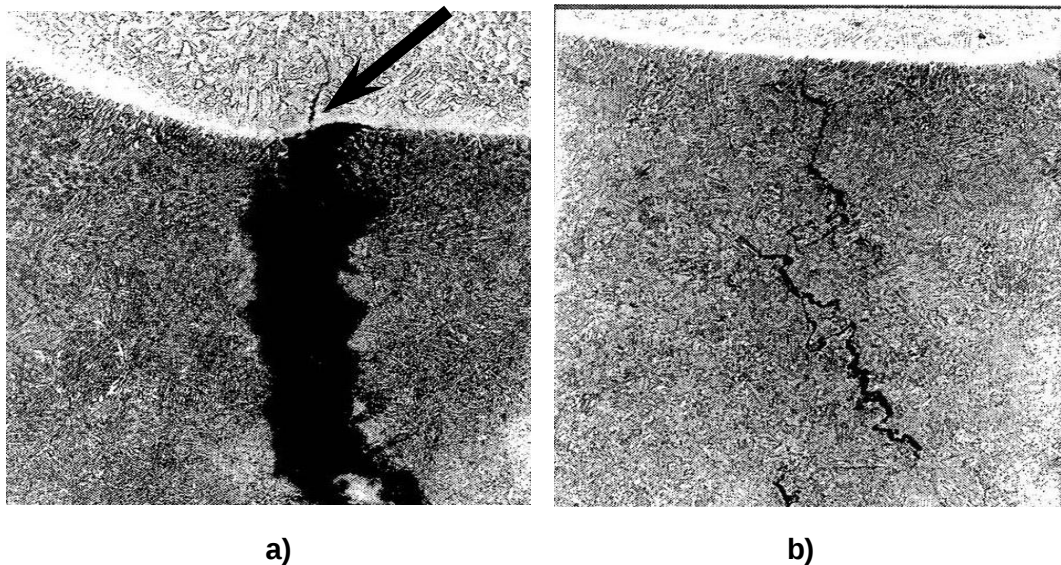


Figura 2. Microgrietas de soldadura en el metal base utilizando la variante A. 250 X

Estas micro y macrogrietas representan discontinuidades que originan la pérdida de la homogeneidad en el material. Los defectos de este tipo son inaceptables y representan indicaciones relevantes de focos de fallas suficientemente serias y ponen en duda la efectividad del recargue efectuado con la variante A.

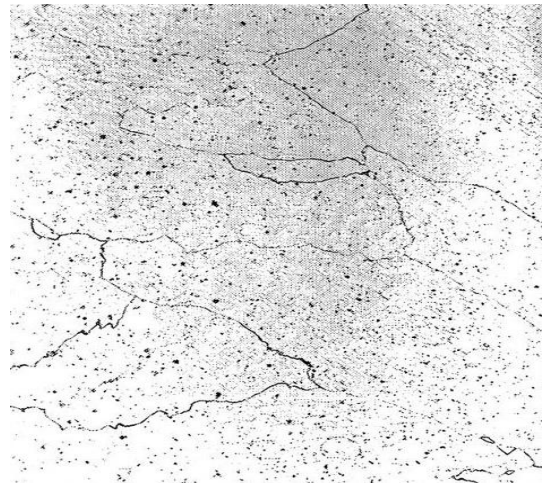
La ocurrencia de agrietamiento de la soldadura se atribuye a la diferencia de composición entre el metal base (AISI 4140) y el metal de aporte (E-NiCrFe-3). Debido a que la presencia de elementos de aleación Cr (1,1 %) y Mo (0,5 %) en el acero AISI 4140 es menor que en el metal de aporte, su conductividad térmica es mayor y por tanto, se enfría a mayores velocidades.

Ello provoca que los índices de contracción en el metal de aporte y el metal base sean diferentes y, por tanto, se produzcan tensiones locales, que cuando son superiores a la tensión de rotura del material originan la aparición de grietas, como las reportadas en la micrografía de la figura 2. Este resultado coincide con los reportados por Young (1994), Norton y Lippold (2003), Nisley y Lippold (2003) y Lippold (2005).

La estructura del metal recargado se muestra en las figuras 3 a) y b). Como se observa, existe una alta densidad de inclusiones donde, presumiblemente, también pudiera aparecer la delta-ferrita (ferrita- δ). Se identifican claramente los límites de las dendritas.



a)



b)

Figura 3. Microestructura característica del metal de aporte.

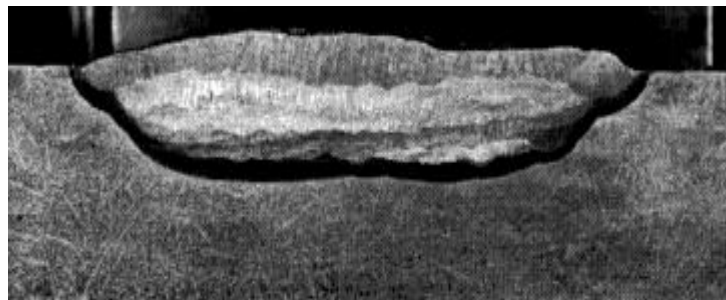
3.7 Análisis macro y microestructural de la variante B

La macroestructura típica de los especímenes recargados con la variante B se muestra en las figuras 4 a) y b). El espesor de la ZAC es similar al de la variante A, con espesores máximos de aproximadamente 4 mm.

En las pasadas sucesivas que componen el relleno se observan las dendritas de solidificación orientadas perpendicularmente menores que las de la variante A; sin embargo, las estructuras aciculares del metal base son mayores que las de la variante A.



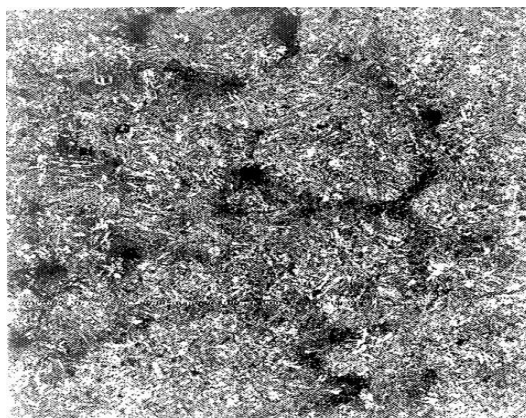
a)



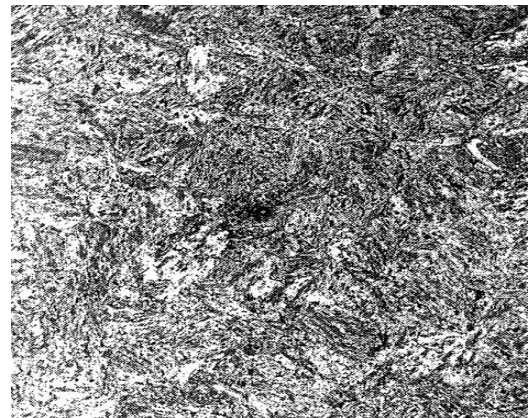
b)

Figura 4. Macroestructura representativa de la soldadura empleando variante B.

a) Corte transversal al eje del cordón, b) Corte longitudinal al eje del



a)



b)

Figura 5. Microestructura del metal base recargado con la variante B. 250 X

La microestructura típica del metal base del espécimen recargado con variante B se ilustra en la figura 5. Como regularidad más importante del análisis metalográfico, se destaca la ausencia de grietas y microgrietas en todos los especímenes.

Esta ausencia de agrietamiento de la soldadura en la zona de influencia térmica y el metal fundido se atribuye a los efectos de la composición del metal de aporte (UTP-642) de la capa colchón con el del metal base (AISI 4140).

En este caso, como se muestra en la tabla 4 (capítulo II) el electrodo UTP-642 aporta un metal fundido cuya estructura, después de la solidificación, es del tipo ferrito-perlítica de muy bajo porcentaje en carbono y libre de elementos microaleantes como el Cr, el Ni, el Mn o el Mo que pudieran desplazar las curvas de la transformación perlítica y ejercer efectos templantes que provoquen agrietamiento por transformaciones de fase.

Por otra parte, la ausencia de estos elementos microaleantes favorece la conductividad térmica de la junta y al facilitar la evacuación del calor de la zona de influencia térmica provoca la minimización de gradientes térmicos, la aparición de índices de contracción similares en el metal base y el de aporte y, por tanto, la reducción de tensiones térmicas y estructurales que originen agrietamiento.

En el metal base se observan estructuras aciculares en forma de plumas o placas de bainita como las que aparecen en la micrografía de las figuras 6 y 7.



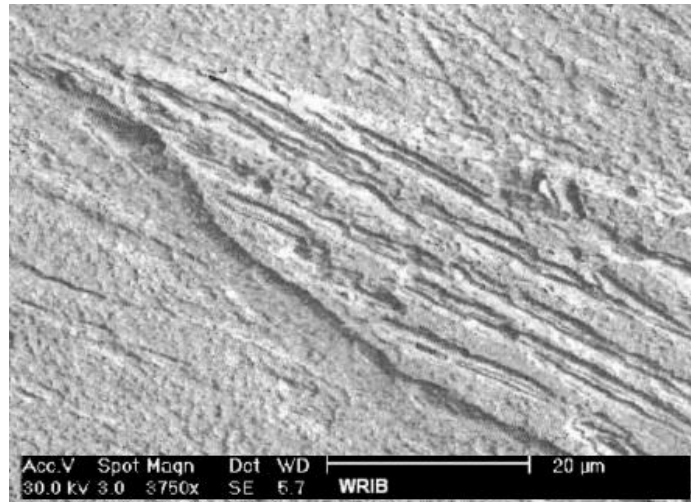


Figura 7. Estructura bainítica revelada en microscopio electrónico. 3750 X

Como se observa, la bainita detectada en el metal base consta de delgadas plaquetas de carburo orientadas, por lo general, paralelamente o perpendiculares a la longitud mayor de las agujas de ferrita que conforman la matriz. La naturaleza de la bainita detectada en el metal base obedece al incremento del número de pasadas de soldaduras, lo que provoca que las láminas de ferrita se hagan más delgadas y las placas de carburo se tornen más pequeñas y más estrechamente espaciadas, resultado que coincide con Alpsten (1970) y Ripling et al. (1982) y la caracterización de Avner (1995).

En la micrografía de la figura 8, se muestra la interfase metal base-colchón, libre de grietas.

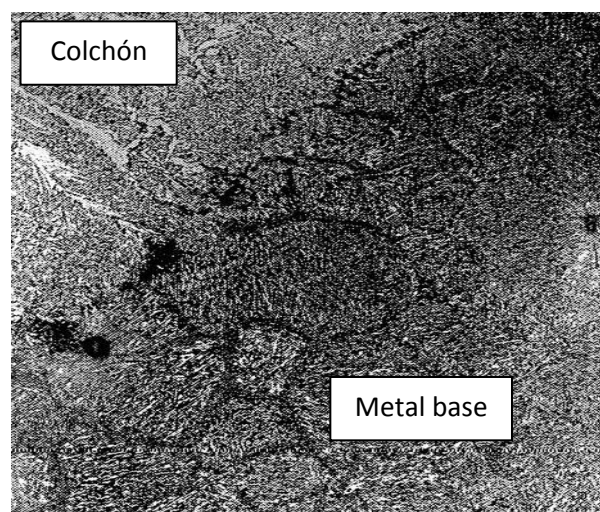


Figura 8. Microestructura característica de la interfase metal base-colchón. 250 X

En la zona metal base-colchón de la figura 8 se observa la presencia de granos equiaxiales del tipo bainítico (figuras 5 y 6) pertenecientes al metal base y ferrita de grano fino con pequeñas islas de perlita y el resto de ferrita acicular correspondientes al colchón.

En la figura 9 se muestra la estructura del relleno, donde se diferencian las pasadas sucesivas de los cordones realizados con electrodo UTP 6020. Las microestructuras de cada uno de los cordones se muestran similares, con ferrita de grano fino acicular y pequeñas islas de perlita en la intercara de las pasadas y ausentes de microgrietas.



Figura 9. Microestructura característica del relleno. 250 X

3.8 Análisis microestructural de la variante B con tratamiento térmico de alivio de tensiones

El recocido de alivio de tensiones puso de manifiesto la influencia del tratamiento térmico post-soldadura en la dureza de las zonas de la junta. En los tres casos: metal base, zona de influencia térmica y la zona del metal fundido, ocurrieron cambios en la microestructura como resultado de la recrystalización bajo los efectos de la temperatura, el tiempo de permanencia y las bajas velocidades de enfriamiento.

En la zona del metal base, con una estructura inicial del tipo bainítica, se obtuvo una estructura perlítica (figura 10); mientras que en las zonas del colchón y el relleno, las estructuras ferríticas finas, se transformaron a estructuras ferríticas más burdas.

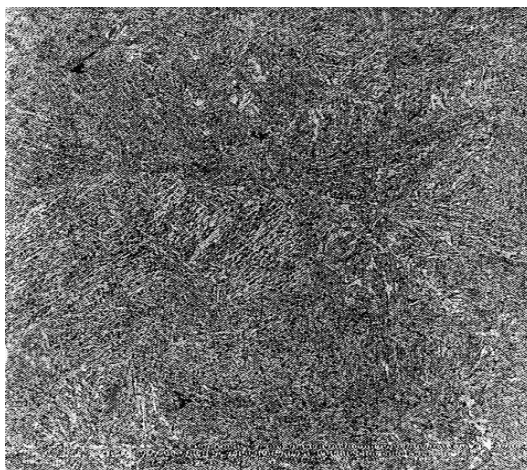


Figura 10. Microestructura característica del metal base con tratamiento térmico post-soldadura 250 X

3.9 Ensayos de Microdureza

Los valores de dureza practicados en las zonas de influencia térmica arrojaron picos elevados de durezas en las regiones cercanas a la zona de influencia térmica. Se observaron diferencias parciales en las durezas del metal soldado y el metal fundido.

Las diferencias en los valores medidos en las pasadas superiores del recargue de la variante B no son representativas, ya que la composición química y propiedades mecánicas del electrodo es comparable con el metal base, no ocurriendo así con la variante A (electrodo austenítico). A continuación se describen las principales regularidades del comportamiento de la dureza en ambas variantes.

3.9.1 Comportamiento de la dureza en los especímenes de la variante A

Las figuras 11, 12 y 13 muestran el comportamiento de las durezas medidas en superficies de corte paralelas al eje del cordón de soldadura para las diferentes zonas y capas analizadas según los datos de las tablas A1, A2 y A3 de los anexos 7 y 8.

Los perfiles de dureza en las zonas: superficial del relleno -incluye la superficie del cordón y sus correspondientes zonas de influencia térmica siguiendo la línea A, en la zona intermedia del relleno que incluye el metal base, la zona intermedia propiamente dicha y sus correspondientes zonas de influencia

térmica (por la izquierda y por la derecha) según la línea B y por último, en la zona paralela a la raíz del cordón que incluye el metal base, el colchón y sus correspondientes zonas de influencia térmica (por la izquierda y por la derecha) según la línea C.

Como se observa en la figura 11, para la probeta A1 (corte en el sentido longitudinal del cordón), la dureza en los puntos cercanos a la zona de influencia térmica (línea A) es superior a la dureza en el resto del depósito y alcanza valores de alrededor de 304 HV, mientras que el promedio de la dureza del relleno es de 247 HV. La distribución de la misma se puede considerar aproximadamente simétrica en cuanto a los valores alcanzados, lo que revela una homogeneidad en su comportamiento en relación con el eje geométrico del cordón, en correspondencia con la morfología de la microestructura observada en la figura 8.

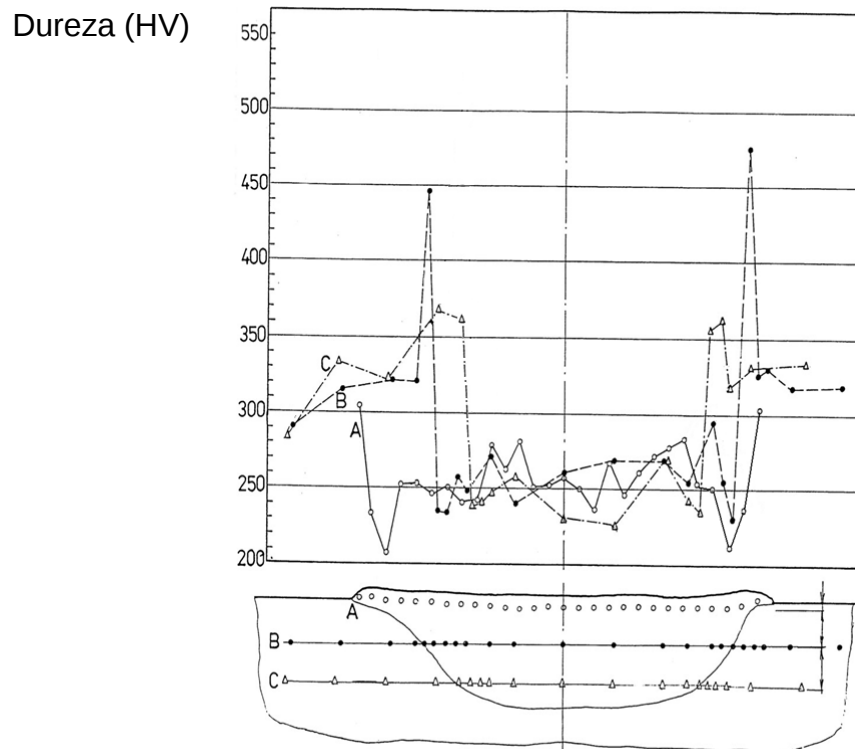


Figura 11. Comportamiento de la dureza en la muestra A1.

En la figura 11 también se observa un comportamiento aproximadamente simétrico de la dureza en la zona intermedia del relleno (línea B) que incluye el metal base, la zona intermedia propiamente dicha y sus correspondientes zonas de influencia térmica (por la izquierda y por la derecha). Los valores de dureza alcanzados zonas de influencia térmica son de 448 y 479 HV, con un

promedio de 463,5 HV; mientras que en la zona del metal base y el metal de aporte, ambas con una ley de comportamiento de dureza aproximadamente similar, el promedio es de 317,75 HV y 251 HV respectivamente. Los bajos valores de dureza en el metal de aporte o de relleno, obedecen a la composición y estructura del electrodo utilizado, en este caso, del tipo austenítico, que proporciona una dureza menor a la del metal base y la zona de influencia térmica.

Así mismo, el perfil de dureza en la zona paralela a la raíz del cordón (figura 11, línea C) que incluye el metal base, la superficie del colchón y sus correspondientes zonas de influencia térmica (por la izquierda y por la derecha) revela que el promedio de la dureza alcanzada en las zonas de influencia térmica es de 370 HV y 357,5 HV respectivamente; mientras que en la zona del metal base y el metal fundido, ambas con una ley de comportamiento de dureza aproximadamente similar, el promedio de dureza es de 275,14 HV y 242,33 HV respectivamente. En este caso, se piensa que los efectos de la dilución del metal base en el metal fundido no se aprecian en los valores de dureza alcanzados debido a que los ensayos de dureza del colchón se realizaron en la zona cercana a la superficie del mismo, donde los efectos de la dilución son menores.

Las figuras 12 y 13 muestran el comportamiento del perfil de durezas en las zonas de la soldadura para la muestra A2 (corte en el sentido transversal al cordón) y A3 (corte en el sentido longitudinal del cordón en la soldadura cerca del defecto A2).

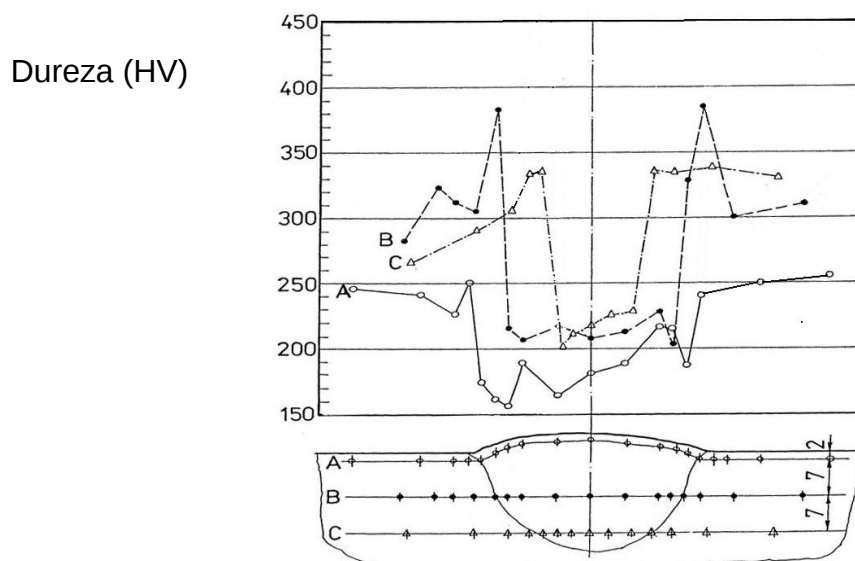


Figura 12. Comportamiento de la dureza en la muestra A2.

Como se observa, si bien las leyes de distribución de las durezas difieren en ambos casos, el comportamiento de las mismas respecto al eje de simetría es similar al de la muestra A1, lo que refuerza el criterio de homogeneidad de la soldadura en cuanto a la microestructura y propiedades.

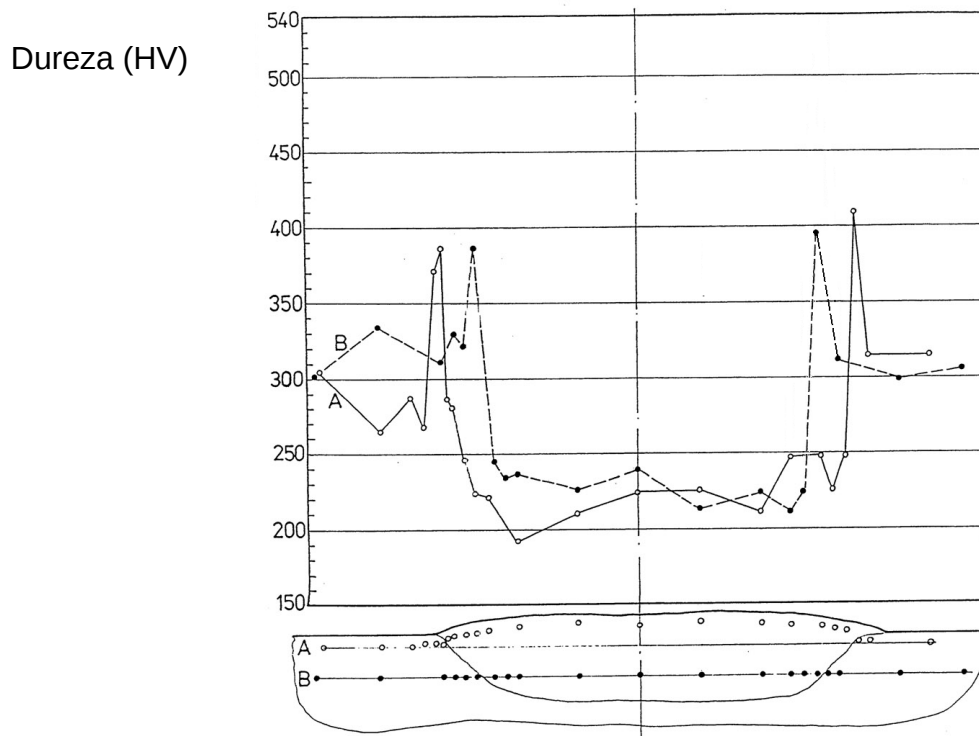


Figura 13. Comportamiento de la dureza en la muestra A3.

3.9.2 Dureza en los especímenes de la variante B

Las figuras 14 y 15 muestran el comportamiento de las durezas medidas en superficies de corte paralelas al eje del cordón de soldadura para las diferentes zonas y capas analizadas según los datos de las tablas A4 y A5 Anexos 8 y 9.

Como se observa, en ambos casos los perfiles de dureza en las líneas paralelas a la superficie del cordón (líneas A), a la región intermedia del cordón (líneas B) y a la raíz del cordón (líneas C), con sus correspondientes zonas de metal base, de influencia térmica y metal fundido o relleno, poseen una distribución de dureza aproximadamente simétrica para cada caso.

Para la muestra B1, los valores de dureza en los puntos cercanos a la zona de influencia térmica en las líneas A, B y C son superiores a los valores de dureza en el resto del depósito y alcanzan promedios de 491.25, HV; 460.25 HV y

370.33 HV respectivamente; mientras que las durezas promedio del metal base para las líneas A, B y C son de 280.14 HV; 281.12 HV y 266.8 HV respectivamente. En el caso del metal fundido o relleno, los respectivos valores promedio de dureza para las líneas A, B y C fueron de 223.1 HV, 194.3 HV y 239 HV.

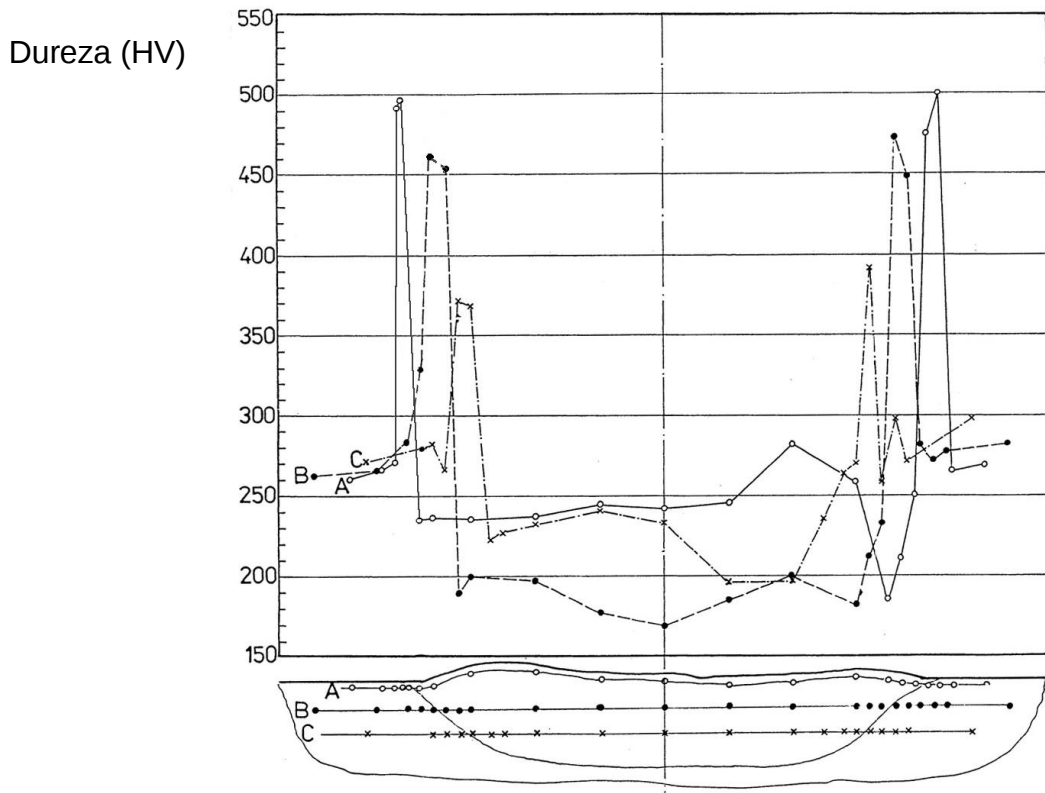


Figura 14. Comportamiento de la dureza en la muestra B1.

Como en las probetas A, los perfiles de distribución de durezas se pueden considerar aproximadamente simétricos respecto al eje geométrico del cordón, lo que revela una homogeneidad en su comportamiento, en correspondencia con la morfología de la microestructura observadas en las figuras 5, 6, 7, 8 y 9 y los mayores valores de dureza se alcanzaron en las zonas de influencia térmica, lo que es consistente con los resultados obtenidos por Taylor (1975); Balsamo et. al (1995); Nissley y Lippold (2003); Leon (2004) y Baek et. al (2006). Se debe destacar que, a diferencia de las muestras A, las durezas de las superficies del depósito en todos los casos son superiores a las del metal base, lo que prueba la efectividad de la tecnología seleccionada.

Se observa, además, que las durezas en la zona del colchón son siempre inferiores a las del metal base y el relleno, lo que se atribuye a que en la zona de medición no se manifiestan efectos de la dilución del metal base en el metal fundido.

En el caso de la muestra B2 (corte en el sentido transversal al cordón), se obtuvieron resultados de perfiles de dureza consistentes con los obtenidos en la muestra B1, como se muestra en la figura 15.

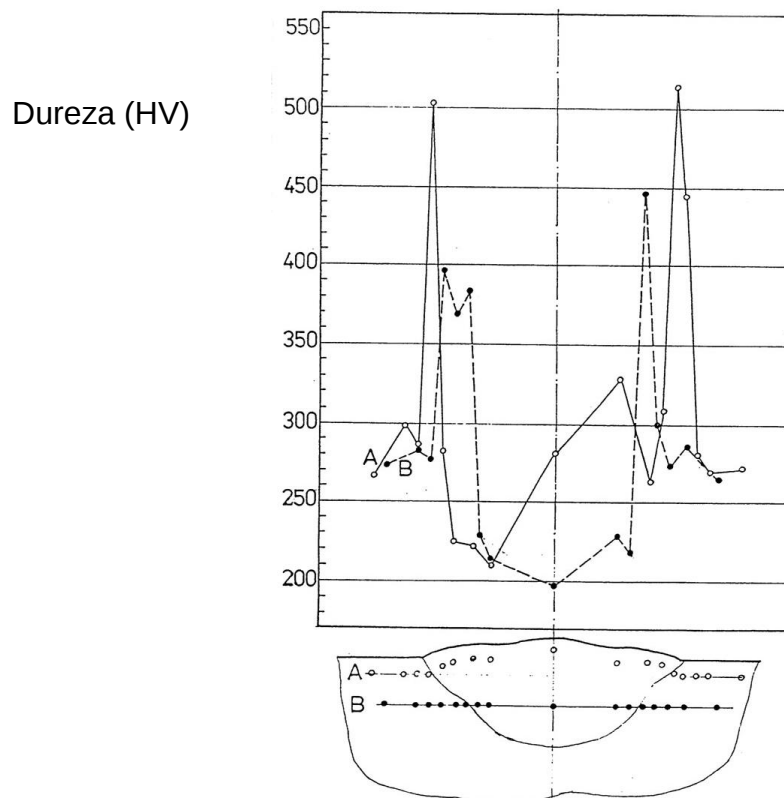


Figura 15. Comportamiento de la dureza en la muestra B2.

3.9.3 Dureza de los especímenes de la variante B con Tratamiento Térmico de alivio de tensiones

La figura 16 muestra el comportamiento de las durezas medidas en superficies de corte paralelas al eje del cordón de soldadura para las diferentes zonas y capas analizadas en los especímenes de la variante B con tratamiento térmico de alivio de tensiones (B3) según los datos de la tabla A6 del Anexo 9.

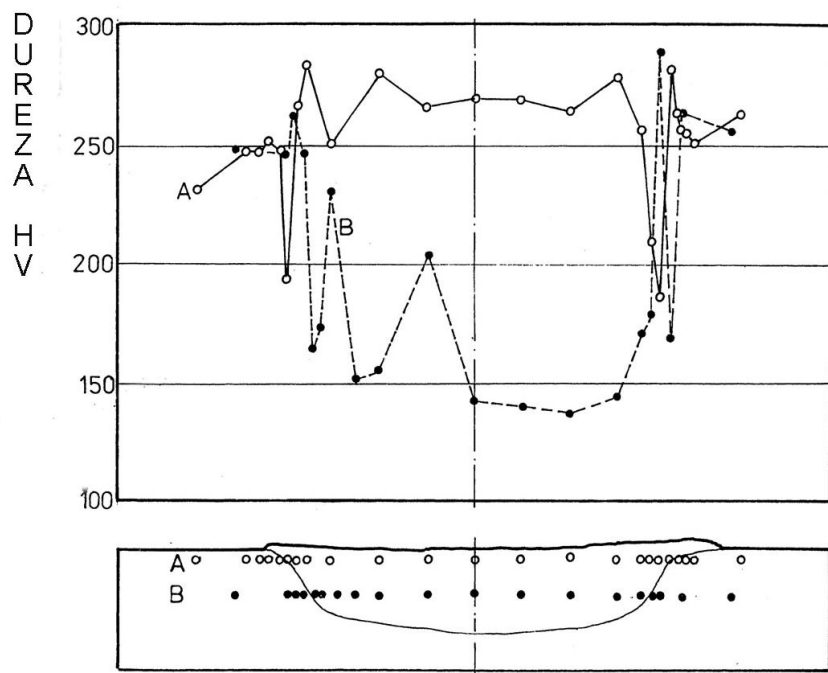


Figura 16. Comportamiento de la dureza en la muestra B3, tratada térmicamente.

Se observa una considerable influencia del tratamiento térmico en el comportamiento de la dureza. En este caso, los parámetros del tratamiento térmico aplicados (temperatura de calentamiento: 650 °C; tiempo de permanencia: 1.5 hora y enfriamiento en el horno hasta 100 °C) provocaron un descenso considerable en los valores de dureza en todas las zonas, alcanzando valores promedios de dureza de 249 HV, 254.5 HV y 274 HV para el metal base, la zona de influencia térmica y el metal fundido o relleno de la zona de la superficie (línea A) y 236.6, 256.33 y 165.66, para el metal base, la zona de influencia térmica y el metal fundido o relleno de la zona interior (línea B) respectivamente.

Estos resultados están en correspondencia con la naturaleza de la microestructura de la figura 10, de manera que la relativamente elevada dureza de la bainita presente en las muestras B1, experimentaron un descenso por la presencia de las mezclas de perlita y ferrita en las muestras B3.

Hay que destacar que al comparar los valores de dureza de la línea A con la B, se observa un predominio de los niveles de dureza presentes en la superficie

del metal fundido o relleno en comparación con los valores de dureza alcanzados en el metal base y la zona de influencia térmica, lo que permite comprobar la eficacia de la tecnología propuesta en el sentido de que el relleno del acero AISI 4140 con electrodo UTP 6020 utilizando electrodo UTP—642 como colchón utilizando proceso SMAW garantiza un depósito de soldadura con unión metalúrgica libre de defectos y microgrietas y con adecuados niveles de dureza y resistencia mecánica, incluso, superiores a los del metal base que sientan las bases para la restitución del estado técnico y reincorporación al proceso de explotación de los ejes de giro de las retroexcavadoras $\exists$ 4 A6/45 por medio del relleno de sus superficies averiadas siguiendo la tecnología detallada en el anexo 10.

De esta forma, se resuelve el problema científico identificado y se verifica la hipótesis científica trazada a partir del cumplimiento del objetivo planteado en el trabajo.

3.9.4 Aplicación de los resultados obtenidos en la investigación

Partiendo de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se decidió recuperar los dientes de dos ejes de giro para la excavadora Ex # 1 (ver anexo 10), con productividad de 180 T/h que se encontraba paralizada sin existir piezas de repuesto de recambio que no estarían en el país en un tiempo menor de seis meses.

3.8. Valoración económica de la recuperación por soldadura de Árboles de Giro de la Excavadora EX-1.

Cálculos para Arbol de Giro de Excavadora EX-1 en el 2008			
Indicadores	UM	Cantidad	Importe
Costo Unitario del eje Según Oferta No. 26 de SPECTR del 29/02/2008(*)	CUC	1	12,687.09
Costo Unitario de Recuperación de un eje por Orden de Servicios No. 076472	CUC	1	1,607.95
Efecto Económico Unitario	CUC	1	11,079.15
Equipos Recuperados	U	2	2.00
Efecto Económico Total	CUC		22,158.30
(*) Calculado con una Tasa de Cambio de 1.4538 CUC el Euro			

Los cálculos anteriores están determinados para el primer año de aplicación del trabajo realizado. El efecto económico para la recuperación de 2 Árboles de Giro de la Excavadora EX-1 asciende a 22,158.30 CUC.

No obstante a lo anterior, a través de sus años de explotación se han recibido otras ofertas con mayor cuantía, que han incrementado estos aportes económicos, toda vez que el costo de recuperación se ha mantenido en el mismo orden. Por este concepto los efectos calculados hubieran sido de 25,924.18 CUC en marzo de 2011 y de 34,368.11 en mayo de ese mismo año. Suguidamente se muestran los cálculos con las nuevas ofertas:

Cálculos para Arbol de Giro de Excavadora EX-1 en el 2011			
Indicadores	UM	Cantidad	Importe
Costo Unitario Según Oferta No. 54 de PALRIANA HOLDINGD CO.LTD del 04/03/2011	CUC	1	14,570.04
Costo Unitario de Recuperación por Orden de Servicios No. 076472	CUC	1	1,607.95
Efecto Económico Unitario	CUC	1	12,962.09
Equipos Recuperados	U	2	2.00
Efecto Económico Total	CUC		25,924.18
(*) Calculado con una Tasa de Cambio de 1.3884 CUC el Euro			

Cálculos para Arbol de Giro de Excavadora EX-1 en el 2011			
Indicadores	UM	Cantidad	Importe
Costo Unitario Según Oferta No. 110500118 de VIBAS del 30/05/2011	CUC	1	18,792.00
Costo Unitario de Recuperación por Orden de Servicios No. 076472	CUC	1	1,607.95
Efecto Económico Unitario	CUC	1	17,184.06
Equipos Recuperados	U	2	2.00
Efecto Económico Total	CUC		34,368.11

Cálculo Económico de la labor realizada por la Excavadora EX-1 luego de la recuperación de los Árboles de Giro de, mediante la tecnología de soldadura.

La Excavadora EX-1 se puso en explotación desde octubre de 2008 a septiembre del 2012. Hasta entonces los resultados han sido los siguientes:

Excavadora EX-1 desde octubre de 2008 a septiembre del 2012			
Indicadores	UM	Cantidad	Importe
Horas Reales Trabajadas	hr	6,044	
Productividad Excavadora	t/hr	180	
Mineral Removido	t	1,087,920	
Costo Unitario Mineral Removido	\$/t	0.19	
Costo Mineral Removido	\$		206,704.80

De los análisis realizados, se desprende que a la viabilidad de recuperar los ejes de las retroexcavadoras por soldadura aplicando la tecnología probada en el trabajo, se suma la factibilidad económica según los argumentos mostrados anteriormente.

3.9 Análisis del impacto ambiental

Los procesos de soldadura constituyen, sin dudas, un singular aporte al desarrollo sostenible de la sociedad. Al ocurrir el desgaste de los dientes de los ejes de giro en las excavadoras no solo se ve afectada la producción, también el aprovechamiento racional de los recursos materiales y humanos.

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

Los trabajos de soldadura son altamente perjudiciales al hombre y al medio ambiente, debido a la incidencia de las radiaciones, gases y altas temperaturas

generados por el proceso. Los efectos contaminantes derivados de los procesos de soldadura son muchos más agresivos a la salud cuando las piezas a soldar están recubiertas de sustancias como: aceites, pinturas y otras; que se evaporan durante el proceso e inciden en el hombre junto a los gases de la soldadura y los del local, si en el mismo se realiza cualquier otra actividad que emita sustancias al medio.

Factores contaminantes del puesto de trabajo del soldador:

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

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

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

Conclusiones del capítulo III

- En la variante tecnológica A (electrodo autentico), el depósito mostró una dureza inferior a la del metal base lo cual puede provocar fácil desgaste en el diente de la excavadora y en el proceso SMAW con electrodo austenítico aparecieron grietas en la zona afectada por el calor orientadas perpendicularmente a la línea de fusión; lo que es un fenómeno negativo que puede disminuir la vida útil de los dientes de giro de la excavadora.
- La variante tecnológica B (electrodo ferrítico-perlítico) aseguró una dureza del depósito similar a la del metal base y la no existencia de grietas en la zona afectada por el calor, por lo que el depósito realizado en los diente de los ejes de giro de las excavadoras en la mina de La Empresa Ernesto Guevara con electrodo ferrítico- perlítico variante B restituye los parámetros de diseños de estos.
- Es imprescindible antes de efectuar el depósito sobre los ejes de giro de las excavadoras utilizar procesos adicionales como el Precalentamiento y el Tratamiento Térmico Posterior.
- Los resultados de los análisis metalográficos, ensayos de dureza y la valoración económica demuestran que es factible la restauración de los ejes de giro utilizando la variante B.

CONCLUSIONES GENERALES

1. De las variantes analizadas, la variante B mostró mejores resultados al obtenerse un depósito de soldadura con el mínimo de defectos, valores adecuados de calidad microestructural y resistencia mecánica que restituyan el estado técnico y de explotación de los ejes de giro y permitan su reincorporación al proceso productivo.
2. Los resultados de los análisis metalográficos, ensayos de dureza y la valoración económica demuestran que es factible la restauración de los ejes de giro utilizando la variante B.
3. A partir de los resultados mostrados, se diseñó y validó una tecnología para el reacondicionamiento por soldadura de los dientes de los ejes de giro de las excavadoras $\exists 4$ A6/45 utilizando electrodo ferrito-perlítico de alta resistencia del tipo UTP 6020 y proceso SMAW.

RECOMENDACIONES

1. Generalizar el procedimiento validado en otros conjuntos dentados; así como en recargue de ejes y rodillos, lo que permitiría sustituir importaciones en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
2. Efectuar un estricto control de la calidad de las piezas recargadas y velar que se cumplan con todas las variables tecnológicas del proceso y se realice el control de calidad antes, durante y después de efectuado el deposito.
3. Recomendar al grupo Cuba Níquel la adquisición de una máquina de Tratamiento Térmico por resistencia eléctrica controlada, ya que los procesos adicionales realizados con equipos oxiacetilenico son más arte que ciencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alpsten, G y L. Tall: "Residual stresses in heavy welded shapes", Welding Journal, Vol 49, marzo pp. 123-127, 1970.
2. American Welding Society (AWS) "Welding Handbook". 8va Edición. 2009.
3. Ashby, M., Engineering Materials 1. An Introduction to their Properties and Applications. Second Edition. Department of Engineering, University of Cambridge, UK. ISBN 0 7506 3081 7. p 131 – 140. 1996.
4. Baek, J., Kim, W. y Kim, Y. Comparative study for various repair methods of inservice pipeline using full scale burst test. In: WORLD GAS CONFERENCE, 23º, 2006, Amsterdam, Netherlands.
5. Bailey, N. Weldability of Ferritic Steels. The Welding Institute, 1995.
6. Baker, R.G., RI. Dolby y F. Waikinson: "The Assement of Cracking Problems," Weldability of Souctural and Pressure Vessel Steels, Corerence Proceedings - Volume I. The Papers, The Welding Institute, Cambridge, U.L, 1970.
7. Bakker, F. J. Y Horestreydt A. J. W. Soldadura por arco, Madrid, 1968.
8. Bálsamo, P.S.S.; Scotti, A.; Mello, J.D.B. Interpretación de la microestructura de recargues duros depositados por soldadura utilizando la superficie de Liquidus de diagramas Fe-Cr-C. Rev. Soldadura, 25 (4), 1995, CENIN, Madrid, pp. 199-207 (ISSN 0048-7759).
9. Barreiro, A. J. Aceros especiales, 3ª. ed. Madrid, 1966.
10. Beckert, Manfred. Grundlager der Schweisstechnik. Berlín. Ed. Veb Verlag Technik. 1985. 203 p.
11. Bengton, U., Design requeriments materials properties a basic for materials selection. American society for testing. USA. 1991.
12. Buchely, M.F, Gutierrez J.C Le´on, L.M. y Toro, A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. Wear 259 (2005) 52–61pp.
13. Burgos, J. Relleno superficial por soldaduras. Curso recuperación de piezas por soldaduras. Universidad central de Venezuela (1996).
14. Burgos, J., Tecnología de soldadura. Ed. Pueblo y Educación. 1987.

15. Callister, W.D. Materials Science and Engineering. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc, Publishers, 2003.
16. Caraballo, M. A.: Endurecimiento del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Mecánica, ISMMM. 2003.
17. Cary, H. B. y C. S. Helzer: Modern Welding Technology. Upper Saddle River, Nueva Jersey: Pearson Education. ISBN 0-13-113029-3. 2005.
18. 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.
19. Cruz, A. et al: Fundente para el recargue obtenido a partir de la recuperación de escoria del proceso SAW. Memoria de Metanica (2000). La Habana julio (2000).
20. Cruz Crespo, A. y Scotti, A.: Evaluación del comportamiento operacional de electrodos tubulares revestidos para revestimiento duro por SMAW Informe parcial de proyecto CAPES-MES 06. Universidad Federal de Uberlandia. 2007.
21. Dumovic, N.: Repair and maintenance procedures for heavy machinery components. Welding Innovation. Vol.XX, No.1 (2003).
22. Easterling, K,E 1992: Introducción tu the Physical, matallurgy of welding(Paperback Subsequent) Edición ISBN-10:0750603941.
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. Especificaciones para electrodos de acero con baja aleación A.S.M.E. SFA 5.5 A.W.S. A 5.5, 2001.
25. Especificaciones para electrodos de acero dulce para soldadura por arco eléctrico A.S.M.E. SFA 5.1 A.W.S. A 5.1, 2001.
26. Exportaciones de la isla en el 2011. Ahorra , 17 abril del 2012(Antonio Carricate . Viceministro primero de comercio exterior e inversión extranjera.
27. Flinn, R: Materiales de ingeniería y sus aplicaciones: Edición Mc Graw-Hill, Mexico 1991.

28. Folleto: Recuperación de piezas por el método de Soldadura, CIME, Grupo Científico Técnico- Técnico, 1996.
29. Fritzsche, C.H.: Tratado de Laboreo de minas. Editorial Labor, S.A. Barcelona, 1965.
30. Galabru P.: Maquinaria general en obras y movimientos de tierras. Editorial Reverté S.A, Barcelona 1962;
31. García, P; Casto, M., Metodología para la enseñanza práctica de soldadura por arco eléctrico. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983. 256 p.
32. Glizmanenko, O. L. "Soldadura y corte de metales". La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1975. 472 pp.
33. González, Vázquez. Manual de Soldadura a Fuego. Plátano Editora. Lisboa. 1978.198 pp.
34. Guliaev, A. Metalografía. Tomos I y II. Moscú. Editorial MIR. 1983.
35. Guliar; A,P: Metalografía.Tomo II. Moscú. Editorial MIR. 1983.pág 17-22
36. Heise F. y F. Herbst: Compendio de Laboreo de Minas. Editorial Labor S.A Barcelona, 1943.
37. Henschen, K. y J. Okonek: "Bucyrus Celebrates 150 Years" (PDF). Coal News. coalnews.net, 2005.
38. Herrera, J.: Introducción a los Fundamentos de la Tecnología Minera. Laboratorio de Laboreo de Minas, Madrid, 2006. ISBN 978-84-96398-56-6.
39. 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.
40. Janescki, J , M HEBDA: Tarcie, Smqarowonieizuzycie czesci maszyn.Ed.Nt Varsovia, 1969.
41. Justel Ramos, Miguel A.: Soldadura. Manual para operarios y técnicos. Editorial Científico-técnico año 2013.
42. Lajtin, Y., Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1ed.Editorial Mir Moscú. 1973. P 359 – 360.
43. Leon, L. M.: Relación microestructura-resistencia al desgaste de recubrimientos duros ricos en cromo y tungsteno aplicados por soldadura eléctrica (SMAW). Dyna, Noviembre: Vol 71, número 144

- Univesidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2004. pp. 165-171.
44. Lineamiento de la Política Económica y social del Partido del Partido y la Revolución aprobado en el VI Congreso. P.C.C La Habana 16-19 abril 2011.
 45. Lippold, J. C.: Recent Developments in Weldability Testing for Advanced Materials. Joining of Advanced and Specialty Materials VII, # 05116G. ASM International, 2005.
 46. Lippold, J.; Kotecki, D., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005.
 47. López-Pedraza, F.: Manual de equipos de construcción, Madrid, 1957.
 48. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
 49. Mathar, J Transacciones. ASME.56.(4) pág 249-254(1934).
 50. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación CENIC. La Habana. 1977.
 51. Nissley, N.E y J.C. Lippold: Ductility-dip cracking susceptibility of austenitic alloys, 6th International Trends in Welding Research, 2003, ASM International.
 52. Norma ASTM E 1417, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing.
 53. Norma ASTM E 384-89. Test Methods for Microhardness of Materials.
 54. Norma ASTM E 3-95. Preparation of Metallographic Specimens.
 55. Norma ASTM E 92. Harness Testing.
 56. Norton, S.J y J.C. Lippold: Development of a Gleeble-based test for postweld heat treatment cracking susceptibility. 6th International Trends in Welding Research, 2003, ASM International.
 57. Oystein G.: Modelación Metalúrgica de la soldadura. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
 58. Pástor, M., Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Ecuador: Editorial ESPOCH, 2002. p.56.
 59. Pero-Sanz, J. A. “Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades”, Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
 60. Quesada Hector Juan: Método para el calculo de precalentamiento en uniones soldadas.IIW IIS-IX-1458-87(1988).

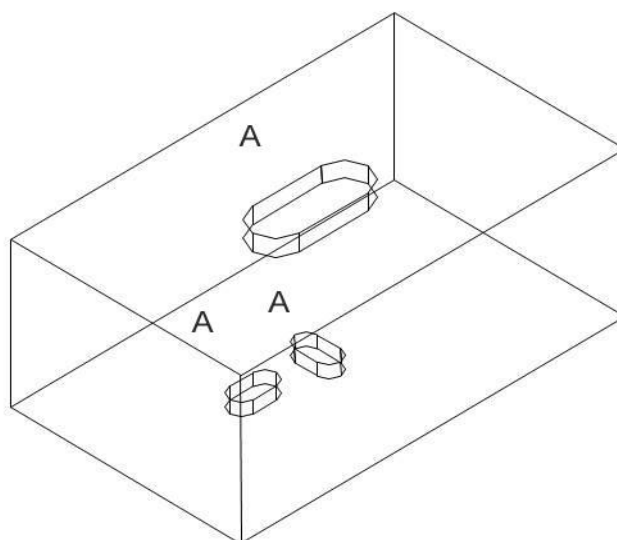
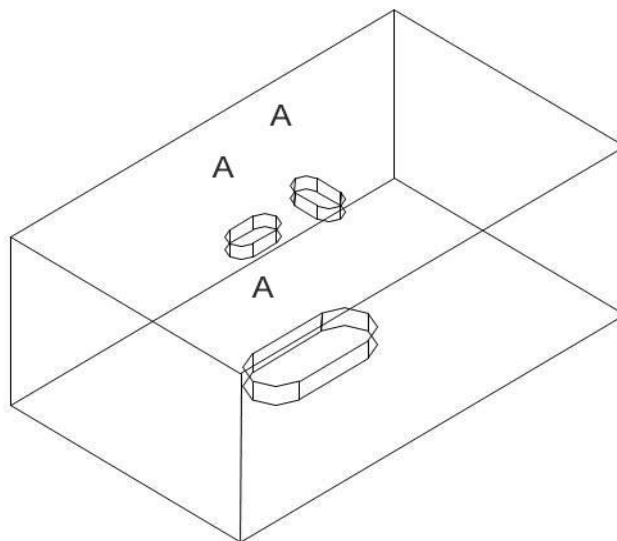
61. Rabinowicz , Ernest (1995). Friction and wear of materials. July 1995 | ISBN-10: 0471830844 | ISBN-13: 978-0471830849 | Edition: 2 ...
62. Ramírez, G.: Introducción a la técnica de ensayo no destructivos, Ed. Instituto Nacional de técnicas aeroespaciales, Madrid, 1980.
63. Ripling, E., J. Mulherin y P. Crosley: Crack Arrest Toughness of Two High Strength Steels (AISI 4140 and AISI 4340). Metallurgical and Materials Transactions A Volume: 13, Issue: 4, 1982.
64. Rodríguez, H. Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1983. 613 pp.
65. Rzhovsky V. V.: Opencast Mining Technology and Integrated Mechanization. Mir Publishers.Moscow. 1987.
66. Séferiam, D. Metalurgia de la soldadura. Ed. Revolucionaria. 1966. 397 pp.
67. Stout, R. D. and Doty, W. D. Weldability of Steels. Welding Research Council, 1971.
68. Taylor, L. G. Aspectos Metalúrgicos de las propiedades mecánicas de metales soldados. Weld and Metal const. Nro 5. 1975.
69. Varela; A. Presentación de metalurgia física II. Octubre 2003 . disponible en Wort wide web. <http://www.metallografiphy.com/bboard/forum.html>.
70. Young, G.: A Review of Weldment Failure Modes and Weldability Testing Methods. Technical Report ARCCB-TR-94003. Us Army Armament Research, Development and Engineering Center close Combat Armaments Center Blnt Laboratories. Watervliet, N.Y., 1994.

ANEXO No. 1.

Esquema que representa los defectos artificiales de las probetas "A"

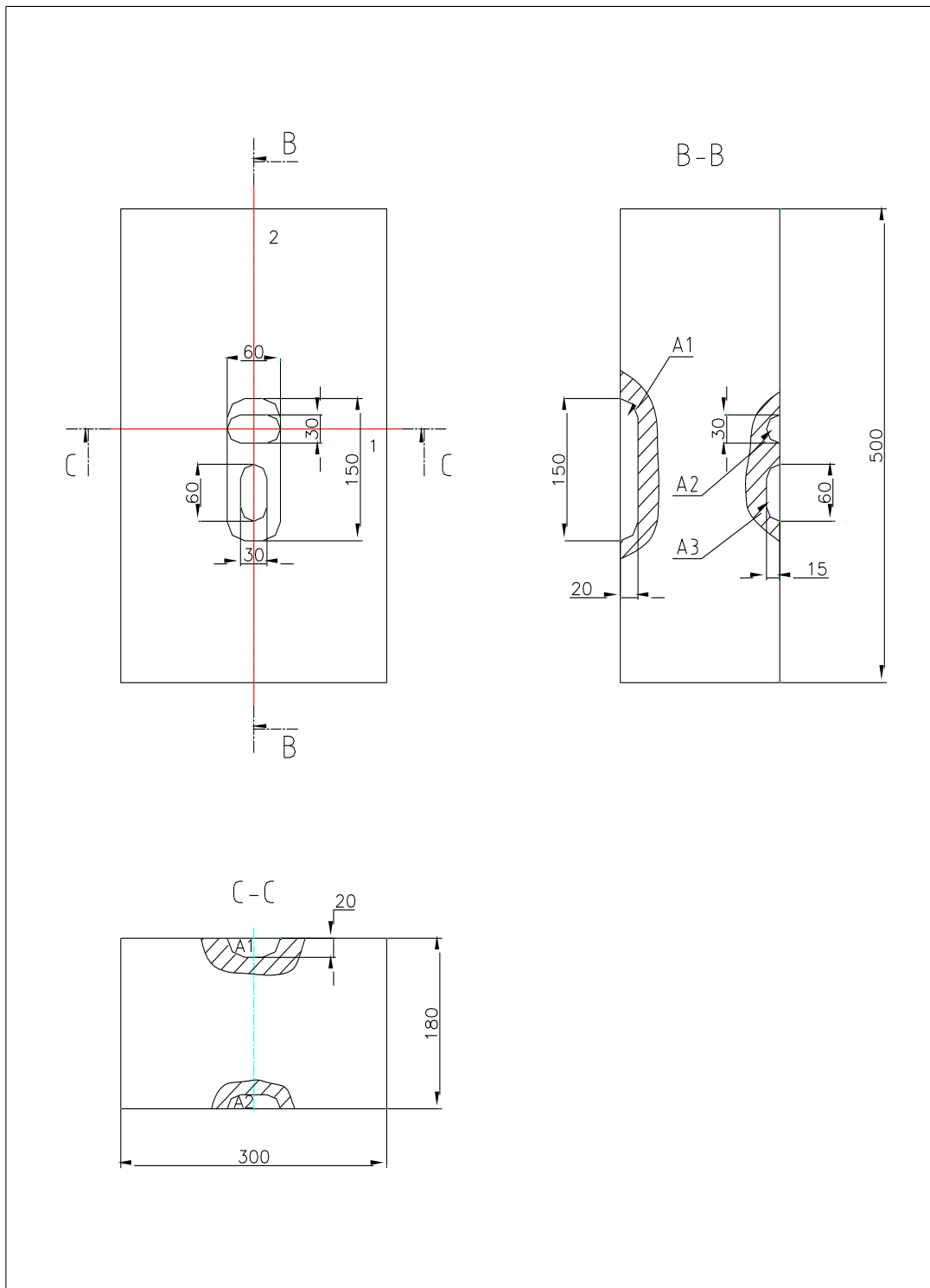
ANEXO No. 1.

Esquema que representa los defectos artificiales de las probetas "A"



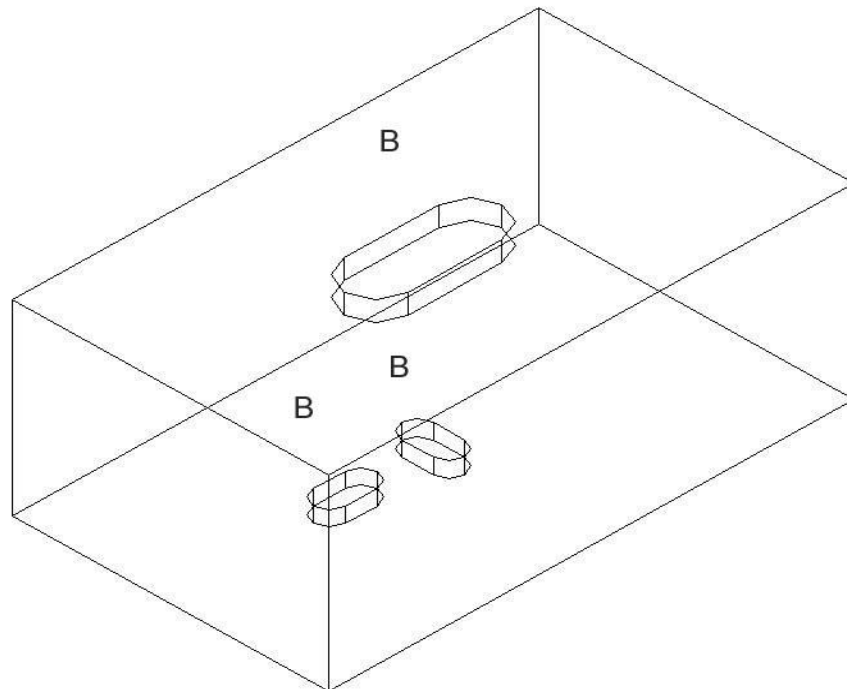
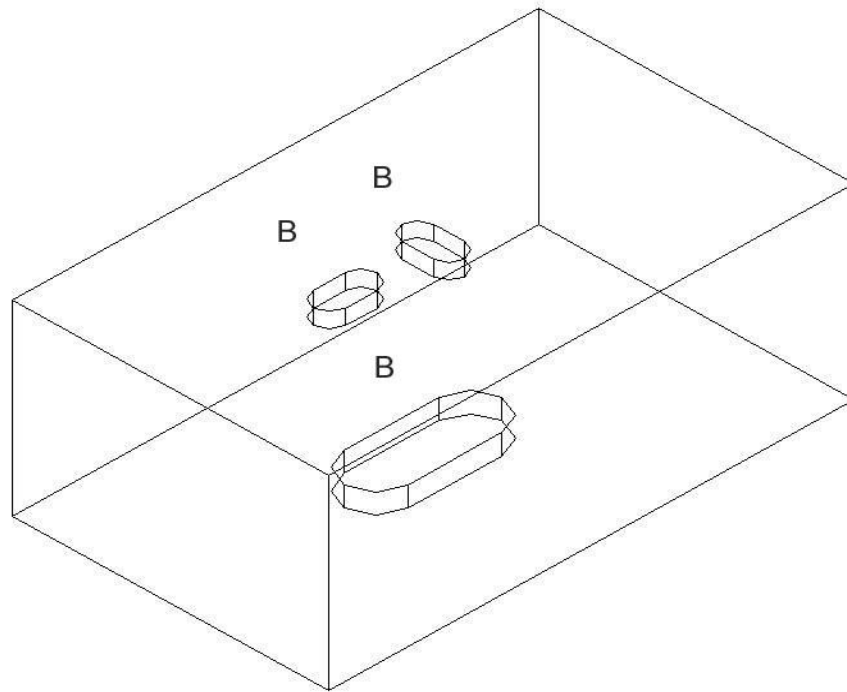
ANEXO 2.

Esquema que representa las dimensiones de los defectos artificiales de las probetas "A".



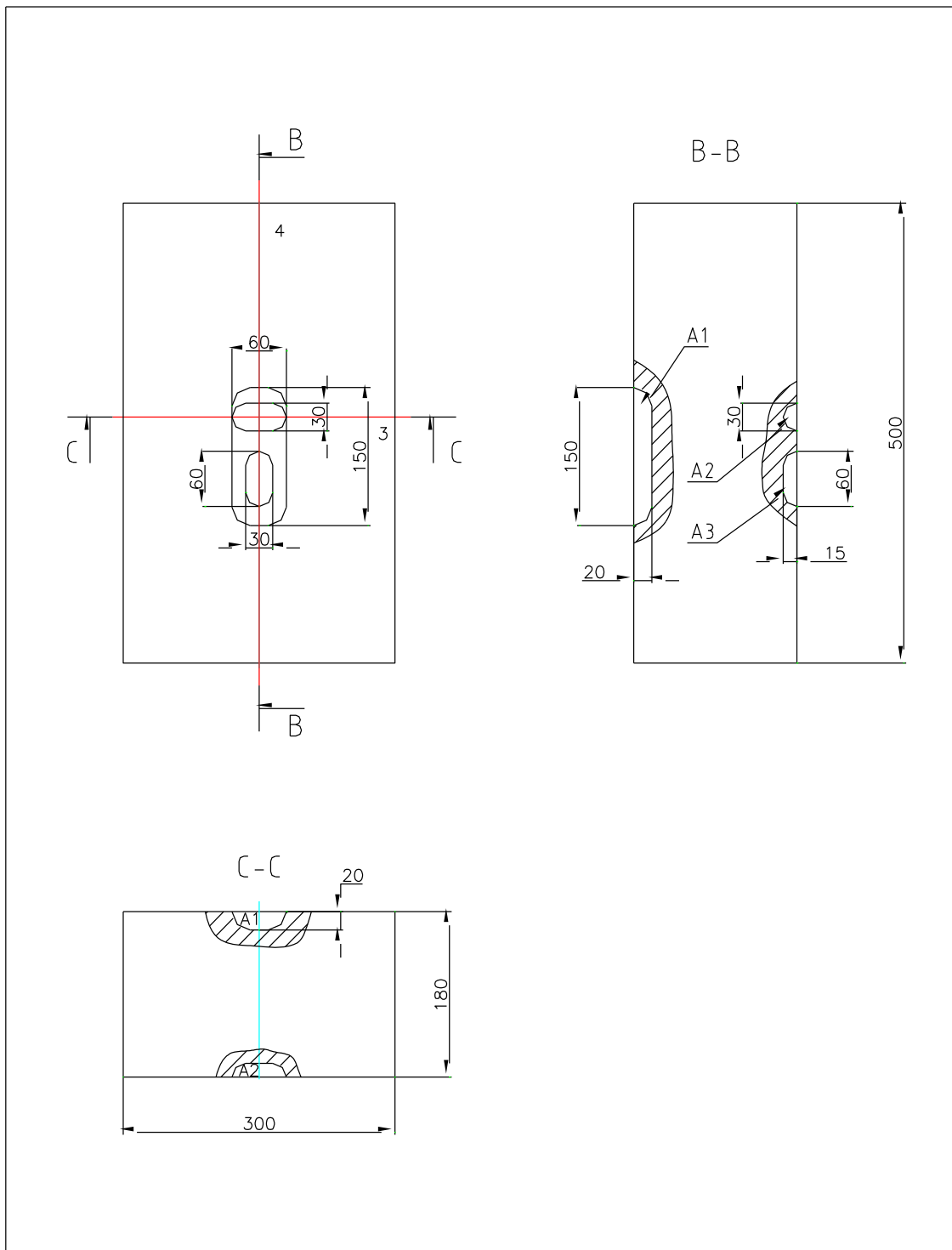
ANEXO 3.

Esquema que representa los defectos artificiales de las probetas “B”.



ANEXO 4.

Esquema que representa las dimensiones de los defectos artificiales de las probetas “B”.



ANEXO 5.

Productora de Níquel y Cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara"



Grupo de corrosión

Unidad Básica de Mantenimiento
teléfono: (53) 24 615524
1 de Abril del 2013.

Distribución: 2013

ATTE:

FACULTAD DE METALURGIA
ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA

ASUNTO:

Inspección a los defectos simulados en la probeta B y al recargue realizado con electrodo Autentico.

ACTA DE CERTIFICACION DE SOLDADURA

Planta o Taller: Taller Mantenimiento Mecánico.

No. de acta 2

Equipo: (Probeta de Ensayo)

Tipo de trabajo a realizar, Fabricación X Reparación

1. Tipo de control en las uniones soldadas.

1.1 Control previo al proceso de soldadura

- Material a soldar X
- Tipo de electrodo X
- tipo de gas a utilizar
- Calificación del soldador X
- Plano de ejecución X

1.2 Control durante el proceso de soldadura

- Int de corriente X
- Voltaje de sold. X
- Dimen de los catetos
- Veloc. de soldadura X
- Mat. Aporte adecuado X

1.2 Control posterior al proceso de soldadura.

- Control visual X
- Aplicac. De emulsión
- Defectoscopía en colores
- Partículas magnéticas X

- Control metalográfico
- Control radiográfico
- Ensayos mecánicos

2. Tipos de defectos encontrados.

- 2.1 Grietas NO
- 2.2 Falta de penetración NO
- 2.3 Poros NO
- 2.4 Socavaduras NO
- 2.5 Pegadura NO
- 2.6 Inclusión de escoria NO
- 2.7 Exceso de refuerzo NO

- 2.8 Exceso de penetración NO
- 2.9 Rechupe NO
- 2.10 Cráteres NO
- 2.11 Quemado del metal NO
- 2.12 Sobre calentamiento NO
- 2.13 Alteración de las dimensiones NO
- 2.14 Presencia incorrecta del cordón NO

3. Conclusiones de la inspección.

- Las paredes de los defectos simulados no presentan indicaciones relevante que -- impidan su recargue.
- El recargue de los defectos no presentan indicaciones relevantes que afecten sus propiedades mecánicas.

4. Recomendaciones.

- Utilizar las mismas variables en los trabajos de relleno que las utilizada en el recargue de las probetas.

Realizó la inspección.

Ing Joel Cabreja Silot
Esp. Sup. Mco

Vto.Bno MSc José Sablón Leyva
Esp.Pcpal de Corrosión

ANEXO 6.

Productora de Níquel y Cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara"



Grupo de corrosión

Unidad Básica de Mantenimiento
teléfono: (53) 24 615524
1 de Abril del 2013.

Distribución: 2013

ATTE:

FACULTAD DE METALURGIA
ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA

ASUNTO:

Inspección a los defectos simulados en la probeta B y al recargue
realizado con electrodo Ferrítico – Perlítico.

ACTA DE CERTIFICACION DE SOLDADURA

Planta o Taller: Taller Mantenimiento Mecánico.

No. de acta 1

Equipo: (Probeta de Ensayo)

Tipo de trabajo a realizar, Fabricación X Reparación

3. Tipo de control en las uniones soldadas.

1.1 Control previo al proceso de soldadura

- Material a soldar X
- Tipo de electrodo X
- tipo de gas a utilizar
- Calificación del soldador X
- Plano de ejecución X

1.2 Control durante el proceso de soldadura

- Int de corriente X
- Voltaje de sold. X
- Dimen de los catetos
- Veloc. de soldadura X
- Mat. Aporte adecuado X

3.2 Control posterior al proceso de soldadura.

- Control visual X
- Aplicac. De emulsión
- Defectoscopía en colores
- Partículas magnéticas X

- Control metalográfico
- Control radiográfico
- Ensayos mecánicos

4. Tipos de defectos encontrados.

2.1 Grietas NO
2.2 Falta de penetración NO
2.3 Poros NO
2.4 Socavaduras NO
2.5 Pegadura NO
2.6 Inclusión de escoria NO
2.7 Exceso de refuerzo NO

2.8 Exceso de penetración NO
2.9 Rechupe NO
2.10 Cráteres NO
2.11 Quemado del metal NO
2.12 Sobre calentamiento NO
2.13 Alteración de las dimensiones NO
2.14 Presencia incorrecta del cordón NO

3. Conclusiones de la inspección.

----Las paredes de los defectos simulados no presentan indicaciones relevante que -- impidan su recargue.
-----El recargue de los defectos no presentan indicaciones relevantes que afecten sus propiedades mecánicas.

4. Recomendaciones.

---- Utilizar las mismas variables en los trabajos de relleno que las utilizada en el recargue de las probetas.

Realizó la inspección.

Ing Joel Cabreja Silot
Esp. Sup. Mco

Vto.Bno MSc José Sablón Leyva
Esp.Pcpal de Corrosión

ANEXO 7.

Tabla. A.1. Durezas en las superficies de corte para la probeta A1.

Capa	Zona de Medición	Dureza (HV)	Promedio
A	Metal Fundido	305; 235; 206; 253; 254; 245; 250; 240; 271; 265; 286; 251; 253; 260; 250; 235; 267; 245; 260; 271; 280; 286; 253; 251; 211; 234; 303	247.17
B	Metal Base	291; 315; 324; 320; 323; 330; 319; 320;	317.75
B	Influencia Térmica	448; 479	463.5
B	Metal Fundido	236; 233; 255; 249; 270; 240; 260; 270; 269; 255; 295; 257; 238	251.62
C	Metal Base	281; 336; 325; 372; 319; 330; 335	275.14
C	Influencia Térmica	368; 355; 360	363.75
C	Metal Fundido	235; 240; 245; 258; 230; 225; 273; 240; 235	242.33

Tabla. A.2. Durezas en las superficies de corte para la probeta A2.

Capa	Zona de Medición	Dureza (HV)	Promedio
A	Metal Base	247, 240, 226, 240, 250, 260	243.83
A	Influencia Térmica	250,240	245
A	Metal Fundido	175,162,156,190,164,177,191, 217, 216, 185	183.3
B	Metal Base	280, 324, 313, 306, 313, 300	306.0
B	Influencia Térmica	383, 388	385.5
B	Metal Fundido	216, 208, 218, 210, 215, 230, 204, 330	228.87
C	Metal Base	265, 280, 306, 331, 340	304.4
C	Influencia Térmica	430, 531, 334, 336	407.75
C	Metal Base	205, 210, 215, 226, 230	217.2

ANEXO 8.

Tabla. A.3. Durezas en las superficies de corte para la probeta A3.

Capa	Zona de Medición	Dureza (HV)	Promedio
A	Metal Base	303, 265, 287, 268, 315, 316	292.33
A	Influencia Térmica	370, 386, 410	388.66
A	Metal fundido.	277, 280, 246, 225, 220, 190, 208, 220, 221, 210, 248, 249, 225, 249	233.42
B	Metal Base	301, 335, 311, 330, 320, 304, 299, 310	313.75
B	Influencia Térmica	377, 395	386
B	Metal fundido.	244, 233, 237, 223, 238, 210, 220, 208, 219	225.77

Tabla. A.4. Durezas en las superficies de corte para la probeta B1.

Capa	Zona de Medición	Dureza (HV)	Promedio
A	Metal Base	260, 267, 271, 266, 270	266.8
A	Influencia Térmica	492, 498, 475, 500	491.25
A	Metal Fundido	237, 238, 237, 239, 245, 240, 247, 280, 260, 182, 213, 250	239.0
B	Metal Base	262, 264, 283, 329, 280, 279, 272, 280	281.12
B	Influencia Térmica	462, 455, 474, 450	460.25
B	Metal Fundido	188, 200, 198, 175, 170, 188, 200, 180, 214, 230,	194.3
C	Metal Base	272, 283, 267, 300, 279, 300, 260	280.14
C	Influencia Térmica	373, 369, 390	370.33
C	Metal fundido	220, 228, 191, 198, 234, 196, 196, 233, 264, 271	223.1

ANEXO 9.

Tabla. A.5. Durezas en las superficies de corte para la probeta B2.

Capa	Zona de Medición	Dureza (HV)	Promedio
A	Metal Base	266, 300, 287, 272, 270, 281	279.33
A	Influencia Térmica	504, 517	510.5
A	Metal fundido.	280, 224, 220, 208, 280, 328, 262, 308	263.12
B	Metal Base	273, 282, 277, 258, 286, 274	275.0
B	Influencia Térmica	397, 368, 383, 300, 446	378.8
B	Metal fundido.	228, 215, 198, 229, 220	216.0

Tabla. A.6. Durezas en las superficies de corte para la probeta B3, tratada térmicamente.

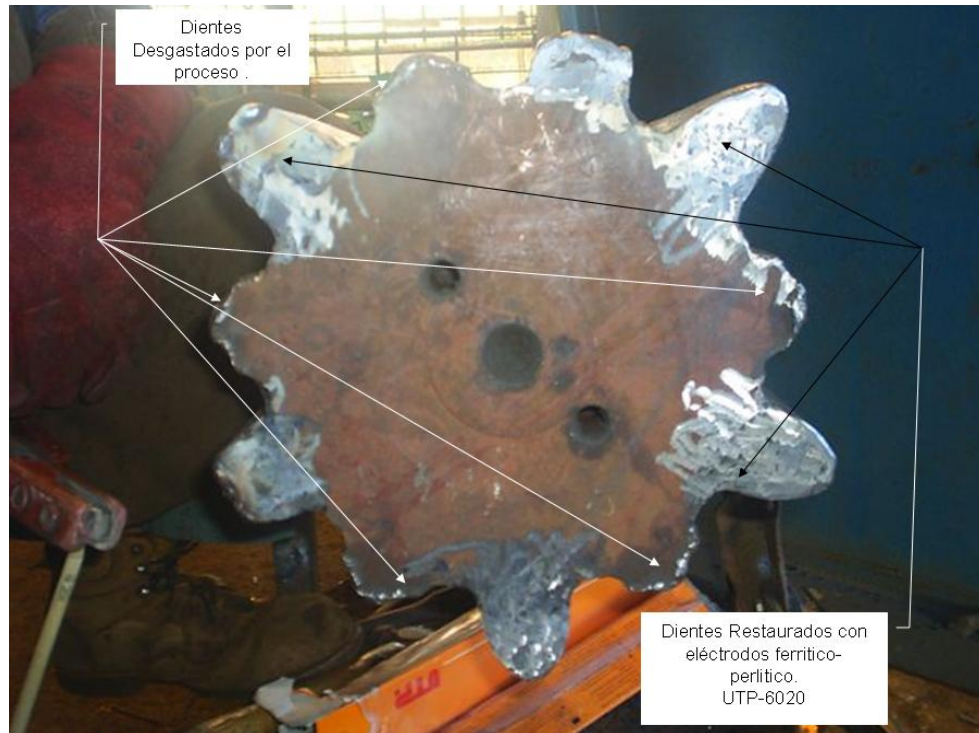
Capa	Zona de Medición	Dureza (HV)	Promedio
A	Metal Base	230, 249, 248, 250, 268	249
A	Influencia Térmica	251, 248, 262, 257	254.5
A	Metal fundido	195, 267, 285, 250, 280, 266, 270, 269, 266, 280, 257, 213, 185, 285, 269	274
B	Metal Base	249, 247, 254, 265, 168	236.6
B	Influencia Térmica	261, 248, 259	256.33
B	Metal fundido	163, 174, 228, 152, 156, 204, 144, 140, 134, 143, 170, 180	165.66

ANEXO 10

Carta tecnológica para la recuperación por soldadura de los ejes de las retroexcavadoras
Æ4 A6/45.

ANEXO 11

Vista frontal del extremo del eje en el proceso de recuperación



Anexo 10.

Carta tecnológica para la recuperación por soldadura de los ejes de las retroexcavadoras ≥ 4 A6/45.

						ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDAR (W.P.S)				
NOMBRE: PROBETA DE ENSAYO						PLANO: EJE DE JIRO DE ESCAVADORA				
DIMENSIONES: 500X300X185						Nro DE SOLDADURA				
MATERIAL # 1: AISI 4140						MATERIAL # 2: -----				
PREPARACION PARA LA SOLDADURA : BRILLO METALICO DE LA SUPERFICIE						TIPO DE SODADURA: SOLDADURA DE RECARGUE				
CAPAS	METODO	ALTURA DE LA CAPA (mm)	ANCHO DE LA CAPA (mm)	POSICION DE LA SOLDADURA	MATERIAL DE APORTE	Ø	AMP.	VOLT	POLARIDAD	VEL / DE SOLDADURA mm/Seg
1	SMAW	2	1-N	PLANA	UTP -642 (DIN 4343 B10)	2,4	70-140	12-18	+	0.85 – 2.55
2	SMAW	2	1-N	PLANA	UTP -642 (DIN 4343 B10)	2,4	70-140	12-18	+	0.85 – 2.55
3 Y 4	SMAW	3	3,4 - N	PLANA	UTP -6020 (A.W.S. E11018M)	3,2	95 -150	12-18	+	0.85 – 2.55
5 Y 6	SMAW	4	4,5 - N	PLANA	UTP -6020 (A.W.S. E11018M)	4	170 - 190	16-24	+	0.85 – 2.55
7	SMAW	3	3 N	PLANA	UTP -6020 (A.W.S. E11018M)	3,2	95 -150	12-18	+	0.85 – 2.55
PRECALENTAMIENTO: 315 °C			TEMPERATURA INTERPASE: 315 °C		TRATAMIENTO TERMICO 600 – 650 °C (1/HORAX 25MM DE ESPESOR DE LA PIEZA A RECARGAR			VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO 50 °C/HORAS		
PRUEBA NO DETRUCIVA: SI (IMPECCION VISUAL Y LIQUIDO PENETRANTE)										
NOTAS: Las Pruebas y certificación la realizara el departamento de corrosión										
ELABORADO: ING JUAN JOSE FERNANDEZ CRUZ				APROBADO DTOR ALBERTO VELAZQUEZ				IMPECTOR		
FECHA 5/045/13				LUGAR: MOA						

