



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

**PLANIFICACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN DE
CONSTRUCCIONES SOLDADAS: ANÁLISIS DE TRES CASOS.**

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Pedro Augusto Coloma Vera

**Lima – Perú
Julio del 2007**

RESUMEN DE TESIS

La soldadura es una actividad compleja. Metodológicamente estudiada y aplicada, puede producir resultados técnicamente adecuados y económicamente beneficiosos. La soldadura brinda soluciones en fabricación, reparación y mantenimiento de infraestructura y equipos. Esta tesis presenta un análisis de tres casos en los cuales la aplicación de conocimientos y estandarización existente, permite resolver el problema generado permitiendo un desempeño adecuado del equipo en servicio y a su vez el ahorro de considerables cantidades de tiempo y dinero para los ejecutantes.

El primer caso corresponde a una reparación en la industria del mantenimiento de la gran minería peruana. El enfoque de una reparación es diferente al de la producción. No se dispone de información completa sobre el componente a reparar y tampoco de los materiales necesarios para un proceso de calificación de procedimiento formal. Se puede seguir sin embargo, buenas prácticas técnicas utilizando toda la información disponible y siendo conservador para las decisiones que se basen en información insuficiente. Los resultados sin embargo deben ser confiables pues una falla producto de un mal diseño de procedimiento de reparación puede producir daños personales y económicos de muy alto costo.

El segundo caso corresponde a la fabricación de un componente pesado de acero inoxidable de una planta de ácido en la industria de la construcción. Se propone un proceso innovador para este tipo de material: soldadura con alambre tubular con gas en toda posición. Esta forma de fabricar permitirá aumentar la tasa de deposición horaria de material de aporte y reducirá los tiempos de fabricación. Sin embargo la técnica nunca ha sido utilizada en Perú para un componente tan grande y no se dispone de personal entrenado para hacerlo. Vencer los prejuicios en contra de esta técnica y preparar los procedimientos y el personal necesario para la exitosa ejecución, permitieron la aplicación del alambre tubular para toda la fabricación. El ratio de reparación luego de la inspección fue muy bajo.

Finalmente el tercer caso, presenta un ejemplo de planeamiento para un proyecto de gran envergadura: la fabricación de un muelle para una planta de gas natural licuado (LNG). Un problema de soldadura puede ser resuelto de diversas formas, algunas aparentemente más simples que otras. Pero un estudio detallado de tasas de deposición y de organización de la producción puede generar conclusiones que ahorren grandes cantidades de dinero y tiempo de fabricación. El planeamiento de las actividades de soldadura utilizando tecnologías innovadoras y la automatización al mayor grado posible (de hecho se utiliza el arco sumergido y el alambre tubular como procesos de soldadura principales), permitirán encontrar la solución óptima.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como fin presentar el detalle de tres trabajos en soldadura realizados a lo largo de mi experiencia profesional en la industria.

Dentro de la carrera de ingeniería mecánica escogí el rubro de materiales para mi especialización. Específicamente seleccioné el área de soldadura.

La soldadura es un medio de ensamble utilizado masivamente por industrias de todo tipo: construcción, mantenimiento, reparación, etc. La soldadura es una actividad apasionante pues reúne en sí muchas ciencias las cuales deben utilizarse para conseguir elaborar buenas soluciones en la materia. La soldadura combina resistencia de materiales, metalurgia, electricidad, electrónica, electromagnetismo, etc.

La soldadura en el Perú ha sufrido un cambio abrupto en los últimos años. Ha pasado de ser una actividad a la cual se asociaba con conocimiento práctico y con poco análisis y formalismo a convertirse en un proceso de unión metodológicamente abordado y ejecutado y que se encuentra dando resultados muy exitosos en los diversos campos de su aplicación en nuestro país.

La cantidad de conocimiento existente sobre soldadura en la actualidad es enorme y el desarrollo de nuevas soluciones con el uso de nueva tecnología es una actividad que no tiene freno. La apertura de las fronteras peruanas al mundo producto de la globalización y el panorama alentador de inversiones en nuestro país hacen que soluciones en soldadura cada vez más modernas, sean aplicadas en nuestro medio. Para estar a la par del desarrollo tecnológico y para no quedar a la zaga en sus métodos, la soldadura requiere continua actualización y estudio.

La soldadura es una operación que ejerce una influencia enorme en el resultado de todo el proceso productivo que la involucra. Pero en soldadura ¿son los resultados predecibles? ¿Puede influenciar la suerte en los resultados productivos que se pretenden conseguir con el apoyo de la soldadura? ¿Podría controlar “mi forma de soldar” de manera tal que obtenga siempre buenos resultados?.

¡Con soldadura los resultados son predecibles porque la soldadura no es sólo arte, sino es fundamentalmente una ciencia!

Existen reglas de juego descubiertas por el hombre a lo largo de los años (usando el método científico: observación, razonamiento y finalmente experimentación) para comprender, al menos temporalmente (hasta que aparezca otra regla más exacta) y parcialmente (hasta que aparezca otra regla que pueda explicar más cosas), el complejo fenómeno de la soldadura. Estas reglas de juego sumadas constituyen el conocimiento científico de la soldadura.

Estas reglas de juego relacionan las variables de ingreso de un proceso constructivo con soldadura, la forma en que interaccionan y los resultados de esta interacción.

Por lo tanto, si sabemos qué variables controlar y la ciencia de la soldadura nos ha permitido comprender el fenómeno de la misma (al menos de manera parcial pero suficiente), entonces podemos predecir los resultados. Y si podemos hacer esto y queremos buenos resultados, necesitaremos básicamente conocer las variables de ingreso y las reglas de este maravilloso juego.

Diferentes autores u organizaciones identifican variables de ingreso a controlar. Diferentes programas de entrenamiento de AWS (American Welding Society) al respecto consideran que estas variables son las siguientes:

- Los materiales de construcción
- El diseño de la unión soldada
- El procedimiento de soldadura
- La forma de aplicar la soldadura
- El programa de inspección que se establezca

La inspección visual es una operación que tiene como objetivo controlar estas variables durante todo el proceso productivo.

Los materiales de construcción utilizados incluyen al material base, material de aporte, materiales de respaldo, fundentes, etc. La inspección visual verificará que estos cumplen con las especificaciones requeridas y que su estado de suministro, conservación o mantenimiento sea apropiado.

El diseño de la unión soldada corresponde a la forma geométrica en la que se disponen los elementos para poder soldarlos. La disposición general de elementos y las características básicas de la unión a ejecutar (nivel de penetración, tamaño, resistencia del material de aporte utilizado, etc.) es establecida por el diseñador. El fabricante o constructor establece los detalles de la preparación de junta para cumplir con los requerimientos descritos, detalles que son aprobados por el diseñador.

El procedimiento de soldadura es un documento escrito que establece cómo se van a combinar las distintas variables involucradas en la fabricación de determinado tipo de unión soldada. Constituye la receta o la guía que el personal de construcción debe seguir para obtener resultados satisfactorios (o si se quiere para tener grandes posibilidades de obtenerlos). Toda unión soldada a ser fabricada debe tener un procedimiento de soldadura asignado y el personal que ejecute la construcción debe ceñirse estrictamente al procedimiento de soldadura establecido. La capacidad de un procedimiento de soldadura de obtener resultados satisfactorios (de acuerdo a las especificaciones de construcción establecidas contractualmente) se mide durante la calificación del procedimiento de soldadura, labor que se realiza antes de iniciada la construcción y que es de responsabilidad del constructor. Una vez calificados los procedimientos de soldadura se vuelven parte de las especificaciones y parte de la labor del inspector visual de soldaduras es verificar su cumplimiento.

La forma de aplicar la soldadura esta relacionada a la capacidad de seguir el procedimiento de soldadura y al control de diversas variables que también pueden afectar el resultado obtenido. Un buen procedimiento no garantiza buenos resultados así como una buena receta no garantiza un buen plato. Se necesita también personal calificado con herramientas adecuadas para obtener el objetivo deseado. Los soldadores son responsables de la aplicación de soldadura. Los soldadores deben haber pasado una prueba de calificación para verificar sus habilidades en determinada

configuración para determinados materiales y dentro de determinadas condiciones. Este proceso de verificación de habilidad también es responsabilidad del constructor.

Finalmente un programa estudiado y específico de inspección para controlar todos los puntos mencionados podrá prevenir a los involucrados en lo que se necesita controlar y en el tiempo correcto de hacerlo. Encontrar los inconvenientes a tiempo permitirá que ellos no devengan en no conformidades mayores.

Si la soldadura recibe cosas buenas, producirá cosas buenas. No esperemos darle cosas de mala calidad o poco controladas pues la soldadura producirá cosas malas.

Opté por la opción de presentar este tema de tesis para optar por el título de ingeniero mecánico pues creo que el ingeniero debe utilizar lo aprendido para transformarlo en soluciones en el mundo real. Estas soluciones involucran la utilización del conocimiento adquirido, la investigación en temas relacionados al problema y la aplicación exitosa de la técnica propuesta. Los ejemplos mostrados en los capítulos siguientes, muestran que una aplicación disciplinada de los principios de la soldadura y de sus métodos de control, pueden hacer que empresas peruanas desarrollen aplicaciones exitosas con resultados satisfactorios en calidad y tiempos de fabricación.

Espero que este documento sirva de referencia técnica a otros estudiantes e ingenieros.

CAPÍTULO I

1. REPARACIÓN DE CHASIS DE CAMIÓN VOLQUETE HAULPACK 330 M

1.1. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PROBLEMA:

- 1.1.1. En abril del 2000 se produjo un choque frontal de volquete Haulpak 330 M (Ver Figura 1) con cerro en yacimiento Maqui maqui en Yanacocha. Chasis fracturado en el cajón estructural denominado Material B (Ver Figura 3). Material B del chasis siniestrado en condición de no recuperable luego del choque.
- 1.1.2. Se intenta recuperar el chasis en una reparación mayor utilizando los materiales base denominados Material A y Material C (Ver Figura 3) del mismo chasis a los que se adicionará un cajón estructural extraído de una unidad inoperativa del mismo modelo de volquete.
- 1.1.3. La empresa minera no había desarrollado hasta la fecha una reparación de esta envergadura.
- 1.1.4. Alto costo de adquisición del componente nuevo. Tiempo no-operativo del equipo inaceptable (3 meses) lo que acarrearía pérdidas considerables a esta empresa (alrededor de \$300 000.0).
- 1.1.5. El trabajo a realizar esta categorizado como una reparación. Se deben utilizar los materiales originales del chasis dañado y del chasis inoperativo por lo que no hay las facilidades necesarias tales como disposición de materiales para calificación de procedimiento por ejemplo. Por lo tanto la reparación debe hacerse usando toda la información posible de los componentes originales (sin dañarlo de manera masiva) y siguiendo las

mejores prácticas de soldadura posibles de manera que se pueda obtener una reparación confiable.

1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO:

Diseñar el procedimiento de reparación y supervisar su aplicación en los talleres de mantenimiento de Yanacocha con el fin de poner operativa a esta unidad.

1.3. CARACTERÍSTICAS DEL VOLQUETE

- 1.3.1. Camión Haulpack 330M. Camión dañado tenía asignado la numeración "22".
- 1.3.2. Tara del volquete: 69 ton
- 1.3.3. Capacidad de carga bruta: 159 ton
- 1.3.4. Motor diesel 4 tiempos y 12 cilindros
- 1.3.5. Potencia motor a 2000 rpm : 783 kw; torque máximo a 1400 rpm: 4631 Nm
- 1.3.6. Capacidad tanque combustible: 330 galones (1250 litros)



Figura 1: Vista general y trabajo en Yanacocha de camiones de flota Haulpack.

1.4. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LAS UNIONES SOLDADAS A REALIZAR

- 1.4.1. Se soldarán tres materiales de composición química y propiedades desconocidas

- 1.4.2. Espesor de material A: 19mm
- 1.4.3. Espesor de material B: 9.7 mm
- 1.4.4. Espesor de material C: 11 mm
- 1.4.5. Tipo de unión material A y material B: junta a tope entre materiales de sección tubular rectangular de diferente espesor. El material A es fundido y el material B está formado de planchas laminadas: Unión soldada 1 (Ver Figura 3).
- 1.4.6. Tipo de unión material B y material C: junta en T entre dos secciones tubulares formados de planchas laminadas: Unión soldada 2 (Ver Figura 3).



Figura 2: Vista general del chasis desnudo en el taller donde se realizó la reparación ubicado en Yanacocha Norte

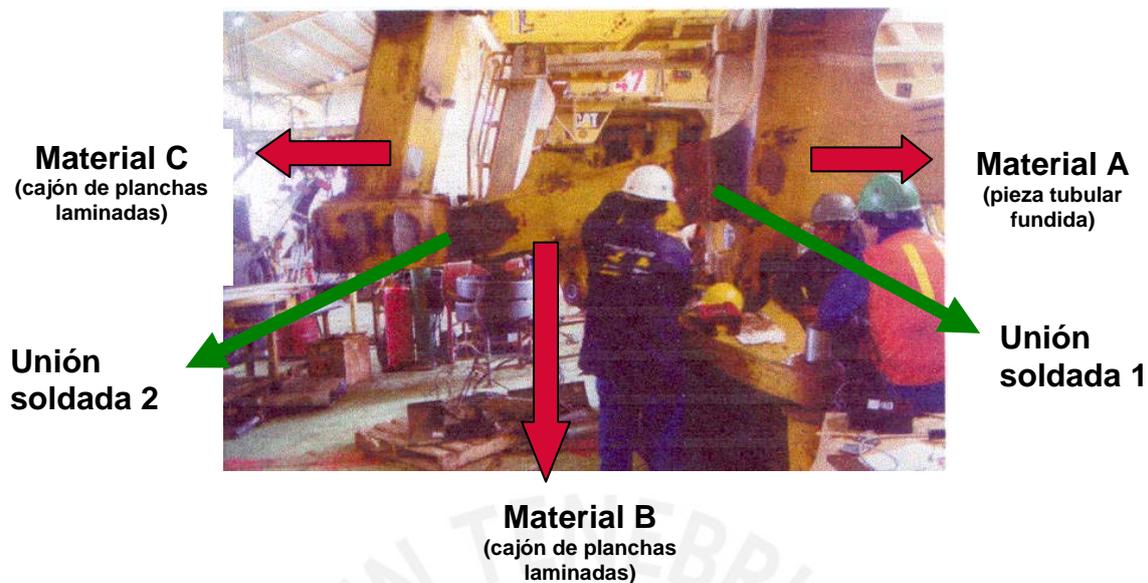


Figura 3: Chasis (ya soldado) que muestra los tres materiales involucrados y la disposición de los mismos. El Material B se fracturó después del choque por lo que se adicionó un nuevo cajón de otra unidad inoperativa.

1.5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LLEVAR A CABO LA REPARACIÓN

- 1.5.1. Determinar composiciones químicas de los materiales involucrados en las juntas soldadas a ejecutarse.
- 1.5.2. En función a las composiciones químicas, restricción y espesores determinar las temperaturas de precalentamiento
- 1.5.3. Determinar material de aporte (resistencia mecánica) necesaria de acuerdo a especificaciones de diseño y a la resistencia de los materiales involucrados
- 1.5.4. De acuerdo al tipo cargas actuantes (cargas cíclicas) optimizar las preparaciones de juntas
- 1.5.5. Afinar procedimiento: martilleo, secuencia, almacenamiento de consumibles, etc.
- 1.5.6. Determinación de capacidades y selección de personal capaz de desarrollar la aplicación. Certificación de personal.
- 1.5.7. Supervisión estrecha de la aplicación del procedimiento
- 1.5.8. Inspección: partículas magnéticas (superficial) y ultrasonido (volumétrica)

1.6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

1.6.1. Análisis químico de los materiales involucrados basados en muestras extraídas de componentes involucrados mostrados en la Figura 3. Ver Tabla 1.

Tabla 1.- Composición química de los materiales involucrados en la reparación (materiales provenientes del mismo chasis fracturado)

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	S
A: Acero fundido	0.265	0.62	0.4	0.28	0.09	0.09	0.08	0.018
B: Acero en planchas	0.093	0.78	0.26	0.05	0.09	0.05	0.02	0.03
C: Acero en planchas	0.187	0.52	0.21	0.05	0.02	0.02	0.0	0.009

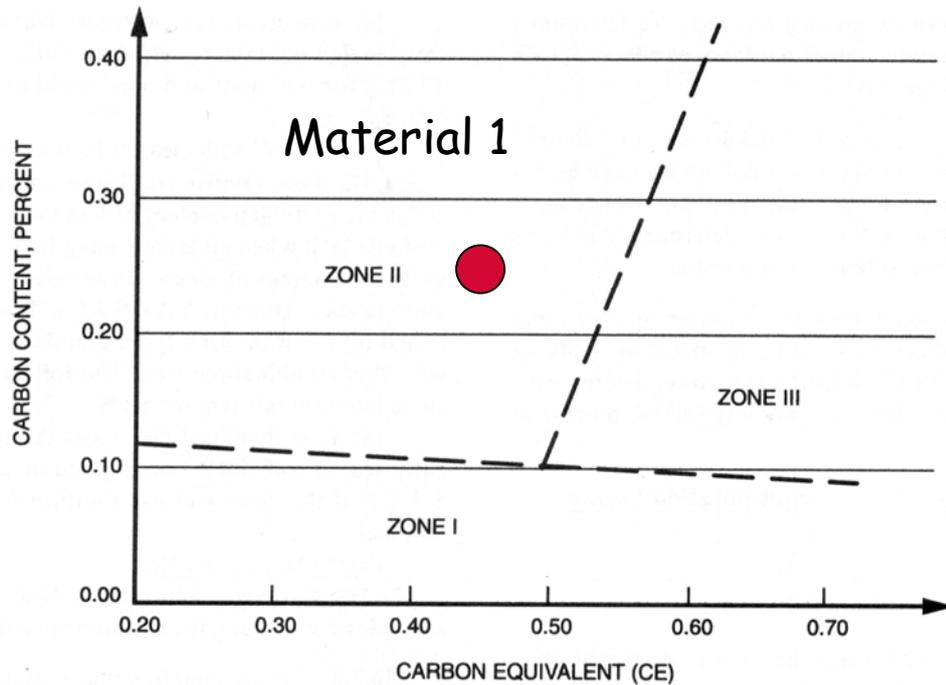
1.6.2. Determinación de temperaturas de precalentamiento

- a. Todos son aceros al carbono o de baja aleación \Rightarrow se empleará por tanto el método propuesto por el anexo XI del AWS D1.1-2000
- b. Se elige al material 1 por su mayor contenido de aleación, como el más crítico, se selecciona el método de acuerdo a la ubicación del acero en el Diagrama de Graville (figura 4):

$$CE = C + (Mn + Si) / 6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Ni + Cu) / 15$$

$$CE = 0.5190 \text{ y } C = 0.265$$

El Diagrama de Graville, indica que el material 1 es un material soldable con prácticas de precalentamiento adecuadas. Además se permite el uso del método Hydrogen Control para la determinación del precalentamiento requerido.



Notes:

1. $CE = C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$
2. See XI5.2(1), (2), or (3), for applicable zone characteristics.

Figure XI-1—Zone Classification of Steels (see XI5.1)

Figura 4.- Diagrama de Graville (Anexo XI Guidelines on Alternating Methods for Determining Preheat – AWS D1.1 2004 Structural Welding Code- Steel)

- c. De acuerdo al anexo XI del AWS D1.1 – 2000, el método de Hydrogen control puede ser usado. Este método es utilizado para calcular temperaturas de precalentamiento en aceros al carbono y aceros de baja aleación. Considera como factores de selección a la composición química, el nivel de hidrógeno existente, el espesor y el nivel de restricción de la junta. Considerando que todos estos factores son importantes para una aplicación de reparación como la presente, se escogió este método.
- d. Parámetro de composición $P_{cm}=0.3346$

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

- e. Se Consideró como nivel de hidrógeno: H2 . Este nivel corresponde a consumibles con un nivel de hidrogeno difusible menor a 10 mL/100g de metal depositado. Los electrodos no iban a ser sometidos a un tratamiento de resecado sino que iban a ser usados inmediatamente se abriera su contenedor. Las condiciones y el equipamiento disponibles impedían alcanzar niveles H1.
- f. De la tabla XI-1 se determinó como índice de susceptibilidad F
- g. Considerando un nivel de restricción alto, un espesor de 19 mm y el índice de susceptibilidad F se determinó la temperatura de precalentamiento de la tabla XI-2: $T^{\circ} = 320^{\circ}\text{F} = 160^{\circ}\text{C}$
- h. La temperatura de precalentamiento general usada fue estimada, de acuerdo a este método, en 160°C

1.6.3. Selección del material de aporte

- a. Se usará el proceso SMAW debido a las restricciones de personal y equipos. Minera Yanacocha en el año 2000 contaba con muy poco desarrollo en la utilización de soldadura con procesos semiautomáticos. Sólo poseían experiencia y personal capaz de aplicar el proceso SMAW de manera confiable.
- b. Se requiere un electrodo de bajo hidrógeno
- c. Se requiere una buena combinación entre resistencia mecánica y elasticidad
- d. Límite de fluencia del material B y material C: 50 Ksi. Este fue el único dato proporcionado por el proveedor del volquete.
- e. Límite de fluencia mínimo especificado de E8018-C3 (AWS A5.5-96): 68 a 80 ksi .
- f. Se seleccionó el aporte TENACITO 80 (AWS A5.5: E8018 – C3)

1.6.4. Preparación de juntas

- a. Unión de Material A (19 mm) y Material B (9.7mm).
- b. Problema principal: concentrador de tensiones ya que la junta será sometida a esfuerzos variables con el tiempo. Ver figura 5.



Figura 5: Fotografía que muestra el riesgo a generar concentradores de tensiones peligrosos en la raíz que puedan generar fisuras por fatiga en operación (Weldability of steels – Internacional Institute of Welding)

- c. Un concentrador en la raíz de una junta hecha desde un solo lado puede ser disminuido por una soldadura de respaldo o por una plancha de respaldo. Ver Figura 6.

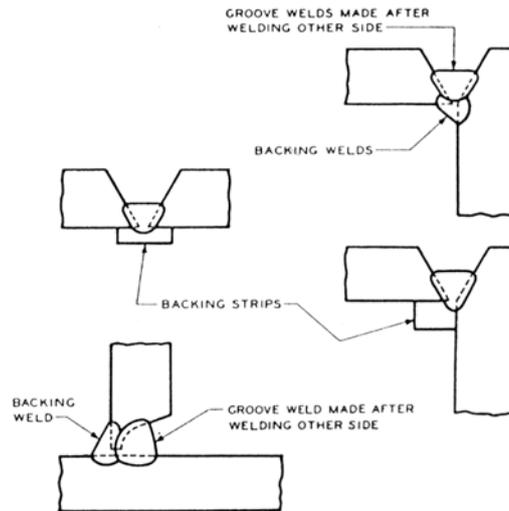


FIG. 5.8 Welded Joints Made with Backing Welds or Strips.

Figura 6: El uso de respaldo metálico tal cual es mostrado disminuye el riesgo a la fisuración por fatiga. (Weldability of steels – Internacional Institute of Welding)

- d. Las juntas seleccionadas por tanto corresponden a los detalles de juntas precalificadas de AWS D1.1-2000 de acuerdo a las siguientes figuras. Ver Figura 7 y Figura 8.

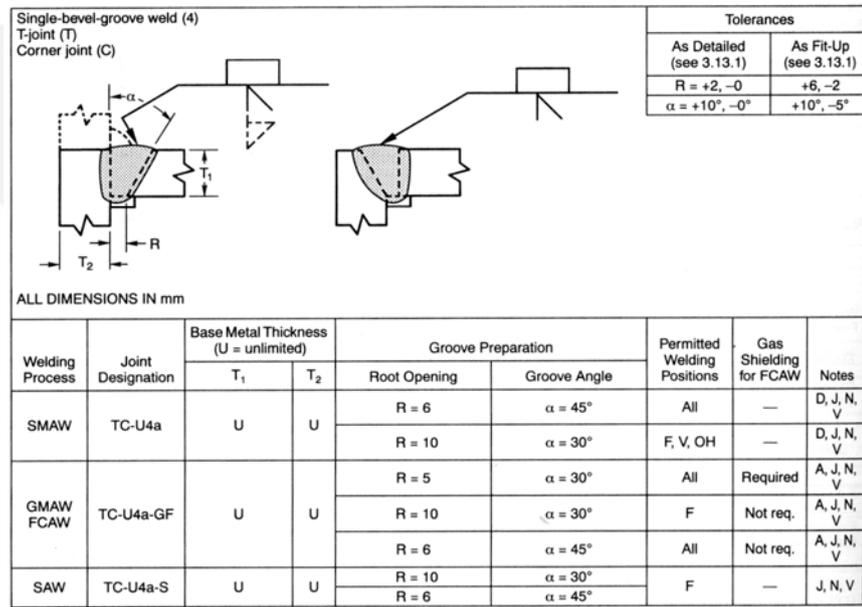


Figura 7: Junta TC-U4a seleccionada para unir los materiales A y B (Figura 3.4 AWS D1.1 2004 Structural Welding Code- Steel)

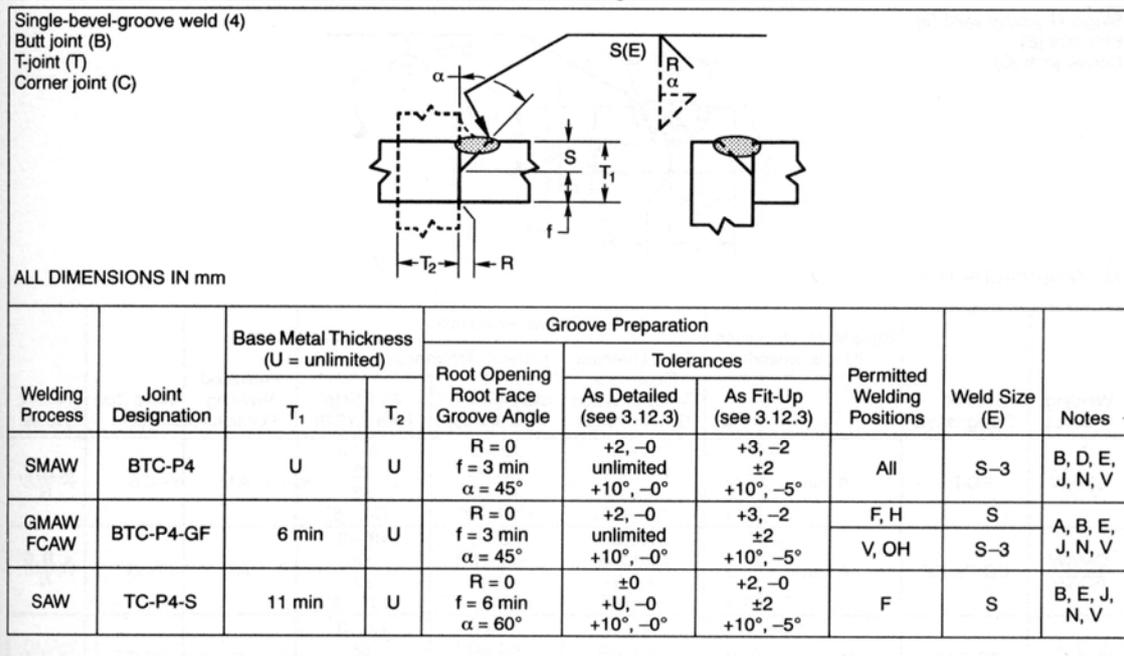


Figura 8: BTC-P4 seleccionada para unir los materiales A y B (Figura 3.3 AWS D1.1 2004 Structural Welding Code- Steel)

- e. El tamaño de filete fue extraído de la medición de un filete de un equipo idéntico. La medición arrojó un tamaño de filete mínimo especificado de 8.0 mm (de acuerdo a AWS el tamaño de filete corresponde al cateto del triángulo rectángulo inscrito en un corte del cordón de soldadura).

1.6.5. Afinamiento del procedimiento

- a. Martilleo (peening)
 - i. Previene la fisuración y reduce la distorsión y los esfuerzos de contracción
 - ii. Flujo plástico del metal de soldadura debido a golpes con martillo
 - iii. Importante en uniones de espesores grandes altamente restringidas
 - iv. No se aplica a primer pase ni a último pase, sólo a pases intermedios (ref 5.27 AWS D1.1 – 2000).

- b. Conservación de consumibles de acuerdo a referencia 5.3.2.1 de AWS D1.1 – 2000 : “ los electrodos deben ser mantenidos a una temperatura superior a 120°C...”
- c. Mantenimiento del precalentamiento de acuerdo a referencia 5.6 de AWS D1.1 – 2000: “la temperatura de precalentamiento debe ser mantenida por una distancia de al menos el espesor de la parte más gruesa soldada (pero no menor a 3 pulgadas) en todas las direcciones desde el punto de soldadura...”.
- d. El procedimiento propuesto para ambas juntas es presentado en el anexo 1.

1.6.6. Entrenamiento y calificación de personal

- a. El personal involucrado debía tener la capacidad de ejecutar juntas sanas con el electrodo mencionado en toda posición.
- b. Utilizando un acero estructural ASTM A572 Grado 50 de 25.0 mm de espesor se fabricaron dos probetas por soldador con respaldo y se soldaron en posición de prueba 3G y 4G. Las probetas fueron evaluadas visualmente y se extrajo dos especímenes de doblaje de lado. Se seleccionaron los 4 soldadores con mejores resultados.

1.6.7. Inspección

- a. La empresa minera contrató una empresa de inspección para realizar los ensayos de partículas magnéticas y ultrasonido requeridos.
- b. No se tuvo acceso al reporte de dicha inspección pero posteriormente se tuvo conocimiento que la inspección reportó reparaciones puntuales necesarias, las cuales fueron efectuadas, re-examinadas y aprobadas de acuerdo a los requerimientos de la sección 6 del AWS D1.1 – 2000.



Figura 9: Fotografías relacionadas a la inspección por partículas magnéticas. Se requirieron ensayos de partículas magnéticas y ultrasonido (Informe de inspección entregado a la minera por el servicio de la inspección particular contratado).

1.7. RESULTADO

- 1.7.1. La reparación total, de acuerdo al procedimiento de soldadura diseñado y supervisado, costó \$ 8000 dólares americanos en consumibles y accesorios además de las horas hombre de 1 supervisor y 4 soldadores de la empresa minera. La reparación duró un total de 16 horas. Por lo tanto, la reparación efectuada significó un ahorro considerable frente a la alternativa de importar un chasis nuevo (\$ 300,000 dólares americanos). El chasis del camión 22 de la flota Haulpack de la empresa minera operó por dos años sin reportar fallas en la zona de reparación efectuada. En el 2003 el camión fue vendido a otra empresa minera (Minera San Martín). Ver Figura 10.
- 1.7.2. La reparación cumplió con todos los requerimientos del código AWS D1.1-2000, habiendo significado la primera experiencia de reparación de un componente de esa responsabilidad en esta empresa minera usando especificaciones y siguiendo procedimientos internacionales.

1.7.3. En la actualidad el camión 22 sigue operando en esta flota, lo que demuestra que la solución propuesta en la reparación fue la adecuada.

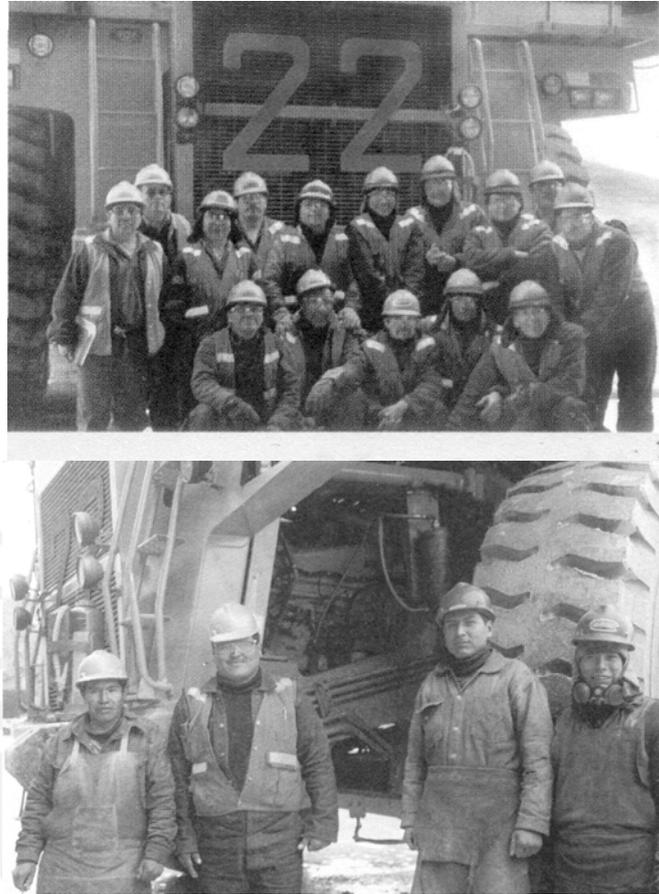


Figura 10: Fotografías que aparecieron en la edición de junio del 2000 en la revista Doré de Minera Yanacocha dentro de un artículo completo sobre la reparación preparada por el área de mantenimiento. La leyenda de las fotos decía: “Finalmente, el camión salió operativo el 18 de Mayo del presente año (2000) para orgullo y satisfacción de nuestra Área y las empresas involucradas”. En las fotos se observa a los mecánicos encargados del desensamble y ensamble y al supervisor y los soldadores involucrados (Doré Junio 2000).

CAPÍTULO II

2. FABRICACIÓN POR SOLDADURA DEL CONVERTIDOR DE UNA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO

2.1. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PROBLEMA:

- 2.1.1. En Abril del 2005 una empresa constructora nacional gana la licitación para la construcción de la planta de ácido número 2 dentro del proyecto de Modernización de la Fundición de Ilo.
- 2.1.2. Dentro de este proyecto el elemento de mayor dificultad en construcción sería el convertidor. El convertidor es básicamente un recipiente de acero inoxidable AISI 304H de 15 metros de diámetro y 30 metros de alto, con compartimientos y tuberías en su interior. Los espesores involucrados eran muy variados (por lo general mayor a 6.0 mm y menor o igual a 25 mm).
- 2.1.3. El proceso de soldadura tradicional para acero inoxidable en nuestro medio es el GTAW. Sin embargo, la baja tasa de deposición del mismo (menos de 1kg/h) convertía en inviable esta opción. Se hacía necesario emplear un proceso semiautomático de soldadura.

2.2. OBJETIVO DEL PROYECTO

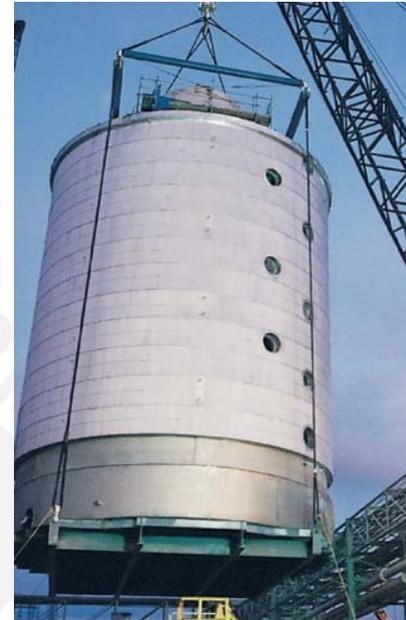
Proponer la metodología de fabricación en lo referido a soldadura de este equipo. Desarrollar y calificar los procedimientos de soldadura semiautomática

para la fabricación del convertidor, entrenar al personal y asesorar a este constructor durante la etapa constructiva, de manera tal que se logren los objetivos de calidad y de plazos impuestos por el cliente.

2.3. DESCRIPCIÓN BREVE DEL EQUIPO

El convertidor es el equipo fundamental en el proceso de fabricación de ácido sulfúrico. Este recipiente contiene una serie de camas catalizadoras que son requeridas para convertir el gas de dióxido de azufre en trióxido de azufre.

El gas fluye de arriba hacia abajo con enfriamientos intermedios requeridos. Hasta 1980 este equipo era fabricado de acero al carbono forrado con ladrillos interiores. Desde entonces los convertidores son fabricados con



acero inoxidable con el objetivo básico de reducir los costos de mantenimiento del mismo. Anteriormente los convertidores sufrían diferentes tipos de fallas: distorsión y fisuración de la cubierta, fisuración de las toberas y conversión ineficiente de SO_2 a SO_3 .

El acero inoxidable es sustancialmente más resistente a la corrosión a las temperaturas de operación por lo que se obtiene una larga vida sin mantenimiento. Además la excelente resistencia a la oxidación del acero inoxidable elimina la necesidad de forrar el componente con ladrillos interiores.

Las Juntas de soldadura típicas así como un plano general del convertidor son presentados en el anexo 2.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LA FABRICACIÓN POR SOLDADURA A REALIZAR

2.4.1. Las tasas de deposición de los procesos SMAW y GTAW considerando 100% de factor de operación (tiempo de arco encendido entre el tiempo de soldadura) se encuentran en valores cercanos a 1 kg/hora. Estos

valores se reducen considerablemente cuando se utilizan factores de operación de alrededor de 0.4, que son valores típicos para la utilización en construcción de estos procesos. Esto es cierto para las condiciones de soldadura (parámetros eléctricos, espesores, tamaño de material de aporte, posición de soldadura, etc.) con las que se fabricaría el equipo con los procesos mencionados.

- 2.4.2. Otros procesos semiautomáticos como el GMAW-P o el FCAW pueden ser evaluados. Sin embargo el diseñador del equipo opinó que un excesivo calor aportado por los mismos podría deformar los elementos en cuestión.
- 2.4.3. En Perú no existe experiencia en la soldadura en toda posición utilizando FCAW en acero inoxidable. Las soluciones con protección gaseosa son cuestionadas por la cercanía del proyecto al mar y por los vientos fuertes en la zona.
- 2.4.4. El GMAW-P (pulsado) puede ser una opción sin embargo el equipamiento es caro y los controles y utilización de parámetro múltiples no favorece su aplicación. El FCAW-G se perfila entonces como la selección a evaluar.
- 2.4.5. El FCAW-G puede alcanzar tasas de deposición de hasta 4.0 kg/h en posición plana y 2.5 kg/h en posiciones forzadas, con factores de operación superiores a 0.60. Esto es cierto para las condiciones de soldadura (parámetros eléctricos, espesores, tamaño de material de aporte, posición de soldadura, etc.) con las que se fabricaría el equipo con los procesos mencionados.
- 2.4.6. Esta opción es también cuestionada por la falta de experiencia en su uso y por la carencia de personal certificado y con experiencia en esta aplicación. La construcción se encuentra regida por estándares de fabricación de recipientes a presión según ASME. Ya que la soldadura debería ser efectuada en toda posición, de acuerdo a la sección IX del mencionado código, se requeriría tener al menos 30 soldadores certificados en posición 3G y 4G.

2.5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LLEVAR A CABO LA FABRICACIÓN POR SOLDADURA

- 2.5.1. Se encontrará el proceso de soldadura que combine alta tasa de deposición y un depósito de metal de soldadura del tipo 308H. Las altas tasas de deposición disminuirán los tiempos de fabricación y permitirán cumplir con los plazos establecidos por el proyecto.
- 2.5.2. Se plantearán los procedimientos de soldadura propuestos.
- 2.5.3. Se seleccionarán los equipos de soldar y accesorios idóneos de acuerdo al tipo de construcción.
- 2.5.4. Se monitoreará la soldabilidad en posición de este producto en el fabricante original y se debe realizar tests por lote de conformidad de composición química. Debido a los plazos estrechos de producción no se puede aceptar no conformidades en lotes de importación pues retrasarían la obra por lo menos en 4 semanas.
- 2.5.5. Se organizará un programa piloto de entrenamiento local (en Perú) para soldadores y probar el equipo y los aportes propuestos.
- 2.5.6. Se calificará el procedimiento en presencia de representantes del cliente y del constructor.
- 2.5.7. Se calificará a los soldadores.
- 2.5.8. Se realizará entrenamiento en campo para corregir imperfecciones.
- 2.5.9. Se monitoreará el proceso productivo hasta que el constructor lo haya dominado completamente.

2.6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

- 2.6.1. Selección del proceso de soldadura propuesto
Una evaluación rápida permite indicar que el FCAW-G (alambre tubular protegido con gas) es una solución óptima si cumple los requisitos operativos de aplicación y si deposita de forma consistente la aleación en mención.

Un cuadro comparativo de las bondades del proceso es el siguiente:

Tabla 2. Cuadro comparativo de los procesos y productos a seleccionar

Tipo de Alambre Tubular	Proceso	Proceso	Proceso
	MIG Convencional	MIG Pulsado	Electrodos Revestidos
<p>“Flux Cored” para posiciones P y H</p> <p>1.1.1 Tetra S®</p>	<p>Mayor estabilidad de arco, no hay salpicaduras, mayor flexibilidad de parámetros de soldadura sin generar falta de estabilidad de arco, Mayor comodidad del operador, escoria autoremovible y cordón de soldadura limpio y brillante, mayor tasa de deposición, mayor posibilidad de aleaciones, opera con gases más baratos y fríos.</p>	<p>Mayor estabilidad de arco, mayor flexibilidad de parámetros de soldadura sin generar falta de estabilidad de arco, Mayor comodidad del operador, mayor tasa de deposición, mayor posibilidad de aleaciones.</p>	<p>Menor número de defectos, debido a las paradas y reaberturas de arco, tasas de deposición incomparablemente mayores (cuando menos 300 %) pues en posición plana y filete horizontal se pueden usar valores de corrientes elevados, mayor estabilidad de arco, mayor rendimiento y eficiencia, no hay perdidas de puntas, mayor comodidad del operador y menos humos de soldadura.</p>
<p>“Flux Cored” para todas posiciones</p> <p>1.1.2 Tetra V®</p>	<p>A parte de las ventajas arriba, ofrece el sistema “One condition all position” , es decir que un solo juego de parámetros de soldadura es aplicable a toda posición.</p>	<p>A parte de las ventajas arriba, ofrece el sistema “One condition all position” es decir que un solo juego de parámetros de soldadura es aplicable a toda posición.</p>	<p>A parte de las ventajas arriba, ofrece el sistema “One condition all position” es decir que un solo juego de parámetros de soldadura es aplicable a toda posición.</p>

En búsqueda de aleaciones conforme a las especificaciones se establece como productos pre-seleccionados a los alambres: TETRA V 308-G® de 1.2 mm para las soldadura en toda posición y TETRA S 308-G® de 1.2 mm para la soldadura en posición plana y en filete horizontal. Ambos alambres son fabricados por la empresa Welding Alloys de Kentucky, USA.

Las hojas técnicas de ambos productos son mostradas en el anexo 3 de este trabajo.

El proceso SMAW siempre debe ser considerado como una opción para poder realizar juntas con poca posibilidad de acceso. Por tal motivo también se seleccionó material de aporte de este tipo: SAFINOX BCN 304H® fabricado por la empresa SAF de Francia. La hoja técnica de este producto también es mostrada en el anexo 3.

- 2.6.2. En función a los espesores involucrados se presentaron 22 procedimientos de soldadura propuestos los cuales incluían soldadura en uniones a tope o en filete en diferentes espesores de material, posiciones de soldadura y procesos de soldadura. Todos estos procedimientos fueron enviados para aprobación a la central de KAVERNER en Vancouver Canada donde recibieron la aprobación respectiva. Los procedimientos presentados en el anexo 4 tienen la siguiente nomenclatura de denominación:

WPS GyMXYZ

Donde: GyM es el nombre del constructor

X: corresponde al proceso seleccionado: T: FCAW-G y S: SMAW

Y: Rango de espesores aplicables; -6 : hasta 6 mm; 6-12 : desde 6 hasta 12 mm ; 12 - U: mayores a 12 mm hasta ilimitado

Z: Posición de soldadura: F: plana, V: vertical

- 2.6.3. Los equipos y accesorios son una parte fundamental de una solución en soldadura. En la actualidad la oferta en este rubro es muy variada con opciones para cada aplicación. La empresa constructora nacional usó los equipos seleccionados durante el montaje del convertidor; ello

significó tener soldadura en todas las posiciones y el equipo debía ser lo suficientemente portátil para transportarlos dentro de los diferentes compartimentos y alturas del montaje. La calidad de la corriente y voltaje de soldadura también son de vital importancia. La soldadura en toda posición con alambre tubular requiere precisión en los parámetros seleccionados además de estabilidad con la variación de la potencia de ingreso proveniente de los generadores.

100% de ciclo de trabajo de característica CC/CV: XMT 304 CC/CV de MILLER. Asimismo se seleccionó un alimentador liviano y robusto con antorchas ligeras para la soldadura en posición. Se seleccionó los alimentadores SUITCASE 12VS de MILLER.

A continuación se presentan algunas fotografías de la ejecución del proyecto para que se observe la importancia de la selección del equipamiento y se observe la influencia que pueda. Por este motivo se seleccionó un equipo inversor de soldadura de 300 A al tener en los resultados de un proyecto de construcción. Ver Figura 11.





Figura 11: La soldadura en espacios de acceso limitado y en altura hacen necesario una selección adecuada de equipamiento que permita ejecutar los procedimientos de soldadura propuestos en cada lugar requerido. Por eso material de aporte, procedimientos, equipos, plan de inspección, etc. forman parte de una solución completa a un problema de soldadura.

- 2.6.4. Completa la solución se debió verificar en el lugar de fabricación del material de aporte la soldabilidad en posición deseada y el cumplimiento de las especificaciones respecto al análisis químico de metal depositado. Para ello se viajó en julio del 2005 a Kentucky, USA donde se encuentra la planta de Welding Alloys proveedor del aporte seleccionado.

En esta planta se soldaron cupones para análisis químico de metal depositado de acuerdo a los requerimientos de AWS A5.22. Finalmente se hicieron pruebas de soldabilidad en todas las posiciones a ejecutarse en el proyecto.



Figura 12: Pruebas de metal depositado y de soldabilidad realizadas en USA a los lotes de alambre fabricados para el proyecto.

- 2.6.5. Se realizó un programa piloto en Perú para que soldadores peruanos con experiencia en alambres tubulares estructurales se entrenaran en la aplicación de la solución presentada. Se entrenó a 5 soldadores por un período de 3 días teniendo resultados satisfactorios similares a los obtenidos en USA. El entrenamiento empezó con deposiciones de cordones en filete multi-pase en posición 2F y 3F. Posteriormente se soldó en posición de prueba 3G en planchas de $\frac{1}{2}$ " de espesor, soldando por ambos lado de la plancha. las características operativas del alambre permitieron una rápida adaptación al alambre tubular de inoxidable. Ver Figura 13.



Figura 13: Programa piloto de entrenamiento realizado en Lima

2.6.6. Se realizó la calificación de los procedimientos de soldadura en presencia de la empresa auditora contratado por el cliente. Adicionalmente a los requerimientos del estándar ASME IX se evaluó radiográficamente los cupones fabricados para probar la susceptibilidad a la generación de porosidad. El PQR quedó en poder del cliente y del constructor. De la misma forma se calificó a los soldadores necesarios y se obtuvo la autorización para el inicio de la construcción. Ver figura 14.





Figura 14: Calificación de procedimiento de soldadura en posición 3G y de acuerdo a ASME Sección IX.

- 2.6.7. Entrenamiento en campo y monitoreo del proceso productivo. Se realizaron programas de inducción en la soldadura con alambre tubular para el personal de dirección de la producción y de control de la calidad. Estos programas tenían como fin que todas las personas relacionadas con el proceso de fabricación conocieran el procedimiento de soldadura usado y pudieran proveer de todas las condiciones necesarias para su exitosa aplicación. Además se realizaron entrenamientos y supervisiones en campo para resolver cualquier inquietud y corregir imperfecciones en cualquiera de los puntos de construcción. Sin embargo por el cuidadoso planeamiento no se presentaron inconvenientes importantes y las actividades de soldadura se desarrollaron con normalidad.



Figura 15: Entrenamiento y supervisión de las actividades productivas

2.7. RESULTADOS OBTENIDOS

- 2.7.1. La fabricación terminó de manera exitosa en octubre del 2006. Ver Figura 16.
- 2.7.2. El porcentaje de reparación luego de las inspecciones fue inferior al 0.5% de las soldaduras totales efectuadas.



Figura 16: Fotografía del convertidor en sus etapas finales de construcción en Abril del 2006.

CAPÍTULO III

3. PLANEAMIENTO DE LAS ACTIVIDADES DE SOLDADURA PARA EL PILOTAJE DE LAS INSTALACIONES MARÍTIMAS DE UN PROYECTO LNG EN LA COSTA PERUANA

3.1. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PROBLEMA:

3.1.1. Las instalaciones marítimas del proyecto de exportación de gas natural licuado serán construidas en el período 2007 – 2010. Este proyecto será fabricado por el consorcio CDB Melchorita compuesto por tres empresas: Odebrecht, Saipem y Jan de Nul en el km. 169 de la Panamericana sur.



Figura 17.- Vista de las instalaciones portuarias del proyecto LNG en pampa Melchorita.

3.1.2. LAS instalaciones portuarias implicarán una inversión de 250 millones de dólares. Constituyen la construcción estructural más grande que ha sido fabricada en el Perú.

3.1.3. El propio consorcio CDB se encargará de la fabricación del pilotaje. Las estructuras del muelle serán encargadas a contratistas nacionales.

3.2. OBJETIVO DEL PROYECTO:

Elaboración y comparación técnico económica de los diferentes procedimientos posibles de soldadura a ser utilizados en taller de fabricación de pilotes y en el montaje de las estructuras sobre los pilotes hincados.

3.3. DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INSTALACIÓN

3.3.1. 3300 millones de dólares de inversión. 2150 millones (65%) se invertirán en el Perú y 1150 millones se invertirán en el extranjero en transporte marítimo y terminales de regasificación.

3.3.2. Se produciría Gas Natural Licuado (conocido como LNG, por sus siglas en inglés). El LNG es un líquido inodoro, incoloro, no corrosivo y no tóxico. Este producto se obtiene al purificar el gas natural y enfriarlo a una temperatura de -163°C a presión atmosférica. El proceso de enfriamiento transforma el gas natural en líquido reduciendo su volumen 600 veces.

3.3.3. Se utilizará gas natural, principalmente metano, el cual llegará a la Planta a través de un ramal que proveniente del gasoducto Camisea - Lima. El gas natural es producido en la región de Camisea y es sometido a un procesamiento mínimo antes de ingresar al gasoducto.

3.3.4. PERU LNG propone construir, durante un plazo de cuatro años, las instalaciones necesarias para el transporte, licuefacción y exportación de LNG. Estas instalaciones son las siguientes:

- a. Planta de GNL ubicada en Pampa Melchorita, Perú, e instalaciones marítimas de exportación y rompeolas. El planeamiento presentado

en este proyecto está dedicado a las instalaciones portuarias mencionadas.

- b. Un gaseoducto para transportar el gas natural requerido en la planta desde Ayacucho hasta la Planta de Licuefacción de Pampa Melchorita.

3.3.5. El LNG será almacenado en tanques hasta el momento de su embarque en buques metaneros, embarque que se realizará aproximadamente cada 5 días.

3.3.6. Periódicamente se realizarán actividades de mantenimiento de la planta y de las instalaciones marítimas.

3.3.7. Se proyecta que la planta opere por un mínimo de 20 años. Este proyecto generará 35 000 puestos de trabajo.

3.4. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROBLEMA

3.4.1. Se planificará la soldadura del pilotaje. Se soldarán 540 pilotes los cuales están constituidos por secciones tubulares de material API 5LX52 y API 5LX65 en diámetros de 32" a 48". Los espesores a soldarse variarán desde 0.866" hasta 1.5".

3.4.2. Los pilotes estarán formados por la unión de secciones de 12m de estas tuberías. Cada pilote estará formado por tres tuberías soldadas. A esta soldadura se le llamará soldadura de taller (shop welding). Existirán uniones soldadas entre espesores desiguales sin respaldo y se permite la soldadura con respaldo (backing) metálico para las uniones de espesores iguales.

3.4.3. Los pilotes soldados serán clavados en el mar y en el extremo superior del mismo será soldado a las estructuras del muelle (trestle) con juntas de surco (groove welds) de penetración completa soldadas desde un solo lado. A esta soldadura se le llamará soldadura de campo (field welding).

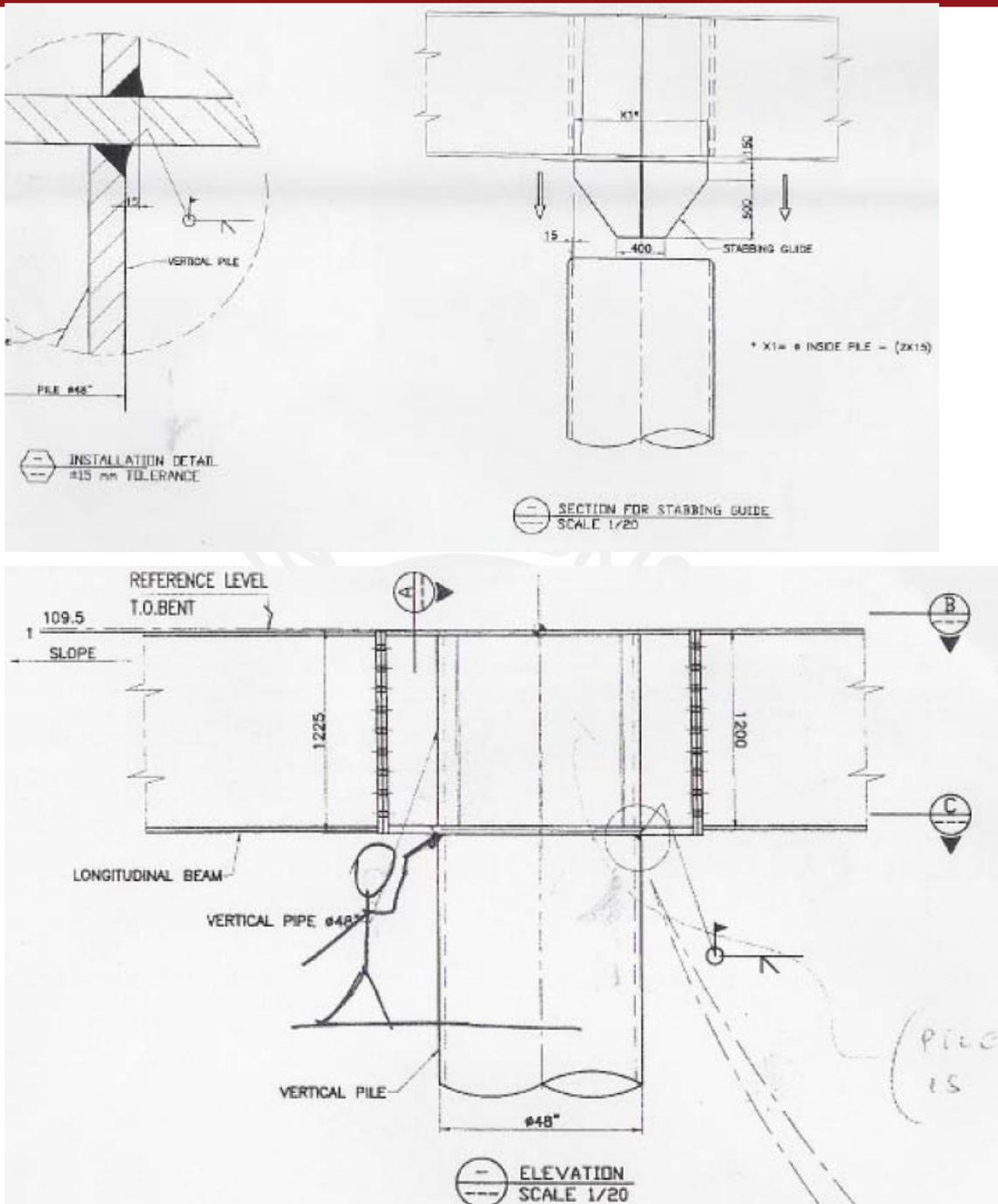


Figura 18: Detalle de la unión soldada en campo (Extracto de plano de detalle de uniones pilote – trestle propiedad de CDB)

3.5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LLEVAR A CABO LA SELECCIÓN

- 3.5.1. Conocer las especificaciones contractuales de construcción
- 3.5.2. Realizar una evaluación técnico económica de cada opción tanto para la soldadura en taller (shop welding) como para soldadura en campo (field welding). Esta evaluación debe incluir la selección del material de aporte y del equipamiento necesario.
- 3.5.3. Desarrollar los procedimientos de soldadura propuestos para el proceso de soldadura seleccionado.

3.6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

- 3.6.1. El pilotaje y las estructuras del muelle serán fabricados cumpliendo los requerimientos del API RP2A WSD (Design and Construction of Fixed Offshore Platform) y el AWS D1.1 (Structural Welding Code Steel) .Los pilotes cumplen con las especificaciones de API 5L Specification for Line Pipe. Además se debe cumplir con los requerimientos de CDB (Structural Steel Specification y Pile Steel Specification). Los pilotes serán soldados con la base inferior de las estructuras del muelle , en cuyo lugar se encuentra el material API 2H Grado 50. Los requerimientos de resistencia deben cumplir los mínimos requeridos de resistencia última de cada especificación pero los requerimientos de impacto deben estar de acuerdo a las especificaciones de CDB mencionadas y mostradas en las siguientes figuras. Ver Figura 19 y 20.

The minimum impact tests requirements shall comply with API 5L.

Steel Grade	Fracture Toughness Tests	
	Temperature (°C)	Minimum Average Energy (J)
X52 PSL1	n/a	n/a
X65 PSL2	0	27 transverse or 41 longitudinal
X70 PSL2	0	27 transverse or 41 longitudinal

Lowest Anticipated Temperature 11°C.

Fracture toughness tests shall be carried out as per API specification 5L.

Figura 19: Requerimiento de tenacidad para los pilotes de acuerdo a Pile Steel Specification (Procedimiento interno CDB Pile Steel Specification)

Material Class	Group I YS ≤ 280 MPa		Group II 280MPa <YS ≤ 360 MPa		Group III YS > 360 MPa	
	V-notch energy (J mini)	Test temperature (°C)	V-notch energy (J mini)	Test temperature (°C)	V-notch energy (J mini)	Test temperature (°C)
A	n/a	n/a	34	10	34	Minus 10
B	n/a	n/a	34	10	34	10
C	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

Figura 20: Requerimiento de tenacidad para los elementos estructurales de la estructura del muelle . El material API 2H Grado 50 que forma la base del trestle está clasificado como material del grupo II y de la clase B (Procedimiento interno CDB Structural Steel Specification)

- 3.6.2. Los plazos de construcción (40 meses) hacen imprescindible la optimización de las tasas de metal depositado. Para alcanzar ello, la soldadura semiautomática y mecanizada deberán ser consideradas como las opciones más adecuadas.
- 3.6.3. Para las uniones de espesores iguales con respaldo, se optimizará la capacidad productiva implementando el proceso SAW (arco sumergido) luego de ejecutar los primeros 2 pases con FCAW-G. Los primeros pases con un proceso semiautomático permitirán:

- a. Poder corregir pequeños errores de alineamiento y preparación de las juntas.
- b. Aumentar el espesor de metal sobre el cual se depositará metal de soldadura con SAW. El proceso SAW utilizará valores de amperaje de alrededor de 600 A con alambre de 4.0 mm para poder mantener una tasa productiva alta. Por lo tanto se requerirá un espesor de metal suficiente que sirva como respaldo del primer pase hecho con SAW.

3.6.4. Para soldadura sin respaldo de espesores desiguales, se debe seleccionar un proceso semiautomático para la raíz. Se selecciona la alternativa RMD para el pase de raíz con alambre sólido seguido de 3 rellenos con el proceso FCAW-G. Posteriormente se aplicará SAW para completar la junta.

3.6.5. El sistema RMD (Regulated metal deposition) viene siendo usado en diferentes proyectos alrededor del mundo para realizar pases de raíz de manera semiautomática. El RMD es una modificación controlada por software de la transferencia cortocircuito convencional. El ciclo de corriente presente en el RMD se muestra en la siguiente figura. Se aplicará en posición vertical descendente. Se obtendrán velocidades de avance en el rango de 10 pulg/min en la raíz, un valor que dobla las velocidades de otros procesos. Ver Figura 20 y 21.

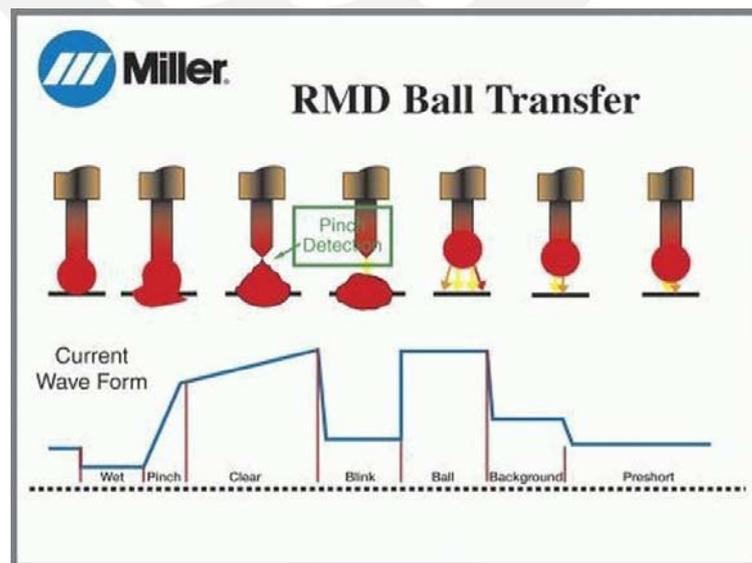


Figura 20: Ciclo modificado de cortocircuito que describe el funcionamiento del RMD (RMD basics – Miller Electric Inc.).



Figura 21. Imágenes que muestran la aplicación de RMD en un proyecto de pilotaje en Brasil (Bira Costa Millerwelds Brasil).

- 3.6.6. La utilización de SAW permitirá reducir los tiempos de fabricación al máximo, ya que con alambre de 4.0 mm se pueden obtener tasas de deposición de hasta 10 kg/h con valores de corriente de 600 A. Los proyectos de construcción masiva siempre intentan implementar procesos mecanizados para incrementar la productividad. El proceso SAW para esta aplicación requerirá la implementación de un sistema de rodillos viradores (turning rolls) que exigirán una inversión de \$ 60 000. Sin embargo las tasas de producción obtenidas justificarán ampliamente la selección. Ver Figura 22. El equipamiento necesario para esta implementación es descrito en el anexo 9.
- 3.6.7. La determinación de la opción técnica será respaldada por un análisis de costos de producción. Una solución técnicamente óptima pero poco productiva hace que la misma sea inviable. Un análisis debe considerar:
- La tasa de deposición (D_r): es el peso de metal de soldadura depositado por unidad de tiempo por un proceso determinado. generalmente está en función de la corriente de soldadura.
 - La eficiencia de deposición (D_e): Es el ratio de metal depositado y peso del metal de aporte usado, expresado como un porcentaje.
 - El factor de operación (O_f): Es el ratio del tiempo de arco y el tiempo total de trabajo de un soldador u operador de soldadura. También es expresado en porcentajes.
- 3.6.8. De manera estándar la tasa de deposición se establece considerando un factor de operación de 100%.
- 3.6.9. Valores estándares para estos tres factores son disponibles en la bibliografía existente.
- 3.6.10. De esta forma se puede calcular:
- Cantidad de metal depositado: Por una estimación volumétrica de la cantidad de soldadura necesaria en la pieza, basándose se en el metrado establecido por la ingeniería.

- b. El tiempo de soldadura teórico considerando el volumen total a depositarse multiplicado por la densidad del acero y dividido entre la tasa de deposición escogida.
 - c. El numero de horas hombre dividiendo el tiempo de soldadura teórico entre el factor de operación escogido o estimado.
- 3.6.11. El estudio técnico económico de ambas opciones para Shop Welding está presentado en el anexo 5. Se incluyen además opciones como el SMAW sólo para ver diferencias comparativas.
- 3.6.12. Los procedimientos de soldadura generados en función a las opciones seleccionadas está presentado en el anexo 6.
- 3.6.13. De la misma forma para las uniones soldadas de campo se realizó el estudio técnico económico comparando los procesos MCAW y FCAW-G para el relleno y acabado. Este estudio se encuentra presentado en el anexo 7 de este informe. Los procedimientos de soldadura finales propuestos para la soldadura de campo son finalmente presentados en el anexo 8.
- 3.6.14. Para la soldadura en campo se seleccionó el proceso FCAW-G por ser un proceso de alta deposición y por existir en el Perú personal suficiente que ha utilizado este proceso. La tasa productiva se mejoró utilizando alambre de 1.6 mm con amperajes entre 220 a 240 A para soldadura en toda posición.



Figura 22: SAW para el relleno y acabado girando sobre rodillos viradores “turning rolls” para el shop welding (Bira Costa Millerwelds Brasil).

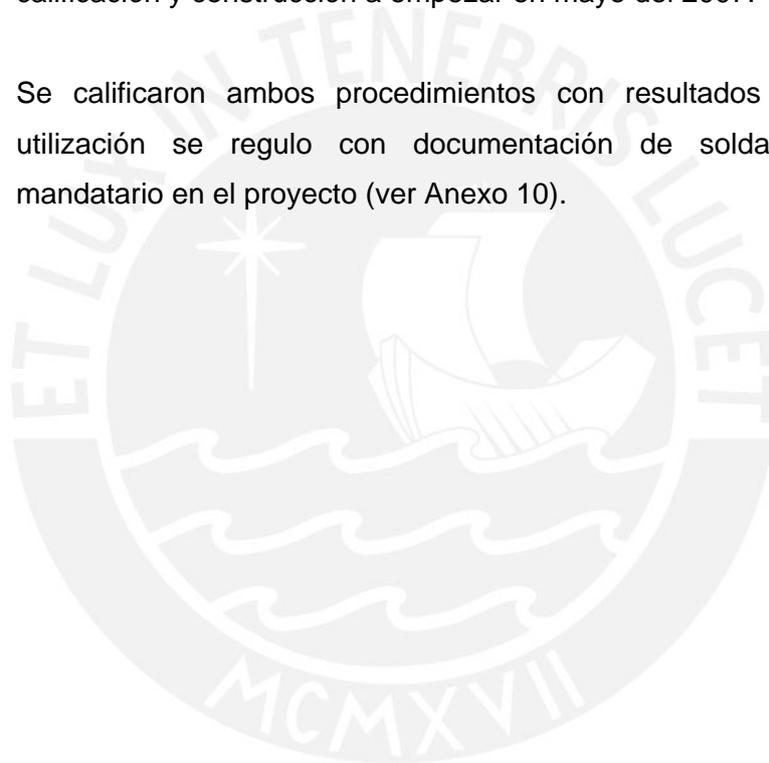
3.6.15. Los cálculos necesarios de precalentamiento así como una presentación global de la solución son presentados en el anexo 9.

3.7. RESULTADOS OBTENIDOS

3.7.1. Se aprobaron los procedimientos propuestos por la ingeniería del proyecto en Saipem Francia y por el cliente PERU LNG.

3.7.2. Se inició la instalación de equipamiento en Melchorita con miras a la calificación y construcción a empezar en mayo del 2007.

3.7.3. Se calificaron ambos procedimientos con resultados exitoso y su utilización se regulo con documentación de soldadura de uso mandatario en el proyecto (ver Anexo 10).

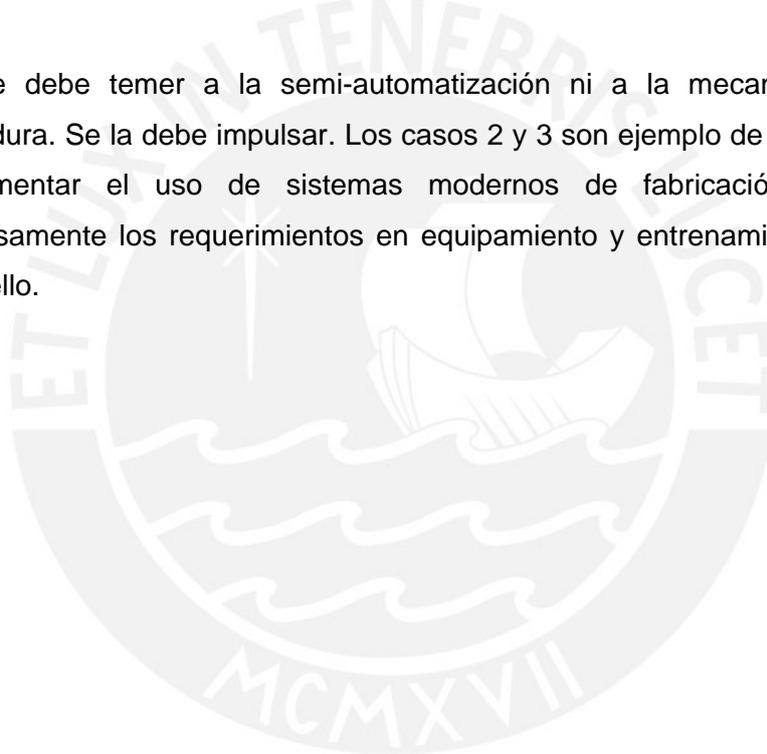


CONCLUSIONES

1. La estandarización en soldadura cumplida de manera rigurosa además de un programa detallado de control durante la ejecución garantiza resultados óptimos en la aplicación y por lo tanto hacen económicamente viable cualquier proceso que incluya a la soldadura. La estandarización no es un escollo ni un requerimiento administrativo solamente. Su consciente cumplimiento ahorra tiempo y dinero a las empresas que la utilizan y contribuye a asegurar la calidad de la unión soldada.
2. Existen herramientas en Perú para entrenarse en desarrollar soluciones en soldadura de nivel internacional. Los programas de entrenamiento locales entregan conocimiento suficiente para que, acompañados de la experiencia en campo, se pueda planificar, proponer y ejecutar soluciones integrales en soldadura en el Perú. Los tres casos mencionados hacen uso de recursos existentes en nuestro país en proyectos con requerimientos técnicos supervisados y aprobados internacionalmente.
3. La soldadura de reparación comentada en el Caso 1 ha operado de manera satisfactoria desde el año 2000 a la fecha. No se han reportado fallas ni fisuras en operación. Esto significa que se puede diseñar procedimientos confiables de reparación siempre y cuando se desarrollen algunos procedimientos básicos de selección de variables (análisis químico, preparaciones de junta de acuerdo a recomendaciones internacionales estándar, adecuada selección de materiales de aporte, evaluación del personal que ejecutará el trabajo en condiciones similares a la reparación a realizar, etc.) . A pesar que las condiciones impedían realizar un proceso formal de calificación de procedimiento de

soldadura, se pueden usar criterios técnicos que proporcionen confiabilidad a este tipo de trabajo.

4. Los casos 2 y 3 son casos relacionados a la fabricación masiva y sí permiten seguir el camino trazado por la estandarización internacional: generación de procedimiento propuesto - calificación de procedimiento - calificación de soldadores - supervisión de la construcción - ensayos diversos como los ensayos no destructivos por ejemplo. Este ciclo puede ser recorrido de manera eficiente produciendo una estructura o componente que cumple los requerimientos técnicos aplicables, con buenas tasas de productividad que aseguren el cumplimiento de los plazos propuestos.
5. No se debe temer a la semi-automatización ni a la mecanización de la soldadura. Se la debe impulsar. Los casos 2 y 3 son ejemplo de ello. Se puede implementar el uso de sistemas modernos de fabricación cumpliendo rigurosamente los requerimientos en equipamiento y entrenamiento requerido para ello.



RECOMENDACIONES

1. La trascendencia de las decisiones en soldadura en cualquier aplicación es innegable. Pero una solución requiere de múltiples actores: ingenieros, supervisores, inspectores, soldadores y ayudantes. Los programas de entrenamiento disponibles deben ampliarse para dar el conocimiento necesario que cada personaje requiere. El desarrollo sostenible de Perú requiere una base sólida de personal entrenado en diversas materias y a diferentes niveles.
2. La soldadura es sin duda uno de los motores del progreso pues facilita la construcción con acero. La construcción de infraestructura con acero es confiable, rápida, versátil, etc. Por lo tanto los programas de ingeniería aplicables (aquellos que la usen o la consideren como un proceso de unión) de la PUCP deben reforzar su enseñanza. El mercado requiere más ingenieros con conocimiento profundo en la materia, especialmente en estandarización aplicable y en desarrollo de programas de inspección para su control.
3. El desarrollo de la ingeniería de la soldadura en Perú es innegable. Pero debe redoblar sus esfuerzos en incentivar el uso de sistemas semiautomáticos y mecanizados. Debemos desarrollar de manera paralela la utilización de sistemas modernos de corte, soldadura, inspección y pintura. Sólo se podrá responder a las exigencias del mercado actual produciendo bien y más rápido.
4. Una producción más dinámica requerirá también de sistemas ágiles de aseguramiento y control de la calidad. La trazabilidad de una fabricación rápida y eficiente debe mantenerse. El uso de sistemas electrónicos e informáticos (códigos de barras para elementos y lectores ópticos, sistemas centrales de registro, etc.) también debe impulsarse de manera agresiva.

BIBLIOGRAFÍA

- 1. AWS D1.1 STRUCTURAL WELDING CODE STEEL 2006**
Autor AWS D1 Committee on Structural Welding Año 2006
20ava edición/
Editores American Welding Society
- 2. WELDING HANDBOOK VOL 4 MATERIALS AND APPLICATIONS – PART 2**
Autor American Welding Society - Año 1998. Octava Edición
Editores Willian R. Oates- Alexander M. Saitta
- 3. FATIGUE STRENGTH OF WELDED STRUCTURES**
Autor SJ Maddox - Año 1991 - Segunda Edición
Editores Abington Publishing
- 4. WELDING METALLURGY**
Autor GE Linnert - Año 1995 - Cuarta Edición
Editores Woodhead Publishing
- 5. WELDING HANDBOOK VOL 1**
Autor American Welding Society - Año 1998 - Octava Edición
Editores Willian R. Oates- Alexander M. Saitta