

Universidad Nacional
"José Faustino Sánchez Carrión"



“Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica”

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO POST SOLDADURA
(PWHT) PARA MEJORAR LA DUREZA DE PREFABRICADO DE TUBERÍAS PARA EL
PROYECTO DE LA MODERNIZACIÓN DE LA REFINERÍA DE TALARA

“TESIS”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALURGICO

Autor:

LAGUA PEREZ, Freddy Rolly.

Asesor:

Mo. IPANAQUE ROÑA, Juan Manuel.

C.I.P. N° 66303

Huacho - Perú

2018

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación de tesis está dedicado a mi esposa e hijos, padres por su apoyo incondicional en todo momento para el desarrollo profesional de mi persona.

AGRADECIMIENTO

Ante todo, agradezco a dios y a mi familia, por confiar en mí y sobre todo por el apoyo moral que día a día me brindan.

Agradezco a la empresa TERMOSOLDEX por brindaros su apoyo y confianza al realizar la tesis.

PENSAMIENTO

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad, la energía atómica: la voluntad”

Albert Einstein

ÍNDICE

Portada.....	I
Dedicatoria	II
Agradecimiento	III
Pensamiento	IV
Índice.....	V
Índice de figura.....	VIII
Índice de tabla	IX
Índice de anexo.....	X
Glosario de abreviatura	XI
Resumen	XII
Introducción	XIII
CAPÍTULO I	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Descripción de la realidad problemática.	14
1.2. Formulación del problema.....	15
1.2.1. Problema general.....	15
1.2.2. Problemas específicos.	15
1.3. Objetivos de la investigación.....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos.....	16
1.4. Justificación de la investigación.....	16
1.5. Delimitación del estudio.....	17
1.5.1. Delimitación territorial.....	17
1.5.2. Delimitación tiempo y espacio.....	17
1.5.3. Delimitación de recursos.....	17
1.6. Viabilidad del estudio.....	18
CAPÍTULO II	19
MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes de la investigación.	19
2.1.1 investigación relacionada con el estudio.....	19
2.1.2 otras publicaciones.	24
2.2. Bases teóricas.....	29

2.2.1. Tratamiento térmico de metales.	29
2.2.1.1. La soldadura, un tratamiento térmico.	31
2.2.1.2. Efectos indeseables del ciclo térmico de soldadura.	32
2.2.1.3. Tratamiento térmico de post-soldadura (p.w.h.t.)	38
2.2.1.4. Ciclo térmico y ancho de banda de calentamiento.	40
2.2.2. Controles destructivos.	42
2.2.2.1. Pruebas de tracción.	43
2.2.2.2. Pruebas de flexión	43
2.2.2.3. Pruebas de resistencia al impacto (viscosidad de impacto).	43
2.2.2.4. Pruebas de resistencia a la fatiga.	43
2.2.2.5. Pruebas metalográficas.	44
2.2.2.6. Pruebas de dureza.	44
2.2.3. Calificación del procedimiento de soldadura	45
2.2.4. Normas, estándares y códigos de soldadura.	46
2.3. Definiciones conceptuales.	47
2.4. Formulación de la hipótesis.	49
2.4.1. Hipótesis general.	49
2.4.2. Hipótesis específicas.	49
CAPITULO III.	50
METODOLOGÍA.	50
3.1. Diseño metodológico.	50
3.1.1. Tipo de investigación.	50
3.1.2. Enfoque de investigación.	50
3.2. Población y muestra.	51
3.3.1. Población.	51
3.3.2. Muestra.	51
3.3.3. Tamaño de muestra.	51
3.3. Operacionalización de variables e indicadores.	52
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	52
3.4.1. Fuentes.	52
3.4.2. Técnicas.	53
3.4.3. Instrumentos.	53
3.5. Técnicas para el procesamiento de la información.	54

CAPITULO IV	55
RESULTADOS	55
4.1. Condiciones de trabajo	55
4.2. Resultados obtenidos.....	56
4.2.1. Tratamiento térmico.....	56
4.2.2. Ensayo de dureza.....	63
CAPITULO V	67
DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN	67
5.1. Discusión.....	67
5.2. Conclusión.....	69
5.3. Recomendaciones.....	70
CAPITULO VI.....	71
FUENTES DE INFORMACIÓN	71
6.1. Fuente bibliografía	71
6.2. Fuentes electrónicas	71
Anexos.....	74

ÍNDICE DE FIGURA

Figura N° 1: variables de un Ciclo Térmico.....	58
Figura N° 2: función del diseño de las juntas.....	59
Figura N° 3: Instalación de Resistencias Eléctrica y Aislante Térmico para Pre calentamiento, según el cálculo del Ancho de Banda	60
Figura N° 4: Instalación de Resistencias Eléctrica y Aislante Térmico para Post calentamiento, según el cálculo del Ancho de Banda	61

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1: Temperaturas Críticas de los Aceros al Cr-Mo ASTM utilizados en la Industria Petroquímica.....	31
Tabla 2: Operacionalización de Variables en estudio.	52
Tabla 3.Los límites de carbono según ASME II	55
Tabla 4. Dureza requerida - ASME B31.3; Ed. 2012 tubería de proceso	55
Tabla 5. Condiciones de tratamiento térmico	56
Tabla 6: Diámetro exterior del equipo o cañería.	59
Tabla 7: Ancho de Banda para TTPS Localizado	59
Tabla 8: Parámetro de mantenimiento temperatura/tiempo.	61
Tabla 9: Métodos de calentamiento.....	63
Tabla 10: Temperatura de calentamiento según aleación de acero.	63
Tabla 11: Resultados del primer ensayo – caso 1.....	65
Tabla 12: Resultados del primer ensayo – caso 2.....	66

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 1: Matriz Consistencia General.....	75
Anexo 2: Matriz Consistencia Específico	76
Anexo 3: Jr. Victor Andres Belaunde 852 - Callao - TERMOSOLDEX.....	77
Anexo 4: El Callao	77

GLOSARIO DE ABREVIATURA

%	:	Porcentaje
&	:	y
AISI	:	American Iron and Steel Institute ((Instituto americano del hierro y el acero)
ASME	:	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
°C	:	Grados centígrados
HB	:	Dureza Brinell
MPa	:	Mega pascales
MB	:	Metal Base
MS	:	Metal de Soldadura
N	:	Newton
um	:	Micras
kg/mm ²	:	Kilogramos por milímetros cuadrados
PWHT – TTPS	:	Tratamiento Térmico Post Soldadura.
PC	:	Pre calentamiento.
POST-C:	:	Post Calentamiento.
RE	:	Calentamiento con Resistencias Eléctricas.
SAE	:	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores)
TH:	:	Espesor de la Junta Soldada
ZAC	:	Zona Afectada por el Calor.

RESUMEN

Al realizar este trabajo de investigación tenemos como objetivo mejorar la dureza del prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la Refinería de Talara mediante un tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT). En razón de cumplir el objetivo antes planteado consideramos como variable independiente la dureza, mientras que la variable dependiente el tratamiento térmico post soldadura: Fue un estudio de carácter documentada y de campo, con enfoque análisis de causa – efecto.

El resultado que se obtuvo en base a dos casos, uno con unión soldada Olet y otro de tubería Ø2", Alloy Cr-Mo P5, en la cual se evaluó la velocidad de calentamiento, temperatura y tiempo de tratamiento térmico post soldadura:

La dureza Bajo considerablemente en la soldadura 168 HB en el 1° CASO y 120 HB en el 2° CASO, cabe indicar que el diámetro de ambos casos es de 2". En cada caso de tener medidas > 300 HB en diámetros mayores sería recomendable hacer una prueba antes de considerar que con el PWHT bajara la dureza; 2° CASO Se tomaron antes de PWHT solo a la SOLDADURA, y DESPUES DE PWHT a Las 5 áreas correspondientes dando resultados Favorables. Ambos casos específicos mencionados obtuvieron durezas aceptadas después de PWHT; la reducción de dureza en estos dos casos específicos de Uniones Soldadas Olets vs. Tubería Ø2" está en un rango de 120 HB a 160 HB. Esta reducción es mucho mayor que la reducción de dureza conocida en casos de probetas tubo vs. tubo que fue aprox. 80 HB.

Para las Uniones Soldadas Olets vs. Tubería Ø2" se autoriza obtener como máximo 350 HB antes de PWHT, con proceso GTAW o proceso FCAW. Para el resto de casos, mantener por el momento como máximo 310 HB antes de PWHT, de manera preventiva.

Palabras claves: tratamiento térmico post soldadura, dureza, refinería de talara, velocidad de calentamiento y temperatura.

INTRODUCCIÓN

El Proyecto Modernización de Refinería Talara consiste en la instalación de nuevas unidades, ampliando la capacidad de las actuales, y de nuevos procesos más complejos y tecnología más avanzada, para una Refinería más competitiva. Este proceso se está realizando para: Desulfurizar los combustibles, Mejorar el octanaje de naftas, Procesar crudos más pesados, Disminuir la producción de residuales, Implementar nuevas facilidades que requerirá la Refinería Modernizada.

Esto implica que empresas como Fima Industrial sean contratadas para la fabricación de estructuras de tubos aleados ASTM A355-P5, que formaran parte de la infraestructura de este proyecto y que por ninguna razón deben evidenciar fallas o daños en plena operación de montaje en campo; es así como se realizó esta investigación para poder encontrar los parámetros adecuados de tratamiento térmico pos soldadura de las tuberías utilizadas para mejorar su dureza, se utilizaron probetas de 2'' de diámetro de Alloy Cr-Mo, P5, una de W.O. 134015-013 y otro de 134015-008.

En el tratamiento térmico se tiene los siguientes pasos velocidad de calentamiento es un gradiente térmico radial produce tensiones de compresión y tracción. A medida que la velocidad de calentamiento aumenta también lo hace el gradiente térmico y con ello las tensiones internas. Sin embargo, mientras no se produzcan fisuras no se produce daño, para mantener el gradiente térmico radial no será excesivo mantenga el ancho de banda indicado por los códigos. La temperatura y tiempo de mantenimiento para tratamiento térmico post soldadura, en los aceros al carbono, tiene como objetivo disminuir las tensiones residuales. Este proceso es dependiente del tiempo y de la temperatura.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.Descripción de la realidad problemática.

La edificación de la nueva Refinería de Talara, el proyecto energético más grande que se viene ejecutando en el país, dentro de las principales actividades que aportan a este progreso se encuentran la instalación de 13,200 pilotes, el vaciado 60,000 m³ de concreto, 22,000 toneladas de estructuras metálicas en obra y la instalación de 26 equipos de proceso. Se prevé un incremento en la participación del personal del rubro metal mecánico a medida que se desarrollen los trabajos de montaje de estructuras, equipos y tubería.

Esto implica que empresas como Fima Industrial sean contratadas para la fabricación de estructuras de tubos aleados ASTM A355-P5, que formaran parte de la infraestructura de este proyecto de modernización de la Refinería de Talara, y que por ninguna razón deben evidenciar fallas o daños en plena operación de montaje en campo, ya que las consecuencias de esto serian pérdidas económicas debido a penalidades impuestas por la empresa contratante, en este caso Técnicas Reunidas, por incumpliendo de protocolos o ensayos que garanticen la calidad funcional de la infraestructura metálica por consiguiente las tuberías prefabricados deben de cumplir con estándares de calidad evidencia con ensayos durante el proceso de fabricación.

En virtud a ello todas las tuberías fabricadas deben de ser tratadas para reestructurar la microestructura del material y las composiciones de las aleaciones dentro del parámetro de control por ello se plantea el siguiente problema que se describe en la formulación del

problema de estudio a realizar sobre como un adecuado tratamiento térmico permite garantizar la dureza optimo del material.

1.2. Formulación del problema.

1.2.1. Problema General.

¿En medida el proceso de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá mejorar la dureza de prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara?

1.2.2. Problemas Específicos.

- ✓ ¿En qué medida la velocidad de calentamiento de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influirá en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara?
- ✓ ¿En qué medida la temperatura de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara?
- ✓ ¿En qué medida el tiempo de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara?

1.3. Objetivos de la investigación.

1.3.1. Objetivo General.

Evaluar el proceso de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), para garantizar la dureza del prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- ✓ Evaluar en qué medida la velocidad de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.
- ✓ Evaluar en qué medida la temperatura de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.
- ✓ Evaluar en qué medida el tiempo de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.

1.4. Justificación de la investigación.

Al llevar a cabo esta investigación sobre el tratamiento térmico localizado post soldadura, para la caracterización de las juntas soldadas en las tuberías de procesos bajo el código ASME B31.3 en la ampliación de la Refinería de Talara, nos permitirá

encontrar los rangos de los parámetros de acuerdo la norma de los aceros aleados, que garantice el trabajo industrial y sea rentable económicamente.

Los Métodos, procedimientos y técnicas e instrumentos que se aplican en la presente demostrarán que se pueden desarrollar futuros trabajos de investigación.

1.5.Delimitación del estudio.

1.5.1. Delimitación territorial.

Departamento : Lima
Provincia : EL Callao
Distrito : El Callao

1.5.2. Delimitación tiempo y espacio.

La investigación se realizará en la empresa TERMOSOLDEX en el año 2017.

1.5.3. Delimitación de recursos.

Falta de disponibilidad de recursos económicos para llevar a cabo el trabajo de investigación.

1.6. Viabilidad del estudio.

La realización de la presente investigación es viable, por cuanto se tiene los conocimientos teóricos, los medios técnicos y los recursos económicos necesarios. Así mismo, está asegurado el acceso a lugares de las fuentes de la información requeridas; también se cuenta con la autorización correspondiente del jefe de la Empresa TERMOSOLDEX, a efectos de llevar a cabo el correspondiente trabajo de campo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

2.1.1 Investigación relacionada con el estudio.

Según la autora (Mauricio A., 2015) en su investigación de tesis “estudio del tratamiento térmico post soldadura GTAW en tuberías de proceso de acero al carbono ASTM A106 GR B y su incidencia en la resistencia a la tracción y dureza”, llego a la siguiente conclusión:

- Que los resultados de los ensayos a tracción a una temperatura de 625°C, la resistencia a tracción es de 520.80 MPa con esto se consiguió mejorar el límite de rotura que es lo que se quería lograr con el alivio de esfuerzos.
- Se pudo verificar las propiedades mecánicas del acero ASTM A-106 GR-B con los ensayos realizados, con esto podemos comparar con los datos obtenidos del tratamiento térmico.
- Se determinó que la temperatura adecuada para realizar el tratamiento térmico es 625°C, partiendo de una temperatura de inicio como final de 425°C, al terminar se le deberá dejar con las resistencias para que pueda terminar con el enfriamiento moderadamente y poder llegar a temperatura ambiente.
- El tiempo adecuado para realizar el relevado de esfuerzos y el ablandamiento es de 54 minutos para el tiempo de calentamiento, 60 minutos para permanencia, 43 minutos para enfriamiento, tal como se puede observar en registro UTA-MEC-

005, una vez terminado se podrá seguir realizando los ensayos.

Según la autora (García C., 2016) de la tesis “Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado”, para la Universidad de Cantabria, Santander, concluye:

- Se puede observar con los resultados obtenidos que aplicar un tratamiento térmico, como es el revenido puede mejorar algunas de las propiedades de este material, y que según los valores que se busquen, será necesario utilizar temperaturas de revenido concretas, más altas o más bajas. Pero estos resultados están vinculados también a las temperaturas que ha sufrido primero el acero y el tipo de enfriamiento, o mejor dicho si sufre un enfriamiento más lento o rápido.
- En general, aplicando el revenido, se demuestra que los valores del límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza son valores que disminuyen. Lo que implica que se modifica a un material algo más blando, es más fácil la penetración en la superficie de éste, se producen ralladuras, abrasiones con mayor facilidad. Además, al ser el límite elástico menor, se producirán antes deformaciones permanentes ante una fuerza externa, y también se romperá o sufrirá una fractura con cargas o fuerzas menores que antes de aplicar el revenido. La razón por la que hay una disminución de la dureza después del revenido, es porque se eliminan las tensiones internas producidas por el temple.
- Se puede observar en las dos líneas de tendencia que reflejan los resultados obtenidos de la dureza para los materiales que han sido tratados previamente a temperaturas de 920°C, que su respuesta a 575°C de revenido es un aumento de la dureza, esto se debe a una precipitación de carburos secundarios a alta temperatura (precursor de fragilidad KRUPP).

- Se aprecia más marcado en muestras templadas a mayor temperatura dada la mayor solubilidad de carburos. Los elementos aleantes que contiene este acero refuerza la ferrita a esta temperatura causando un endurecimiento, a esto se le llama dureza secundaria. También se debe prestar especial atención a las curvas de las muestras que han sido sometidas a 920-940°C y se han enfriado con aire forzado (es decir, un enfriamiento algo más lento). Estas estructuras pueden presentar perlita gruesa, que es menos dura y más dúctil.
- Otras propiedades mecánicas aumentan, como son la estricción y la elongación, por lo que este acero se deforma más cuando está sometida a fuerzas externas. La estricción aumenta de forma más constante con un temple realizado a 880°C y un enfriado lento, pero el mayor porcentaje de reducción de área se consigue con un temple a 880°C, enfriado rápido (al agua) y luego aplicarle un revenido a 525°C. Y los valores más pequeños se consiguen con temperaturas muy bajas de revenido.
- La tenacidad, que nos mide la resistencia del material ante un impacto, aumenta su valor. Por lo tanto, este acero después de ser sometido a revenido, se obtiene un material que absorbe más energía, se vuelve más dúctil, puede sufrir más deformaciones antes de romperse. Al aumentar su ductilidad, estos materiales sufren primero una acusada deformación, conservando aún una cierta reserva de resistencia, será necesario que la fuerza aplicada siga aumentando para que se provoque la rotura. Al disminuir su fragilidad, es más difícil que las piezas fabricadas con este material se rompan de forma imprevista o repentina, ya que primero presentarán una deformación plástica visible.
- La variación de las propiedades mecánicas que sufre el acero, está relacionado con los cambios estructurales que sufre al efectuarle los tratamientos térmicos.

Según los autores (Barrera G & Rojano G., 2015) de la tesis “Elaboración de un procedimiento específico de soldadura (Wps) para la construcción de polidúctos en tuberías de acero al carbono instalado bajo la técnica de perforación horizontal dirigida para la empresa Montecz S.A.”, para la Universidad de Libre, Bogotá, concluyen:

- Los ensayos de rotura Nick, evidencian claramente que el procedimiento no cumple con el estándar API 1104. El análisis exhaustivo del resultado del ensayo Nick, muestra una tendencia clara de la falta de habilidad del soldador, debido a la presencia de escoria entre pases y lo más evidente, la falta de fusión registrada.
- A pesar de que los ensayos de doblamiento cumplieron con el estándar API 1104, un análisis del resultado evidencia de las ocho probetas ensayadas, tres presentaron discontinuidades menores, lo que aumenta la tendencia a que la habilidad del soldador compromete de manera negativa el resultado de los ensayos.
- Igual que los ensayos de doblez, las tracciones que se obtuvieron estuvieron por encima del valor mínimo exigido por el estándar API 1104, lo cual respalda el diseño del procedimiento en cuanto a resistencia a la tracción. Además se vuelve a evidenciar inclusiones de escoria y porosidad, que a pesar de cumplir con las condiciones mínimas del estándar, sigue demostrando que la habilidad del soldador y la sanidad entre pases no fue la ideal en la calificación del procedimiento.
- Debido al resultado obtenido, no es posible comparar los resultados del WPS que implementa la Empresa Montecz S.A. para la unión soldada de la línea regular, frente a la línea que debe ser instalada bajo la técnica PHD.

- Finalmente, luego de analizar la tendencia de los resultados, es importante resaltar que en cuanto a las propiedades mecánicas que respalda el informe emitido por West Arco, el procedimiento propuesto cumple con las expectativas para el cual fue diseñado, evidentemente el resultado final aplicando API 1104, rechaza dicho procedimiento debido a los defectos representados en el mismo informe, pero gracias a la experticia adquirida en la materia, dichos defectos nos llevan a concluir que la falta de habilidad y sanidad del soldador, los resultados no fueron eficaces.

Según los autores (Luna T., 2015) de la tesis “Evaluación del procedimiento de soldadura de la unión disímil entre Aceros API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5 F65.”, para la Pontificia Universidad Católica del Perú, concluyen:

- La especificación de procedimiento de soldadura para tubería de acero API 5L X70 PSL1 y brida ASTM A707 L5 F65 quedó calificada, aplicando el Código ASME, Sección IX.
- La desviación en la composición química del material ASTM A707 L5 F65 con respecto a la especificación técnica ASTM A707, particularmente en los porcentajes en peso de manganeso y molibdeno, no genera un cambio significativo en el valor del carbono equivalente ($CE=0.218$) de manera que no excede el límite superior ($CE=0.4$) a partir del cual existe riesgo de fisuración en frío. Además, gracias al bajo contenido de carbono presente en ambos metales base se favorece la correcta ejecución del cordón de soldadura.
- Las dos probetas soldadas que fueron sometidas a ensayos de tracción rompieron en el metal base API 5L X70 y alcanzaron un esfuerzo de tracción de 587 MPa en ambos

casos, el cual, es mayor al esfuerzo de tracción mínimo entre los dos metales base (570 MPa correspondiente al API 5L X70). Dada esta ruptura en el metal base, se comprueba que el cordón presentó buen comportamiento y que las propiedades mecánicas del cordón de soldadura son mayores.

- No se evidenciaron discontinuidades relevantes en los cuatro ensayos de doblado lateral; por consiguiente, la ductilidad en la zona de la soldadura se mantiene.
- Los valores de energía absorbida en los nueve ensayos de impacto llevados a cabo a -30°C tanto en los metales base como en el metal de soldadura resultaron ser mayores al mínimo estipulado por la especificación API 5L X70; en consecuencia, se garantiza la buena tenacidad de la unión soldada a la temperatura de servicio (Aprox. 10°C).
- La utilización conjunta de los procesos de soldadura GTAW para los pases de raíz y SMAW para los de relleno proporciona una opción para realizar soldaduras de muy buena calidad en un tiempo relativamente corto. Asimismo, aunque las resistencias mecánicas de los consumibles empleados difieren en 10 ksi (70 ksi para GTAW y 80 ksi para SMAW), la resistencia mecánica del cordón es homogénea debido a la dilución que se da entre los materiales de aporte.
- No se requiere modificación de variables esenciales en esta especificación de procedimiento de soldadura ya que se encuentra debidamente calificada; por consiguiente, el soldador, ejecutor del procedimiento queda también automáticamente calificado para realizar uniones soldadas según este WPS.

2.1.2 Otras publicaciones.

En las investigaciones referentes a otras publicaciones respecto a los tratamientos de

post soldadura se tiene las siguientes publicaciones.

En la investigación de (Hazarabediana, Bilmesh, Llorenteb, & Ovejero, 2003), “Efecto de los tratamientos térmicos de post soldadura sobre la resistencia al daño por hidrógeno”, se concluye:

- Que no hay manifestaciones de daño por hidrógeno en las probetas en estado como soldado ensayadas en H₂S. La fragilización por hidrogeno no depende fuertemente el tratamiento térmico post-soldadura en medio H₂S.
- La fractura germina sobre la superficie de las probetas con aspecto transgranular. Cuando el contenido de austenita es menor al 10% (probetas con revenido simple) la fractura avanza mayoritariamente por el borde de la austenita de alta temperatura. Por el contrario, si la austenita es mayor al 10%, (probetas con revenido doble) la fractura avanza preferentemente por el interior del grano de austenita primaria. Con carga catódica también se fragiliza el material como soldado y el material B. El estudio del resto de los TTPW está en curso. Falta determinar el alcance del fenómeno de corrosión bajo tensión en estos ensayos.

En la publicación de (Montero J., García A., Varela A., Zaragoza S., Artiaga R., Mier J., 2008), “Estudio del desgaste de uniones soldadas en tuberías”, en este trabajo se ha estudiado el desgaste que experimentan las uniones soldadas de tuberías, con el objetivo de minimizar los problemas derivados de las mismas. Se ha efectuado un análisis del comportamiento tribológico de las tres zonas fundamentales de la soldadura: metal base, zona afectada por el calor y cordón, evaluándose la diferencia en las propiedades mecánicas

entre ellas. Los investigadores concluyen:

- Se han realizado ensayos de desgaste, dureza y metalografía sobre el metal base, zona de afectación térmica y cordón de soldadura de tres muestras soldadas con diferentes procedimientos.
- La dureza, el desgaste y la estructura metalográfica en cada muestra varía, en función de la zona en la que se mida.
- La mayor dureza la presenta la muestra soldada sin someterse a tratamiento pre y post soldadura y, la menor, la muestra tratada en ambos casos.
- La zona que más se desgasta es la ZAT, siendo el desgaste entre zonas más uniforme para la muestra precalentada y no tratada después de la soldadura (muestra B).

En la publicación de (Osorio, Pacheco, & Toro, 2008), “Efecto del tratamiento térmico post soldadura sobre la microestructura del acero inoxidable grado CA6NM para la construcción de rodets hidráulicos”, los investigadores concluyen:

- Que el efecto de seis PWHT sobre el depósito de soldadura sobre el acero CA6NM ha sido estudiado donde se encontró mayor homogeneidad de las microdurezas tomadas de las probetas a 620 °C en relación a las tomadas a 600 °C. El efecto de la temperatura es más marcado que el de los tiempos de sostenimiento.
- El tratamiento de 1 hora y 620 °C permite que el material en la zona afectada térmicamente adquiriera una microestructura similar a la del material base y por tanto propiedades similares en su espesor.

- Un tratamiento térmico post soldadura a una temperatura de 600 °C con tiempo de sostenimiento de 20 minutos no es suficiente para promover en el material cambios microestructurales que permitan obtener propiedades (dureza) similares en todo el espesor de las probetas utilizadas.
- La cantidad de ferrita delta medida en el material no es suficiente para alterar sus propiedades mecánicas, sin embargo, existe una zona de aproximadamente 100 micras en los que la cantidad de esta fase sobrepasa el 10% en volumen y en la que se esperaría una menor resistencia al impacto del material. Esta zona permanece aún después de los tratamientos térmicos post-soldadura.

En la investigación de (Gualco, A.; Marini, C.; Svoboda, H., 2012), “Efecto del tratamiento térmico post-soldadura sobre la resistencia al desgaste abrasivo de depósitos de soldadura de acero martensítico”, expuesto para el tercer congreso de Argentina de Ingeniería Mecánica; se estudió el efecto del tratamiento térmico posterior a la soldadura, sobre la resistencia al desgaste y la microestructura del metal de soldadura de un acero martensítico (aleado al Cr, Mn, Mo, V y W), depositado con un alambre tubular con relleno metálico bajo protección gaseosa de Ar-2%CO₂, mediante el proceso de soldadura semi-automático. Se concluye:

- La muestra tratada a 550 °C mostró endurecimiento secundario y precipitación de carburos, mientras que la revenida a 650 presentó martensita revenida y carburos M₆C.
- Se observó que la pérdida de peso de todas la probetas ensayadas presentó una buena correlación lineal y además que las tasas de desgaste fueron muy similares.
- Sobre las superficies de desgaste se encontraron líneas de abrasión, confirmando

que el mecanismo de desgaste fue abrasión por corte. - Sobre los cortes longitudinales se observó que la deformación plástica fue baja.

- No se encontró una relación entre la dureza y la tasa de desgaste. Esto estaría asociado a la presencia de precipitados duros que mejoraron la resistencia al desgaste.
- La rugosidad fue menor en la probeta que menos se desgastó.

El artículo científico de (Martínez, A.; Miguel, V.; Escudero, L.; Coello, J.; Calatayud, A., 2012), sobre “Influencia de la temperatura de precalentamiento en las transformaciones metalúrgicas de fundiciones de hierro en soldaduras heterogéneas con electrodos de níquel”, se ha evaluado la influencia del precalentamiento en el comportamiento de uniones soldadas de fundición gris perlítica. Las temperaturas de tratamiento elegidas han sido de 150, 300 y 600°C; los autores concluyen para la revista Tratamientos Térmicos:

- Para las fundiciones grises ha quedado de manifiesto la no necesidad de precalentamientos en las uniones soldadas, ya que la unión es suficientemente eficiente. La rotura ocurre, en todos los casos, por el material base, frágil y de resistencia mecánica baja. Por tanto, el proceso de soldadura con electrodo de Ni recubierto es válido para la reparación de piezas fracturadas de fundición gris.
- Para las fundiciones dúctiles, como las maleables o las de grafito nodular, debemos evitar la aparición de constituyentes frágiles como la martensita y la fundición blanca, que mermarían considerablemente la tenacidad del material.
- Para este tipo de fundiciones parece ser necesario un precalentamiento a temperaturas superiores a los 300 °C, bien localmente mediante el uso de llamas o introduciendo toda la pieza en hornos. Esto último aporta muchas ventajas

respecto de la velocidad de disipación térmica, pero puede ser de muy difícil ejecución, sobre todo para piezas voluminosas.

- El postcalentamiento no queda justificado en ningún caso, ya que no elimina la fundición blanca, por lo que no aporta mejoras substanciales a la tenacidad de las uniones soldadas.

2.2.Bases Teóricas.

2.2.1. Tratamiento Térmico de Metales.

Se conoce como tratamiento térmico el proceso que comprende el calentamiento de los metales o las aleaciones en estado sólido a temperaturas definidas, manteniéndolas a esa temperatura por suficiente tiempo, seguido de un enfriamiento a las velocidades adecuadas con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono, y aleaciones no ferrosas. También se aplican tratamientos térmicos diversos a los sólidos cerámicos.

El Tratamiento Térmico de Soldadura (Laufgang S., 2006) se aplica generalmente a equipos de gran tamaño y difíciles de movilizar (Ej. Recipientes) En otros casos la parte a tratar esta fija y es imposible separarla físicamente del conjunto (Ej. Cañerías ya montadas).

Desde el punto de vista del material también hay algunas diferencias importantes:

- Los aceros soldables tienen un contenido de Carbono limitado a valores de

alrededor de 0,2 % con el objeto de limitar la Templabilidad (que implica dureza) de los mismos ya que esta última es inversamente proporcional a la Soldabilidad.

- Los Aceros Soldables se especifican generalmente con orientación hacia las propiedades mecánicas (Normas ASTM) con una considerable amplitud en la composición Química. Por ejemplo los casos de ASTM 514 y 517 son especificaciones para chapas de alta resistencia y para recipientes a presión respectivamente. Cada una contiene varias composiciones que pueden proveer las Propiedades Mecánicas requeridas.
- En cambio los Aceros de construcción de máquinas se especifican con límites estrictos de Composición Química (Especificaciones SAE) dejando las propiedades mecánicas libradas a los diferentes Tratamientos
- Térmicos que el fabricante de la pieza estipule durante el proceso de fabricación. La Composición Química es por lejos el criterio más utilizado para la designación de los Aceros seguido por las Especificaciones basadas en las Propiedades Mecánicas.
- La mayoría de los Tratamientos Térmicos de Soldadura son Subcríticos y no de ecrystalizacion Alotrópica (Austenización) como ocurre en los aceros de construcción de elementos de máquinas (ejes, engranajes, etc.)

Los metales y/o aleaciones poseen en ciertos casos (el acero es uno de ellos) una temperatura crítica por encima de la cual ocurre la recrystalizacion de la estructura Metalografía por medio del cambio alotrópico. En el acero la temperatura crítica varía con los elementos de aleación. En el caso de los aceros al Carbono o sin aleantes la temperatura crítica por encima de la que comienza la Recrystalizacion es en promedio 727°C.

Tabla 1: Temperaturas Críticas de los Aceros al Cr-Mo ASTM utilizados en la Industria Petroquímica.

Variedad	Composición Química					Temperatura Crítica	
	% Cr	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ac1 °C
0,50	0,10-0,20	0,30-0,60	0,10-0,30	0,5-0,7	0,45-0,65	760	880
1,25	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	1-1,5	0,45-0,65	775	890
2	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	1,75-2,25	0,45-0,65	780	880
2,25	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	2-2,5	0,90-1,1	780	880
5	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	4-6	0,45-0,65	818	882
5 Si	≤ 0,15	0,30-0,60	1-2	4-6	0,45-0,65	843	877
7	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50-1	6-8	0,45-0,65	827	882
9 M	≤ 0,15	0,30-0,60	1	8-10	0,90-1,1	824	885
	S y P ≤ 0,03%						

Fuente: (Seferian D., 1962)

2.2.1.1. La Soldadura, un Tratamiento Térmico.

- Soldar, es llevar los bordes de las partes a ser unidas hasta el punto de fusión adicionándole o no un metal de aporte y luego permitir al conjunto enfriarse hasta Temperatura ambiente.
- Lo más relevante de este proceso es sin duda el calentamiento localizado seguido de enfriamiento que produce en las piezas soldadas una serie de EFECTOS INDESEABLES.
- Las velocidades de calentamiento y enfriamiento son elevadas. La velocidad máxima alcanza los 300°C /seg. durante el calentamiento y/o enfriamiento a un nivel de temperatura de 1000°C, reduciéndose al disminuir la temperatura a valores de 6°C / seg. a 550°C.
- La Velocidad de enfriamiento en el centro del cordón de soldadura puede aproximarse con la siguiente fórmula:

$$V_e = 2 p K (T_c - T_o)^2 / H \text{ input.}$$

V_e : Velocidad de enfriamiento en el centro del cordón de soldadura

K : Conductividad térmica del metal (Joule/ m seg. °C)

K acero 0,2% C, 0,6% Mn: 0,028

K cobre : 0,20

K aluminio : 0,12

T_o : Temperatura inicial del metal base (T de precalentamiento)

T_c : Temperatura a la cual se calcula la velocidad de enfriamiento

H Input: Heat Input o Calor Aportado (J / mm)

2.2.1.2.Efectos Indeseables del Ciclo Térmico de Soldadura.

Son esencialmente tres (3). (Jenney, C.; O'Brien, A.)

- Generación de Tensiones Residuales y/o distorsión
- Modificación de la Estructura Metalografica
- Absorción de gases por el metal fundido.

a) Tensiones residuales y/o distorsión

Las construcciones soldadas contendrán usualmente tensiones residuales del orden de la resistencia a la fluencia paralelas al eje de la soldadura y una fracción de la misma (dependiendo del grado de enfriamiento, espesor, o restricción a la contracción) en las direcciones perpendiculares al cordón. Las tensiones residuales también pueden estar presentes en el material base producto del laminado, rolado u otros tratamientos térmicos anteriores. (Jenney, C.; O'Brien, A.)

La mayoría de los Metales al calentarse se dilatan. Si el calentamiento es localizado como ocurre durante la soldadura, la falta de uniformidad de la Temperatura produce

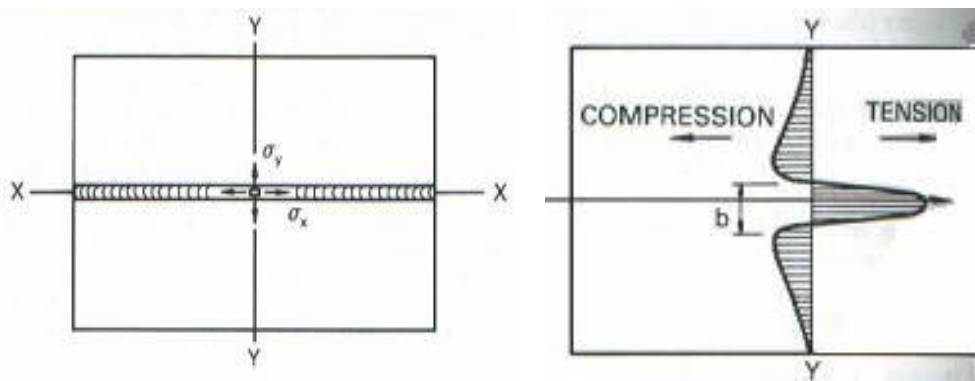
dilataciones diferentes en distintos puntos de la pieza en un mismo instante generándose por esa razón Tensiones Térmicas. Si estas tensiones alcanzan el límite de fluencia algo que ocurre normalmente en el cordón de soldadura, se produce deformación plástica localizada que luego en el enfriamiento genera Tensiones Residuales y / o distorsión.

Las tensiones residuales son un sistema de tensiones dentro de la parte soldada que se compensan ellas mismas y pueden existir en ausencia de una carga externa. Esto significa que si hay en una parte del material tensiones residuales de tracción seguramente en otra parte del mismo habrá tensiones residuales de compresión que mantienen en equilibrio el conjunto.

En una soldadura existen tensiones residuales tanto longitudinales como transversales al cordón, se puede ver en la soldadura de dos chapas planas que las tensiones longitudinales son de tracción en el cordón de soldadura siendo balanceadas por tensiones de compresión en el metal base adyacente. En el caso de tensiones transversales la parte media del cordón está sometida a tensiones de tracción mientras que los extremos están sometidos a compresión. También puede haber tensiones residuales en la dirección del espesor particularmente en el caso de secciones gruesas. Conviene notar que cuando se aplica una carga externa de tracción las tensiones residuales de tracción aumentan mientras que las de compresión disminuyen. Si continuamos aumentando la carga externa, las tensiones de tracción alcanzan el punto de fluencia, sin superarlo. Con cargas externas mayores lo único que ocurre es un aumento de la zona del material bajo fluencia y la disminución de las tensiones residuales de compresión. Si en este estado se disminuye la carga externa, el pico de tensiones residuales de tracción se hace menos agudo y las

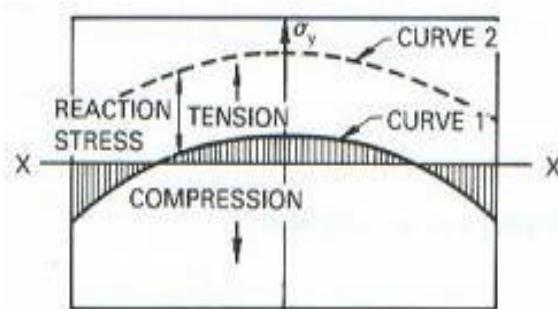
tensiones residuales disminuyen. Si el aumento de la carga externa hace desaparecer a las tensiones residuales de compresión por completo entonces durante la descarga se observará que las tensiones residuales de tracción también habrán desaparecido gracias a que el material alcanzó la fluencia. Este hecho ha sido reconocido en algunas especificaciones las que requieren que ciertas estructuras sean sobrecargadas hasta la fluencia para eliminar tensiones residuales. (Jenney, C.; O'Brien, A.)

Figura 1: Distribución Típica de Tensiones Residuales en una Junta a Tope.



A: Junta a Tope

B: Distribución de σ_y en el eje YY



B: Distribución de σ_y en el eje YY

Fuente: (Jenney, C.; O'Brien, A.)

Los efectos de las Tensiones Residuales en el modo de Falla se pueden resumir en lo siguiente:

- 1) **Fluencia y Colapso Plástico.** el efecto de las tensiones residuales es insignificante para estructuras soldadas bajo tensiones superiores a la fluencia.
- 2) **Fractura.** A medida que el nivel de las tensiones aplicadas aumenta, el efecto de las tensiones residuales disminuye. se suman a las tensiones aplicadas. cuando se combinan pueden causar fluencia localizada haciendo necesaria alguna corrección en el diseño. son perjudiciales en situaciones de baja tenacidad (ej. debajo de la temperatura de transición para aceros estructurales) pero no necesariamente en situaciones de alta tenacidad.
- 3) **Fatiga.** Las tensiones residuales de compresión pueden mejorar la resistencia a la fatiga de estructuras soldadas. las tensiones residuales de tracción en cambio disminuyen la resistencia a la fatiga ya que elevan la tensión media y la relación entre la tensión mínima y la máxima (f_{min}/f_{max}). su efecto es perjudicial al evitar el cierre de la fisura. aumentan la relación f_{min} / f_{max} . independientemente de la relación de las tensiones aplicadas. las tensiones residuales de compresión retardan o anulan el crecimiento de fisuras por fatiga al reducir f_{min} / f_{max} e inducir el cerramiento de la fisura. se pueden introducir tensiones de compresión localizadas por calentamiento local, compresión local, martillado, o sobrecargas. el efecto de las tensiones residuales tiende a disminuir luego de cargas repetidas. “Fatigue Strength of Welded Structures.K.G.Richards.The Welding Institute”
- 4) **Corrosión bajo Tensión.** En un ambiente apropiado, tensiones residuales de tracción pueden ser suficientes para causar corrosión bajo tensión en un material particular con o sin la presencia de tensiones adicionales.
- 5) **Pandeo.** Las tensiones residuales reducen significativamente la resistencia al pandeo de columnas fabricadas por soldadura.

- 6) **Creep.** Tiene poco o ningún efecto.
- 7) **Fisuración de Soldadura.** Las tensiones residuales pueden influir en distintos tipos de fisuración de soldadura. fisuración en caliente durante la solidificación. fisuración por hidrógeno en zonas duras de la ZAC, desgarre laminar, fisuración por recalentamiento.
- 8) **Distorsión.** En estructuras esbeltas, las tensiones residuales aunque pequeñas pueden producir distorsiones importantes durante el posterior mecanizado.

b) **Modificación de la Estructura Metalográfica.**

La mayoría de los aceros modernos obtienen sus propiedades mecánicas por intermedio de procesos termomecánicos como Forja, laminación, extrusión, fundición o Tratamiento Térmico los que realizados correctamente proporcionan una microestructura óptima para soportar las sollicitaciones mecánicas. (Seferian D., 1962). Cuando a esta estructura se le aplica el ciclo térmico de la Soldadura se forman dos zonas perfectamente diferenciadas:

- Metal fundido con o sin presencia de metal de aporte.
- Zona afectada por el calor (ZAC). Esta zona está afectada estructuralmente sin haber llegado a la fusión.

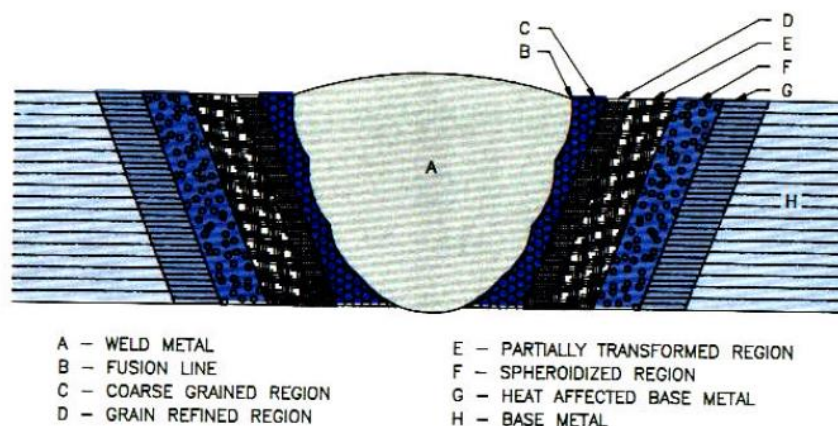
Estas dos zonas ya no tienen la Estructura óptima original del Material Base y por lo tanto puede considerarse a este cambio estructural un efecto Indeseable del ciclo térmico de Soldadura. Esto puede controlarse parcialmente por dos medios.

- **Modificando el Ciclo Térmico de la Soldadura.** Actuando sobre las variables

del proceso de Soldadura. El Calor Aportado (Heat Input). Su aplicación tiene limitaciones. Por medio del Pre calentamiento del Material Base.

- **Realizando un ciclo térmico luego de la Soldadura con Temperaturas y velocidades de calentamiento / enfriamiento controlado.** A este ciclo se le llama TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA. (TTPS) (PWHT) y conjuntamente con el Pre calentamiento es la forma idónea para evitar o corregir los Efectos Indeseables de la Soldadura.

Figura 2: Esquema de la Microestructura de una Soldadura de un acero micro aleado.



Fuente: (Jenney, C.; O'Brien, A.)

c) Absorción de gases por la soldadura.

Uno de los problemas más importantes a tener en cuenta cuando se estudian los efectos indeseables del proceso de soldadura es la absorción de gases por el metal fundido. Cualquiera que sea el procedimiento de fusión, en el acero líquido se fijan cantidades más o menos importantes de los gases del aire (oxígeno y nitrógeno) y de los productos de descomposición del revestimiento, principalmente hidrógeno procedente de la humedad o del agua de cristalización de ciertas sustancias

químicas. (Seferian D., 1962)

- El oxígeno puede presentarse disuelto o formando óxido de hierro o combinado con otros óxidos. En estado disuelto puede influir sobre las propiedades mecánicas de la solución sólida ferrita; en estado de óxido influye por la presencia de inclusiones en la tenacidad y estriación del metal de soldadura.
- El Nitrógeno origina al nitruro de hierro Fe_4N en forma de agujas que también influye en la tenacidad. Cuando el Nitrógeno se encuentra disuelto produce el envejecimiento del acero con la correspondiente falta de plasticidad.
- Pero el verdadero problema y mucho más grave es que durante la Soldadura el acero también absorbe Hidrógeno, lo mismo que absorbe oxígeno y nitrógeno. Las Soldaduras oxiacetilénicas contienen muy poco hidrógeno (2 a 3 cm^3 por 100g de metal); La concentración de hidrógeno en las soldaduras por arco es, por el contrario mucho más importante y puede llegar a alcanzar el límite de solubilidad de este gas en el metal líquido (28 cm^3 por 100g de metal) según sea la naturaleza del revestimiento. El hidrógeno es la causa de la formación de Microfisuras, sopladuras y es el formador de los Fish-eyes. (Seferian D., 1962)

2.2.1.3. Tratamiento Térmico de Post-Soldadura (P.W.H.T.)

La mayoría de los Tratamientos Térmicos de Soldadura son Subcriticos y no de Recristalización Alotrópica (Austenización) como ocurre en los aceros de construcción de elementos de máquinas (ejes, engranajes, etc.) (Laufgang S., 2006)

Existen 5 razones por la cual hacer un tratamiento térmico post-soldadura “Postweld Heat Treatment” (P.W.H.T.):

- 1) Disminuye la dureza de la ZAC, metal de soldadura y material base. El resultado es una microestructura más dúctil y resistente a la fisuración.
- 2) Aumenta la resistencia a la corrosión y a la fisuración por Corrosión bajo Tensión (SCC).
- 3) Al reducir las tensiones residuales aumenta la estabilidad dimensional de estructuras soldadas y mecanizadas.
- 4) Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Tenacidad del material., por disminución de la Triaxialidad.
- 5) Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Resistencia a la Fatiga

Si el TTPS tiene como función eliminar las Tensiones Residuales en este caso se lo llama:

- a) **Distensionado**: Se lo realiza en aceros Ferríticos de baja aleación entre los 595°C y los 675°C (1100°F a 1250°F), para aceros de alta aleación, puede llegar (sin generalizar, estudiando cada situación particular) a los 1000°C aunque la mayoría de las veces no supera los 760°C.

Si por el contrario el objetivo es disminuir la dureza producida esencialmente por estructuras Martensíticas en la ZAC el TTPS en este caso se llama:

- b) **Revenido**, un Tratamiento Térmico que siempre se realiza en aceros que se han templado (Total o parcialmente Martensíticos) con el objeto de disminuir la dureza debido a que esta influye en dos tipos corrientes de Fisuración:
 - Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC)

- Fisuración por Corrosión bajo Tensión.

Usualmente en obra, cuando se está haciendo este Tratamiento, muy común en aceros aleados al Cr Mo tipo P5, P9, P91 etc. se lo denomina erróneamente Distensionado, aunque disminuya las eventuales tensiones residuales que pudiera haber producido la Soldadura. En estos casos si la palabra revenido nos parece “demasiado” metalúrgica es preferible denominarlo Tratamiento Térmico post Soldadura y no Distensionado.

Estos dos Tratamientos Térmicos de Soldadura son Tratamientos Subcriticos y conviene recordarlo debido a que tienen un límite superior de temperatura a respetar, la Temperatura Critica. (Laufgang S., 2006)

2.2.1.4.Ciclo Térmico y Ancho de Banda de Calentamiento.

El tratamiento térmico post-soldadura es una secuencia de calentamientos y enfriamientos muy controlados y, como tal, cada uno de sus parámetros debe ser cuidadosamente establecido.

Las cuatro variables del ciclo térmico a controlar en el tratamiento térmico post-soldadura son:

1. La velocidad de Calentamiento a partir de cierta Temperatura Especifica
2. La Temperatura de TTPS o Temperatura de Mantenimiento
3. El Tiempo a la Temperatura de Mantenimiento
4. La Velocidad de Enfriamiento hasta cierta Temperatura Específica.

Estas variables pueden ser fijadas por los Códigos, Especificaciones o Procedimientos.

Algunos Códigos limitan las velocidades de calentamiento y enfriamiento con el objeto de prevenir las tensiones térmicas producidas por las contracciones y/o dilataciones no homogéneas. Los gradientes de Temperatura a través del espesor y en dirección longitudinal producen Tensiones Térmicas.

No hay manera de eliminar tales diferencias de Temperatura debidas al TTPS localizado, sin importar cuan lentas sean las velocidades de calentamiento o enfriamiento o cuan largo sea el tiempo de mantenimiento.

Siempre que el calor sea aplicado de un solo lado del espesor, siempre habrá un gradiente térmico a través del mismo, y cuando mayor sea el espesor mayor será este gradiente térmico para un dado aporte calórico.

La experiencia ha mostrado que el gradiente de Temperatura en el espesor es inversamente proporcional al ancho de banda de calentamiento en la superficie sin importar el diámetro, espesor o tipo de fuente calórica empleada.

En general, el ancho de la banda circunferencial a ser calentada a la Temperatura de Mantenimiento debe ser como mínimo cinco veces el espesor mayor ($5t$) de la junta soldada. Para soldadura de conexiones a envolvente el ancho de banda debe incrementarse en la mayor dimensión (diámetro en cañería, o la dimensión del alma en un perfil normalizado) de la conexión. En estos casos hay diferencias entre cada código, por lo tanto se debe consultar el documento específico. Por ejemplo, con un espesor de 3" (76mm) el ancho

cubierto por resistencias, espiras de inducción, calefactores radiantes o cualquier otro método de Calefaccionado debe ser como mínimo $5 \times 76 \text{ mm} = 380 \text{ mm}$ con el objeto de mantener el gradiente Térmico en el espesor a un nivel aceptable. Aun con un ancho de banda de 5t y una adecuada aislacion, el gradiente en el espesor puede ser significativo.

Algunas experiencias han mostrado que para espesores importantes, entre 3" (76mm) y 4,5" (114mm) la diferencia puede alcanzar los 30°C y 40°C respectivamente. En estos casos se permite cierta tolerancia y la temperatura en el exterior (lado más caliente) debe mantenerse cerca del valor máximo de temperatura permitido por el procedimiento. Esto previene que la superficie interior este demasiado fría. Durante todos los estadios del ciclo térmico debe mantenerse la temperatura uniforme en la circunferencia. Si hubiese zonas más calientes, las mismas podrían distorsionarse permanentemente, fisurarse o alterar sus propiedades. (Laufgang S., 2006)

2.2.2. Controles destructivos.

Este tipo de control se aplica a la fabricación en masa y en serie de piezas de construcción de gran importancia. Su aplicación es limitada y depende esencialmente del costo de fabricación. Consiste en seleccionar unidades o piezas separadas de distintos lotes y controlarlas mediante diferentes pruebas, de acuerdo con la forma de construcción de las mismas y las cargas que van soportar. Con este tipo de control se conocen las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. (Rodríguez P., O., 2013) Las diferentes pruebas que se pueden realizar con este tipo de control son las siguientes: pruebas de tracción, de flexión, de resistencia al impacto, de resistencia a la fatiga, metalográficas y de dureza, las que se estudian a continuación:

2.2.2.1.Pruebas de tracción

Este tipo de control permite determinar la resistencia de la unión soldada y también el alargamiento de la misma. La forma y dimensiones de la probeta se deben escoger según las normas correspondientes.

2.2.2.2.Pruebas de flexión

Con las pruebas de flexión se determina la capacidad de deformación de las uniones soldadas a tope. Generalmente se mide el ángulo de doblado hasta que se obtiene la primera rotura. La probeta se coloca entre rodillos y se dobla mediante un punzón. Las dimensiones de la probeta, los rodillos y el punzón, así como la forma de realizar la prueba, se deben seleccionar de acuerdo a las normas correspondientes.

2.2.2.3.Pruebas de resistencia al impacto (viscosidad de impacto)

Con esta prueba se determina la resistencia a cargas dinámicas de una pieza determinada o estructura y consisten en lo siguiente: se escoge una probeta con una muesca y se coloca en el péndulo de Charpy, el cual se deja caer hasta que se rompe la probeta. Entonces de acuerdo con la resistencia del material al impacto este se levantara a una altura determinada. La resistencia al impacto se registra en una escala adjunta al péndulo.

2.2.2.4.Pruebas de resistencia a la fatiga

Estas pruebas se realizan cuando se necesita conocer las resistencia a cargas variables con el tiempo, es decir la magnitud de la tensiones máximas y mínimas, el número de ciclos que resiste el

material o la pieza antes de romperse.

2.2.2.5.Pruebas metalográficas

Estas pruebas se emplean para el control de las probetas de los exámenes de soldadura, análisis de defectos y causas que los crean, determinación de causas de roturas en las construcciones soldadas,

etc. Las probetas se toman de manera que no varíen la estructura del material por influencia del calor.

Las pruebas metalográficas se dividen en dos grupos: macroscópicas y microscópicas.

En las pruebas macroscópicas se observan los siguientes aspectos: características de cristalización de la unión soldada, forma de preparación de los bordes, carácter de los posibles defectos y calidad de la fusión. Los ensayos microscópicos consisten en la observación con el microscopio metalográfico de las probetas de la unión soldada poniendo atención a los siguientes aspectos: estructura de la costura, estructura de la zona de influencia térmica, estructura del metal base, efectos del tratamiento térmico y características de algunos defectos, como por ejemplo, microgrietas, etc. (Rodríguez P., O., 2013)

2.2.2.6.Pruebas de dureza

Aunque en esencia este no es método destructivo en sí, se incluye dentro de los mismos porque su resultado tiene relación directa con dos de ellos como son: resistencia a la tracción y estructura. (Rodríguez P., O., 2013) En los aceros de bajo contenido de carbono se puede calcular por la siguiente formula:

$$\sigma = 0,34 \text{ HB}$$

σ = resistencia a la tracción (N/mm²).

HB - dureza (unidades Brinell).

En los aceros al cromo-níquel, la fórmula es la siguiente:

$$\sigma = 0,36 \text{ HB}$$

Mide la resistencia a la indentación. Está directamente relacionada con la resistencia.

(Barrera G & Rojano G., 2015) Los tres métodos más utilizados son:

- Brinell (ASTM E10)
- Rockwell (ASTM E18)
- Vickers (ASTM E92)
- Microdureza (ASTM E384)

2.2.3. Calificación del procedimiento de soldadura

Los reportes y certificaciones de calificación en uniones soldadas son declaraciones de las empresas de que los procedimientos de soldadura y el personal han sido probados de acuerdo con el código o especificación apropiada y que han sido encontrados aceptables. La calificación se debe de referenciar a un documento de soldadura según el servicio (por ejemplo: recipientes a presión, sistemas de transporte de hidrocarburos, etc.), puesto que estos documentos tienen secciones de guías del qué, cuándo, cómo y dónde aplicar, criterios de aceptación y como calificar el WPS y al personal. (Barrera G & Rojano G., 2015)

La calificación del Procedimiento de soldadura (WPS) tiene en cuenta el diseño de la junta, posición, material base, material de aporte, procesos de soldadura y sus parámetros como: precalentamiento, temperatura entre pases y tratamiento de postcalentamiento. La

calificación de los soldadores u operarios de soldadura dependen del WPS establecido. Los resultados de las pruebas de calificación del procedimiento de soldadura son registrados en un documento llamado PQR y es usado como base para respaldar el WPS.

2.2.4. Normas, Estándares y Códigos de Soldadura

En general los códigos, normas y especificaciones son documentos que rigen y regulan actividades industriales. Los documentos que establecen lineamientos para las actividades relacionadas con la industria de la soldadura tienen el propósito de asegurar que solo se producirán bienes soldados seguros y confiables, y que las personas relacionadas con las operaciones de soldadura están calificadas y no estarán expuestas a peligros indebidos ni a condiciones que pudieran resultar dañinas a su salud. (Barrera G & Rojano G., 2015)

Los códigos, las especificaciones y otros documentos de uso común en la industria tienen diferencias en cuanto a su extensión, alcance, aplicabilidad y propósito. A continuación se describen algunos documentos aplicables a este documento. (INDURA, 2008).

- **ASME Código para Tuberías de Presión B31.4-2009:** Sistema de Tuberías de Transporte de hidrocarburos líquidos y otros líquidos. Esta sección prescribe requisitos para el diseño, construcción y reparación de tubería que transporta líquidos tales como petróleo crudo, condensados, gasolina natural, líquidos gas natural, gas licuado de petróleo, alcohol líquido, amoníaco anhidro líquido y productos derivados del petróleo.
- **ASME Código de Calderas y Recipientes a Presión (BPVC), Section IX:**

Calificación estándar de procedimientos de soldadura, soldadura fuerte y de fusión; y Operadores de Soldadura, soldadura fuerte, y de fusión. Este estándar describen los requerimientos para la calificación de los procedimientos de soldadura y soldadores que se utilizarán en la construcción de tanque y recipientes de presión.

- **API 1104-2013:** Instituto Americano de Petróleo, Soldadura de Tuberías and facilidades relacionadas. Esta norma establece metodologías que permiten obtener soldaduras de alta calidad en tubería empleada en la compresión, bombeo y transmisión de petróleo crudo, productos derivados del petróleo y gases combustibles.
- **AWSD1.1/D1.1M:2010;** Este código cubre los requisitos de soldadura para cualquier tipo de estructura soldada a partir de los aceros de construcción de carbono y de baja aleación comúnmente utilizados. Cláusulas 1 a 8 constituyen un conjunto de normas para la regulación de la soldadura en la construcción de acero.
- **ASTM F1962-11;** Guía estándar para el uso de maxi-perforación horizontal dirigida para instalación de tubería de polietileno o conducto bajo obstáculos, incluyendo cruces de ríos. Esta guía describe el diseño, las consideraciones de selección, y los procedimientos de instalación para la colocación de tubería de polietileno o conducto bajo tierra utilizando equipos de perforación horizontal direccional. Las tuberías pueden utilizarse para gas natural, petróleo, líneas de agua, u otro transporte de fluidos.

2.3. Definiciones conceptuales.

- **Defecto:** Una imperfección de magnitud suficiente para justificar el rechazo del

producto en base a lo establecido en una norma, código y/o estándar.

- **Dureza:** es la capacidad de una sustancia sólida para resistir deformación o abrasión de su superficie. Está relacionada con la solidez, la durabilidad y la resistencia de sustancias sólidas, y, en sentido amplio, éste término suele extenderse para incluir todas estas propiedades
- **Ensayo de Brinell:** Medida de la resistencia de un material al corte o a la rotura, que se obtiene al utilizar una máquina que presiona una bola de acero ordinaria en un material, según las condiciones de carga normales, viene expresado por el coeficiente de dureza Brinell; cuanto más alto es el número, mayor es la resistencia del material.
- **Normalizado:** es uno de los tratamientos más conocidos, que se usa para afinar y homogeneizar la estructura.
- **PQR:** Procedure Qualification Record; Registro de Calificación de Procedimiento.
- **Recocido:** busca "ablandar" el acero para facilitar el mecanizado posterior de la pieza.
- **Revenido:** es un tratamiento complementario y similar al temple, del que se diferencia en la velocidad de enfriamiento. Mediante el revenido se consigue cierta tenacidad para evitar posteriores deformaciones.
- **Temple:** consiste en un calentamiento seguido de un enfriamiento. Con este tratamiento se consigue aumentar la dureza y la resistencia mecánica del acero.
- **Tratamiento térmico:** Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil.
- **WPS:** Requerimientos de la Especificación de un Procedimiento de Soldadura

- **ZAC:** Zona afectada por el calor

2.4. Formulación de la hipótesis.

2.4.1. Hipótesis General.

Realizando un control de proceso de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá mejorar la dureza de prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.

2.4.2. Hipótesis Específicas.

- ✓ Controlando la velocidad de calentamiento de acuerdo los parámetros establecidos de los estándares del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá obtener una dureza optimo dentro de los parámetros de control del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.
- ✓ Controlando la temperatura de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá obtendrá una dureza optima dentro de los estándares de calidad del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.
- ✓ Con un control del tiempo de calentamiento de acuerdo los parámetros establecidos de los estándares del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), se obtendrá una dureza optimo dentro de los parámetros de control del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

2.3. Diseño Metodológico

3.1.1. Tipo de investigación.

De acuerdo a su naturaleza: Documentada y de campo.

De acuerdo al propósito o utilización: Longitudinales o evolutivos - Tendencia.

Se realiza investigación documentada - Longitudinales o evolutivos - Tendencia, en este trabajo ya que se realiza búsqueda de información, aplicación de fórmulas con diferentes variables de acuerdo a los objetivos de la investigación, para posteriormente aplicar en el proceso de dimensionamiento (Naghi Namajforoosh M., 2005).

3.1.2. Enfoque de investigación.

Es una investigación cuantitativa por que se cuantificara las informaciones y como resultado resultan las dimensiones de los equipos que están involucrado en el proceso.

De acuerdo su característica: Análisis de causa – efecto.

De acuerdo su proceso: Probatorio.

De acuerdo a sus bondades: Generalización de resultados

2.4.Población y muestra.

3.3.1. Población.

La población estará constituida por las estructura de tubería que se fabrican para la ampliación de la refinería de Talara.

3.3.2. Muestra.

La muestra para el trabajo de investigación estará constituida por las estructura de tuberías que se fabrican por soldadura para la ampliación de la refinería Talara en un periodo de un mes.

3.3.3. Tamaño de muestra.

El tamaño de muestra es extraerá al azar cada 30 tuberías en los tratamientos térmicos de las tuberías de proceso como mínimo de 8 tuberías.

2.5. Operacionalización de variables e indicadores.

Tabla 2: Operacionalización de Variables en estudio.

Variable	Definición	Dimensión	Indicador
Independiente			
Tratamiento térmico	Es una operación de calentamiento y enfriamiento aplicadas a metales y aleaciones en estado sólido para obtener las condiciones o propiedades deseadas.	Magnitud	- Velocidad de calentamiento. - Temperatura calentamiento. - Tiempo de calentamiento.
Dependiente			
Dureza	Es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones físicas como la penetración, la abrasión y el rayado.	Rango	- Parámetro de control. - Estándares de calidad.
Intervinientes.			
			- Temperatura de pre calentamiento. - Temperatura controlada. - Velocidad de enfriamiento.

2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.4.1. Fuentes.

La información se recopilara de una fuente primaria respecto para el tratamiento térmico y los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. Respecto a la información para darle validez se obtendrá de las bibliografías que son fuentes secundarias.

3.4.2. Técnicas.

a. Observación sistemática Directa.

Se empleará esta técnica para observar el proceso de investigación en el momento que se está desarrollando (Cegarra Sánchez J., 2011).

b. Observación Sistemática Indirecta.

Mediante esta técnica se podrá analizar y estudiar los diversos documentos que contiene información sobre el tema de investigación.

c. Observación experimental.

Con esta técnica será posible conocer la forma como se desarrollan las actividades en el desarrollo para extraer datos con el fin de procesar posteriormente.

3.4.3. Instrumentos.

- a. Ficha de observación.
- b. Lista de cotejo.
- c. Escalas libreta de notas.
- d. Filmadora, cámara fotográfica y grabadora.

2.7. Técnicas para el procesamiento de la información.

Se usará el análisis estadístico y matemático, usando programas de cálculo como Excel, SPSS, XLSTAT, Minitab 16, Statgraphics, stata para luego mostrar la información, mediante tablas, registros, figuras, promedios, medianas, desviación estándar, ecuaciones por regresión y otros.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Condiciones de trabajo.

Los resultados de los tratamientos post soldadura debe tener en composición las siguientes limitaciones como mínimo y máximo como se aprecia en la tabla 2 sobre límite de carbono.

Tabla 3. Los límites de carbono según ASME II

		C	Mo	Ni	Cr
Límite de Aceptación	MAX	0.03	---	11	22
Límite de Aceptación	MIN	---	---	9	19.5

Nota: Requerimiento Según ASME II

Respecto a la dureza los márgenes que requiere la dureza superficial máxima en cómo se describe en la tabla 3.

Tabla 4. Dureza requerida - ASME B31.3; Ed. 2012 tubería de proceso

Zona de Evaluación	Max. Requerido dureza HB
0°	235
120°	235
240°	235

Las condiciones de tratamiento térmico localizado deben cumplir las condiciones que se describen en la tabla 4 como requisitos para cumplir con los protocolos establecidos.

Tabla 5. Condiciones de tratamiento térmico

Control de parámetros	Requerimiento
Temperatura mínima de Pre Calentamiento	<i>N/A</i>
Temperatura Controlada desde (°C)	<i>300</i>
Velocidad de Calentamiento (°C/hr)	<i>120</i>
Temperatura Calentamiento (°C)	<i>740</i>
Tiempo de mantenimiento (min)	<i>120</i>
Temperatura de enfriamiento (°C)	<i>100</i>
Temperatura controlada hasta (°C)	<i>250</i>

4.2. Resultados obtenidos.

Los resultados de las pruebas de ensayo de acuerdo los objetivos planteados se desarrollan a continuación. Tanto en el prefabricado en taller, en obra o en posición siempre y cuando el Código ASME B31.1 / ASME B 31.3 lo requiera y permita. Este PWHT será realizado de manera localizada, como método alternativo al tratamiento integral en horno. Todos los tratamientos térmicos realizados en forma localizada mediante calentamiento por resistencias eléctricas donde se requiera control y uniformidad de temperatura.

4.2.1. Tratamiento térmico.

El presente procedimiento describe la técnica para la correcta ejecución del Tratamiento Térmico Post Soldadura (PWHT) con el objeto con el objeto de evitar estructuras frágiles y/o disminuir tensiones residuales como parte del proceso de fabricación y / o reparación. El propósito de este procedimiento es describir en forma específica el método y técnica de ejecución del tratamiento térmico localizado post Soldadura, mediante

el uso de Resistencias Eléctricas flexibles, para los Material de Especificación ASTM A-106 Gr.B (PN°1), ASTM A-335 Gr.P5 (PN°5B), ASTM A-335 Gr.P9 (PN°5B), ASTM A-335 Gr.P11 (PN°4) y ASTM A-335 Gr.P22 (PN°5A) y todos los materiales empleados en el alcance del presente contrato. En caso de adicionarse materiales de fabricación, se anexarán los parámetros específicos correspondientes.

El presente procedimiento describe la correcta ejecución de las actividades de: tratamiento pre y post soldadura.

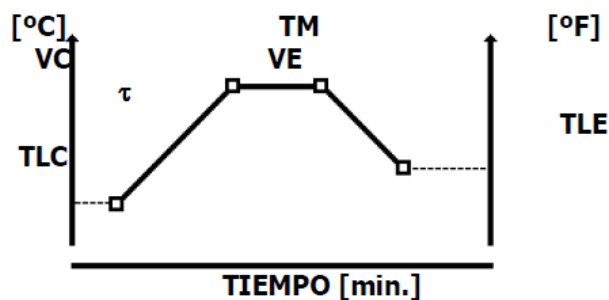
Realizar el Tratamiento Térmico Pre y Post Soldadura de Uniones Soldadas (Material de Aporte y Zona Afectada por el Calor), elaborados según el WPS y PQR pre establecido, bajo las Recomendaciones de la Especificación Estándar NACE 0403-2008.

Procedimiento constructivo.

Las seis variables de un Ciclo Térmico son:

1. Temperatura hasta la cual la velocidad de calentamiento es libre (TLC)
2. Velocidad de calentamiento (VC)
3. Temperatura de Mantenimiento (TM)
4. Tiempo de mantenimiento (τ).
5. Velocidad de enfriamiento (VE)
6. Temperatura por debajo de la cual la velocidad de enfriamiento es libre (TLE)

Figura N° 1: variables de un Ciclo Térmico



Fuente: TERMOSOLDEX – Procedimiento de trabajo - D-GC-06

Estas variables pueden estar fijadas por requerimientos de códigos, normas o especificaciones. En todos los casos, cuando se especifican velocidades de calentamiento y/o enfriamiento se entiende que son valores máximos.

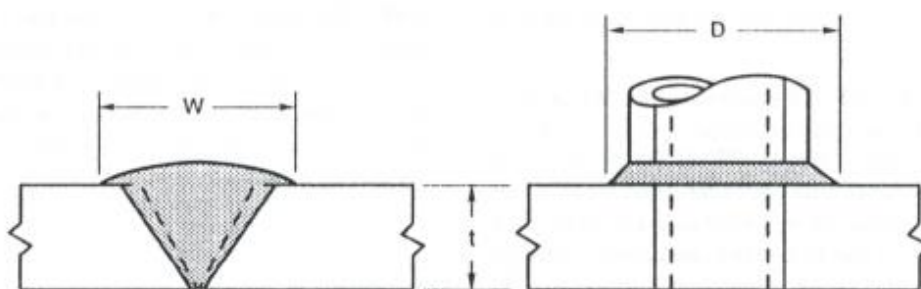
En general el ancho de la banda circunferencial a ser calentada a la temperatura especificada por el procedimiento debe ser como mínimo cinco veces el espesor mayor (5t). Para conexiones soldadas a una cañería dada, el tratamiento debe realizarse en una banda circunferencial que contenga a la conexión cuyo ancho debe ser incrementado en el diámetro de la conexión.

a) **Determinación del ancho de banda de resistencia eléctrica:**

- Para conexiones soldadas a una tubería dada, el tratamiento debe realizarse en una banda circunferencial que contenga a la conexión cuyo ancho debe ser incrementado en el diámetro de la conexión.
- El ancho de banda será determinado en concordancia con la especificación técnica PP- 02070-I-203-Att01, tomando en consideración la especificación NACE SP0403-2008.

- El tratamiento térmico se realizara sobre un ancho de al menos 6 veces el espesor del material a soldar, contando para cada lado de la costura. En todo caso este no será inferior a 25mm ni a los valores mostrados en la tabla (Ancho de banda mínimo a emplear según la especificación NACE SP0403-2008).

Figura N° 2: función del diseño de las juntas



Fuente: TERMOSOLDEX – Procedimiento de trabajo - D-GC-06

Tabla 6: Diámetro exterior del equipo o cañería.

Mínimo ancho de banda para TTPS Localizado			
Código	Parágrafo	Junta a tope	Conexión
ASME B 31.3	331	$W + 2''$	$D + 2''$
ASME B 31.1	132		

Fuente: TERMOSOLDEX – Procedimiento de trabajo - D-GC-06

Tabla 7: Ancho de Banda para TTPS Localizado

Mínimo Ancho de Banda para TTPS Localizado		
Especificación	Diámetro Nominal de la Tubería	Mínimo Ancho de Banda
NACE SP0403-2008	19 a 25 mm (0,75 a 1 pulg)	100 mm (4pulg)
	38 a 76mm (1,5 a 3 pulg)	150 mm (6 pulg)
	100 a 150 mm (4 a 6 pulg)	200 mm (8 pulg)
	≥ 200 mm	$BW=4.12 (R^*t)^{1/2} + 51$ mm
	(≥ 8 pulg)	$BW=4.12 (R^*t)^{1/2} + 2$ pulg

Fuente: TERMOSOLDEX – Procedimiento de trabajo - D-GC-06

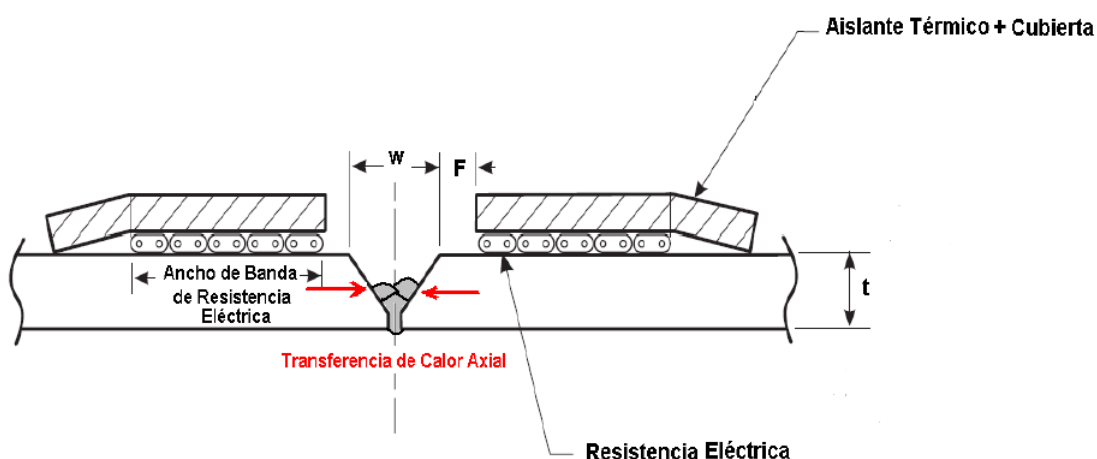
Donde:

BW = Ancho de Banda

R= Radio exterior de la tubería

T= Espesor de pared de la tubería

Figura N° 3: Instalación de Resistencias Eléctricas y Aislante Térmico para Pre calentamiento, según el cálculo del Ancho de Banda



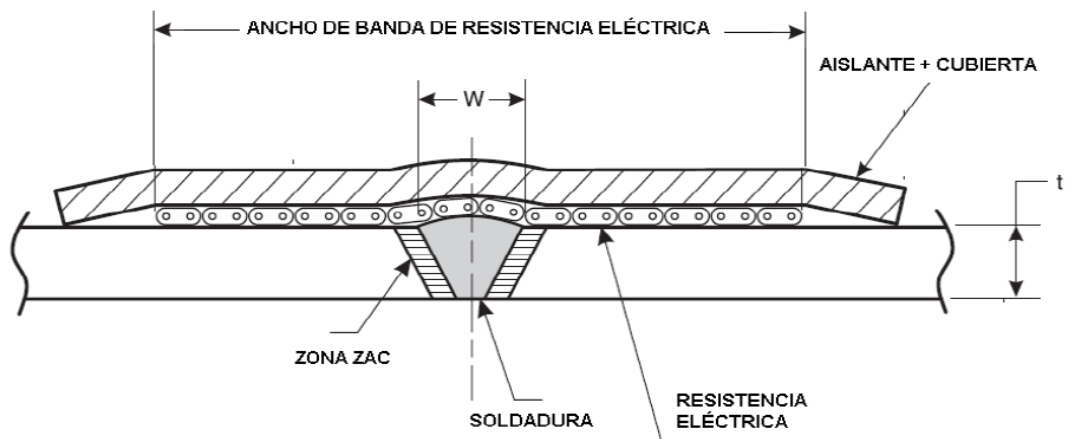
Fuente: *TERMOSOLDEX – Procedimiento de trabajo - D-GC-06*

b) Velocidad de Calentamiento.

La experiencia ha mostrado que el gradiente térmico radial no será excesivo siempre y cuando se mantenga el ancho de banda indicado por los códigos. De todos modos si la diferencia de temperatura a través del espesor no supera los 83 °C las tensiones tangenciales no superarán los 14 Kg/mm² ya sea en tracción o en compresión. Estas tensiones son aceptables de tal manera que cualquier velocidad de calentamiento que no produzca un gradiente térmico de más de 83°C es aceptable, a menos que algún código especifique lo contrario.

Las velocidades se suelen especificar en los procedimientos o son recomendadas por el fabricante. Para este procedimiento se trabajara con velocidades de 100°C / H, por encima de la temperatura libre de control 300°C.

Figura N° 4: Instalación de Resistencias Eléctricas y Aislante Térmico para Post calentamiento, según el cálculo del Ancho de Banda



Fuente: TERMOSOLDEX – Procedimiento de trabajo - D-GC-06

c) Tiempo de Mantenimiento.

El tiempo a la temperatura de mantenimiento y la temperatura misma, están relacionados con el material y los requerimientos de servicio. En aceros al Cr-Mo resistentes al creep y a la penetración de hidrógeno, el tiempo de mantenimiento a temperatura está relacionado con la dureza final requerida; ya que en estos casos el TTPS es un tratamiento de revenido.

Tabla 8: Parámetro de mantenimiento temperatura/tiempo.

Material	Parámetro mantenimiento	ASME B31.1	ASME B31.3
ASME A106 Gr. B (PNo. 1)	Temperatura	620 °C (1) – 650 °C	Aplicable para espesor > 20 mm: 620 °C (1) – 649 °C
	Tiempo	Hasta 50mm: 1hr/pulg. Mínimo 15 min Mayor a 50 mm: 2 hr más 15 min por cada 25 mm adicional sobre los 50 mm	1hr/pulg
ASME A-335	Temperatura	705°C [1] - 760°C	Aplicable para espesor > 13 mm:

Gr. P5 (PNo. 5B)		705°C [1] - 760°C	
	Tiempo	Hasta 50 mm: 1hr/pulg. Mínimo 15 min. Mayor a 50 mm: 2 hr más 15 min por cada 25 mm	2hr/pulg
ASME A-335 Gr. P9 (PNo. 5B)	Temperatura	705°C [1] - 760°C	Aplicable para espesor > 13 mm: 705°C [1] - 760°C
	Tiempo	Hasta 50 mm: 1hr/pulg. Mínimo 15 min. Mayor a 50 mm: 2 hr más 15 min por cada 25 mm	2hr/pulg
ASME A-335 Gr. P11 (PNo. 4)	Temperatura	705°C [1] - 760°C	Aplicable para espesor > 13 mm: 705°C [1] - 760°C
	Tiempo	Hasta 50 mm: 1hr/pulg. Mínimo 15 min. Mayor a 50 mm: 2 hr más 15 min por cada 25 mm	2hr/pulg
ASME A-335 Gr. P22 (PNo. 5A)	Temperatura	705°C [1] - 760°C	Aplicable para espesor > 13 mm: 705°C [1] - 760°C
	Tiempo	Hasta 50 mm: 1hr/pulg. Mínimo 15 min. Mayor a 50 mm: 2 hr más 15 min por cada 25 mm	2hr/pulg

d) Velocidad de Enfriamiento.

Para este procedimiento se trabajara con velocidades de enfriamiento de 100°C / H, después de tiempo de permanencia hasta la temperatura libre de control 300°C.

e) Métodos de Calentamiento.

PC y POST-C con resistencias eléctricas sólo aplicara para las aleaciones ASTM A-335 P5 y ASTM A-355 P9, para el resto de aleaciones el PC y POST-C se realizará mediante el uso de sopletes y deberá controlarse dichas temperaturas con tiza térmica o pirómetro de no contacto.

Tabla 9: Métodos de calentamiento.

<i>Método de calentamiento</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>
Resistencia Eléctrica (RE)	PC
Resistencia Eléctrica (RE)	POST-C
Resistencia Eléctrica (RE)	TTPS

Tabla 10: Temperatura de calentamiento según aleación de acero.

<i>Aleación de acero</i>	<i>Temperatura de precalentamiento</i>	
	<i>ASME B31.1</i>	<i>ASME B31.3</i>
ASTM A106 Gr B (P N°1)	T < 25 mm → 10°C T ≥ 25 mm → 80°C	T < 25 mm → 10°C T ≥ 25 mm → 79°C
ASTM A-335 Gr.P5 (PNo. 5B) 5 Cr – 0.5 Mo	150 °C	177°C - 225°C
ASTM A-335 Gr. P9 (PNo. 5B) 9 Cr - 1Mo	150 °C	177°C - 225°C
ASTM A-335 Gr. P11 (PNo. 4) 1.25Cr – 0.5Mo	200 °C	177°C - 225°C
ASTM A-335 Gr. P22 (PNo. 5A) 3Cr - 1Mo	200 °C	177°C - 225°C

Para un control de temperatura responsable en el tratamiento térmico localizado la diferencia entre una termocupla y otra que controlen una misma junta no podrá haber una diferencia de 30°C entre una y otra.

4.2.2. Ensayo de Dureza.

El presente procedimiento establece los pasos a seguir para la ejecución de medición de dureza usando equipos de indentación o rebote (LEEB).

a) Procedimiento constructivo.

Antes del uso del equipo

- Configuración del equipo (calibración).
- Método de verificación del equipo se realizará con bloques patrones de dureza

certificados. Uso de patrones certificados.

- La temperatura de ensayo debe ser de 10°C a 50°C.
- El personal técnico encargado de realizar el ensayo debe tener la formación adecuada, el conocimiento metalúrgico suficiente y la experiencia probada en el manejo del equipo.
- Los equipos deberán tener disponibles sus correspondientes certificados de calibración.

De la superficie a ensayar

- Las zonas a evaluar deberán ser acondicionadas para realizar el ensayo de dureza.
- Pre-limpieza: La superficie deberá estar exenta de grasa, polvo, aceite, pintura y corrosión.
- La rugosidad de la superficie deberá tener un equivalente al que se tendría con un disco abrasivo de tamaño de grano 180 como mínimo.

Ejecución del ensayo

- El método de prueba de dureza se debe realizar colocando la punta del equipo de manera perpendicular a la zona de medición, e impulsando la carga de 10 kgf o presionando el dispositivo Leeb.
- Las zonas de interés son: Metal de Aporte (depósito de soldadura), Zona ZAC (ambos lados) y Metal Base (ambos lados).
- Se efectuará el barrido correspondiente por zona, según esta especificado en el documento GP 18-10-01 (tabla 3 y tabla 4), se tomará 05 lecturas por cada zona, de lo cual deberá obtenerse como un promedio global final por zona.
- La dureza máxima admisible estará de acuerdo con el documento.

- Si cualquiera de las medidas iniciales es superior a los valores máximos, deberán realizarse medidas de dureza adicionales a lo largo de la soldadura.

b) Pruebas: Unión Soldada Olet vs. Tubería Ø2", Alloy Cr-Mo P5.

La dureza Bajo considerablemente en la soldadura **168 HB** en el **1° CASO** y **120 HB** en el **2° CASO**, cabe indicar que el diámetro de ambos spools es de 2". En cada caso de tener medidas > 300 HB en diámetros mayores sería recomendable hacer una prueba antes de considerar que con el PWHT Bajara la dureza

2° CASO Se tomaron antes de PWHT solo a la SOLDADURA, y DESPUES DE PWHT a Los 5 áreas correspondientes Dando resultados Favorables.

Durezas antes de PWHT:

Caso1: WO 134015-013.....Proceso GTAW.....340-350 HB

Caso2: WO 134015-008.....Proceso GTAW / FCAW.....315-320 HB

Durezas después de PWHT:

Caso1: WO 134015-013.....Proceso GTAW.....180-190 HB.....ACEPTADO (Máximo permitido es 235 HB después de PWHT)

Caso2: WO 134015-008.....Proceso GTAW / FCAW.....185-200 HB.....ACEPTADO (Máximo permitido es 235 HB después de PWHT)

Tabla 11: Resultados del primer ensayo – caso 1

ITEM	W.O.	MATERIAL	WPS	JUNTA 02 SOCKOLET	ANTES PWHT			DESPUES PWHT		
					0°	120°	240°	0°	120°	240°
1	134015-013	Alloy Cr-Mo, P5	376 TT/GTAW	Material base	171.4	158.66	178.00	113.48	114.46	124.56
				Zona ZAC	176.48	177.8	159.78	129.1	118.3	130.62
				Soldadura	359.64	345.6	302.00	190.94	181.54	188.78
				Zona ZAC	221.7	223.26	204.36	165.62	160.96	178.4
				Material base	196.8	185.82	208.72	132.84	153.74	165.94

Tabla 12: Resultados del primer ensayo – caso 2

ITEM	W.O.	MATERIAL	WPS	JUNTA 02 SOCKOLET	ANTES PWHT			DESPUES PWHT		
					0°	120°	240°	0°	120°	240°
1	134015-008	Alloy Cr-Mo, P5	376 TT/GTAW	Material base				120.7	117.9	115.82
				Zona ZAC				124.2	125.58	134.84
				Soldadura	278.2	315.6	313.74	183.56	186.56	200.48
				Zona ZAC				148.3	155.88	134.26
				Material base				136.92	158.48	139.3

- Ambos casos específicos mencionados obtuvieron durezas aceptadas después de PWHT.
- La reducción de dureza en estos dos casos específicos de Uniones Soldadas Olets vs. Tubería Ø2" está en un rango de 120 HB a 160 HB. Esta reducción es mucho mayor que la reducción de dureza conocida en casos de probetas tubo vs. tubo que fue aprox. 80 HB.
- Para los casos específicos de Uniones Soldadas Olets vs. Tubería Ø2" se autoriza obtener como máximo 350 HB antes de PWHT, con proceso GTAW o proceso FCAW.
- Para el resto de casos, mantener por el momento como máximo 310 HB antes de PWHT, de manera preventiva.

CAPITULO V

DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

5.1. Discusión.

Los resultados de las pruebas de ensayo de acuerdo los objetivos planteados se desarrollan a continuación. Tanto en el prefabricado en taller, en obra o en posición siempre y cuando el Código ASME B31.1 / ASME B 31.3 lo requiera y permita. Este PWHT será realizado de manera localizada, como método alternativo al tratamiento integral en horno. Todos los tratamientos térmicos realizados en forma localizada mediante calentamiento por resistencias eléctricas donde se requiera control y uniformidad de temperatura.

Según los autores (Barrera G & Rojano G., 2015) de la tesis “Elaboración de un procedimiento específico de soldadura (Wps) para la construcción de polidúctos en tuberías de acero al carbono instalado bajo la técnica de perforación horizontal dirigida para la empresa Montecz S.A.”, para la Universidad de Libre, Bogotá, concluyen: *Igual que los ensayos de dobléz, las tracciones que se obtuvieron estuvieron por encima del valor mínimo exigido por el estándar API 1104, lo cual respalda el diseño del procedimiento en cuanto a resistencia a la tracción. Además se vuelve a evidenciar inclusiones de escoria y porosidad, que a pesar de cumplir con las condiciones mínimas del estándar, sigue demostrando que la habilidad del soldador y la sanidad entre pases no fue la ideal en la calificación del procedimiento.*

Los resultados de las pruebas realizado respecto a la dureza en diferentes zonas de evaluación para ello realizaron tratamiento térmico con una velocidad de calentamiento 120

°C/hr, temperatura calentamiento de 740°C, tiempo de tratamiento de 120 minutos, y temperatura de enfriamiento 100°C, con ello se llegando a los siguientes resultados a 0° en promedio de 158.2 HD por debajo del parámetro máximo requerido que es de 235 HB, que está dentro de los parámetros establecidos, mientras que para 120° en promedio es de 173.2 HB que está debajo de los requerimientos cumpliendo los parámetros y para 240° en promedio de 167.4 HB que está dentro de los parámetros establecidos.

Según la autora (García C., 2016) de la tesis “Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado”, para la Universidad de Cantabria, Santander, concluye: *Se puede observar en las dos líneas de tendencia que reflejan los resultados obtenidos de la dureza para los materiales que han sido tratados previamente a temperaturas de 920°C, que su respuesta a 575°C de revenido es un aumento de la dureza, esto se debe a una precipitación de carburos secundarios a alta temperatura (precursor de fragilidad KRUPP).*

En la publicación de (Osorio, Pacheco, & Toro, 2008), “Efecto del tratamiento térmico post soldadura sobre la microestructura del acero inoxidable grado CA6NM para la construcción de rodets hidráulicos”, los investigadores concluyen: *Que el efecto de seis PWHT sobre el depósito de soldadura sobre el acero CA6NM ha sido estudiado donde se encontró mayor homogeneidad de las microdurezas tomadas de las probetas a 620 °C en relación a las tomadas a 600 °C. El efecto de la temperatura es más marcado que el de los tiempos de sostenimiento. El tratamiento de 1 hora y 620 °C permite que el material en la zona afectada térmicamente adquiera una microestructura similar a la del material base y por tanto propiedades similares en su espesor.*

5.2. Conclusión.

A continuación, se enuncian las conclusiones más importantes de este trabajo de investigación acerca del tratamiento térmico localizado post soldadura, para caracterización de las juntas soldadas en las tuberías de procesos bajo el código ASME B31.3 en la ampliación de la refinería de Talara.

El presente procedimiento describe la técnica para la correcta ejecución del Tratamiento Térmico Post Soldadura (PWHT) con el objeto de evitar estructuras frágiles y/o disminuir tensiones residuales como parte del proceso de fabricación y / o reparación.

La dureza Bajo considerablemente en la soldadura 168 HB en el 1° CASO y 120 HB en el 2° CASO, cabe indicar que el diámetro de ambos spools es de 2". En cada caso de tener medidas > 300 HB en diámetros mayores sería recomendable hacer una prueba antes de considerar que con el PWHT Bajara la dureza; 2° CASO se tomaron antes de PWHT solo a la SOLDADURA, y DESPUES DE PWHT a Los 5 áreas correspondientes Dando resultados Favorables.

Ambos casos específicos mencionados obtuvieron durezas aceptadas después de PWHT. La reducción de dureza en estos dos casos específicos de Uniones Soldadas Olets vs. Tubería Ø2" está en un rango de 120 HB a 160 HB. Esta reducción es mucho mayor que la reducción de dureza conocida en casos de probetas tubo vs. tubo que fue aprox. 80 HB.

Para los casos específicos de Uniones Soldadas Olets vs. Tubería Ø2" se autoriza obtener como máximo 350 HB antes de PWHT, con proceso GTAW o proceso FCAW. Para el resto

de casos, mantener por el momento como máximo 310 HB antes de PWHT, de manera preventiva.

5.3.Recomendación.

Toda investigación tiene muchas interrogantes dentro de los procesos realizados para es necesario realizar más pruebas para validar mejor los resultados obtenidos y darles importancia a los muestreos estratificados por lo que se tiene para cada análisis diferentes juntas.

Las pruebas se deben de realizar con diferentes tiempos, velocidad, temperatura de tratamiento y temperatura de enfriamiento donde se podrían visualizar mejor los resultados tener otros resultados para poder evaluar.

Dentro de los procesos de estudio los protocolos se deben de seguir para obtener un resultado satisfactorio a los investigadores y empresa involucrados.

CAPITULO VI

FUENTES DE INFORMACIÓN

6.1.Fuente bibliografía

Rodríguez P., O. (2013). *Metalurgia de la soldadura*. La Habana: Universitaria.

Seferian D. (1962). *Metalurgia de la Soldadura*. Madrid: TECNOS.

6.2.Fuentes electrónicas

Barrera G, D., & Rojano G., D. (2015). “Elaboración de un procedimiento específico de soldadura (Wps) para la construcción de polidúctos en tuberías de acero al carbono instalado bajo la técnica de perforación horizontal dirigida para la empresa Montecz S.A. *Tesis de grado en soldadura*. (U. Libre, Ed.) Bogotá, Colombia. Recuperado el 8 de Marzo de 2018, de <http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9854/MONOGRAFIA%20ELABORACION%20DE%20UN%20PROCEDIMIENTO%20ESPECIFICO%20D E%20SOLDADURA.pdf?sequence=1>

García C., E. (2016). Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado. *Tesis*. (U. d. Cantabria, Ed.) Santander. Recuperado el 10 de Marzo de 2018, de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9156/386972.pdf?sequence=1>

Gualco, A.; Marini, C.; Svoboda, H. (2012). Efecto del tratamiento térmico post-soldadura sobre la resistencia al desgaste abrasivo de depósitos de soldadura de acero martensítico. (C. 2012, Ed.) *III CAIM 2012*, 137-145. Recuperado el 1 de Marzo de 2018, de <http://www.caim2012.frba.utn.edu.ar/descargas/trabajos/materiales.pdf>

- Hazarabediana, A., Bilmesh, P., Llorenteb, C., & Ovejero, J. (2003). *Efecto de los tratamientos térmicos de post soldadura Sobre la resistencia al daño por hidrógeno*. Recuperado el 04 de 01 de 2017, de Asociación Argentina de Materiales: <http://www.materiales-sam.org.ar>
- Jenney, C.; O'Brien, A. (s.f.). *Welding Handbook*. (Vol. 1). Miami: American Welding Society. Recuperado el 7 de Marzo de 2018, de https://pubs.aws.org/Download_PDFS/WHB-1.9PV.pdf
- Laufgang S. (2006). *Tratamiento Termico de Soldadura*. (T. S. S.A., Ed.) Recuperado el 7 de Marzo de 2018, de <http://materias.fi.uba.ar/6713/CursoIASListook.pdf>
- Luna T., R. (2015). "Evaluación del procedimiento de soldadura de la unión disímil entre Aceros API 5L X70 Ps11 Y ASTM A707 L5 F65.", para la, *Tesis para título profesional de ingeniero mecánico*. (P. U. Perú, Ed.) Lima, Perú. Recuperado el 9 de Marzo de 2018, de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/6164/LUNA_RENZO_SOLDADURA_DISIMIL.pdf?sequence=1
- Martínez, A.; Miguel, V.; Escudero, L.; Coello, J.; Calatayud, A. (2012). Influencia de la temperatura de precalentamiento en las transformaciones metalúrgicas de fundiciones de hierro en soldaduras heterogéneas con electrodos de níquel. *Tratamientos Térmicos*(133), 33-37. Recuperado el 4 de Marzo de 2018, de <http://www.metalspain.com/tratamientos-oct2012.pdf>
- Mauricio A. (12 de 04 de 2015). *Estudio del tratamiento térmico post soldadura GTAW EN tuberías de proceso de acero al carbono ASTM A106 GR B Y su incidencia en la resistencia a la tracción y dureza*. Recuperado el 15 de 12 de 2016, de Repositorio digital Universidad Técnico de Ambato: <http://repositorio.uta.edu.ec>
- Montero J., García A., Varela A., Zaragoza S., Artiaga R., Mier J. (2008). Estudio del

desgaste de uniones soldadas en tuberías. (U. d. Coruña, Ed.) *Rvista de Metalurgia*, 170-175. Recuperado el 8 de Marzo de 2018, de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/105/104>

Osorio, J., Pacheco, H., & Toro, A. (28 de 08 de 2008). *Efecto del tratamiento térmico post soldadura sobre la microestructura del acero inoxidable grado CA6NM para la construcción de rodets hidráulicos*. Recuperado el 27 de 12 de 2016, de Revista UTP: <http://revistas.utp.edu.co>

ANEXOS

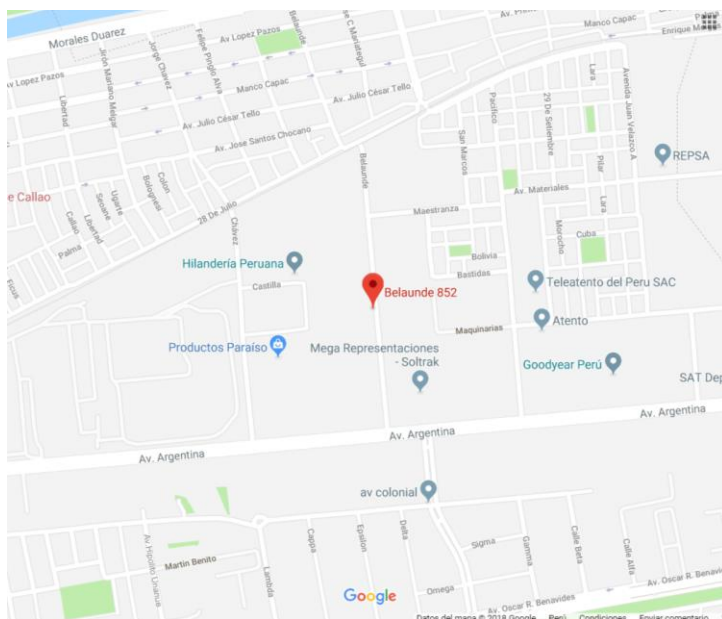
Anexo 1: Matriz Consistencia General

Titulo	Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Indicadores
PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO POST SOLDADURA (PWHT) PARA MEJORAR LA DUREZA DE PREFABRICADO DE TUBERÍAS PARA EL PROYECTO DE LA MODERNIZACIÓN DE LA REFINERÍA DE TALARA	Generales	General	General	Independiente	
	¿En medida el proceso de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá mejorar la dureza de prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara?	Evaluar el proceso de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), para garantizar la dureza del prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.	Realizando un control de proceso de tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá mejorar la dureza de prefabricado de tuberías para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara.	Dureza	- Parámetro de control. - Estándares de calidad.

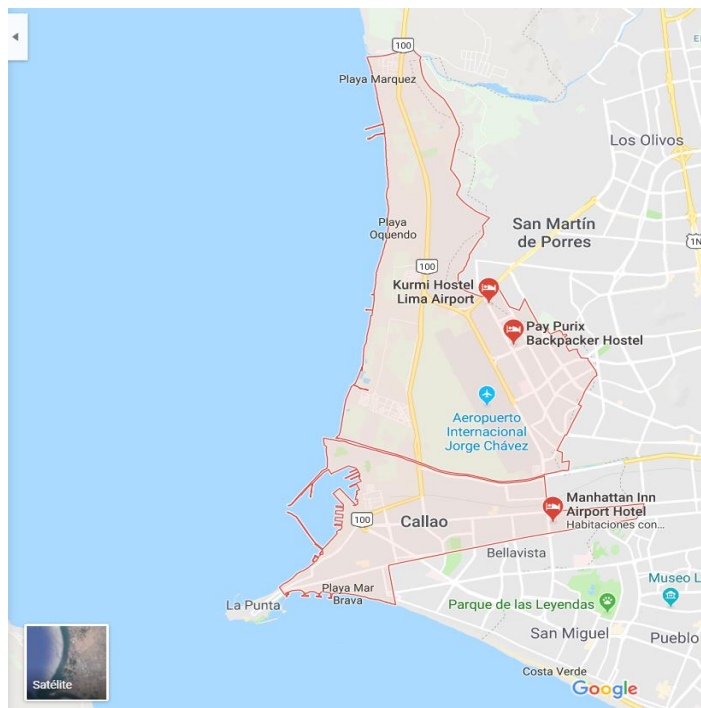
Anexo 2: Matriz Consistencia Específico

Titulo	Específicos			Variable	Indicadores
<p>PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO POST SOLDADURA (PWHT) PARA MEJORAR LA DUREZA DE PREFABRICADO DE TUBERÍAS PARA EL PROYECTO DE LA MODERNIZACIÓN DE LA REFINERÍA DE TALARA</p>	Problema	Objetivos	Hipótesis	Dependiente	
	<ul style="list-style-type: none"> -¿En qué medida la velocidad de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influirá en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara? -¿En qué medida la temperatura de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara? -¿En qué medida el tiempo de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara? 	<ul style="list-style-type: none"> -Evaluar en qué medida la velocidad de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara. -Evaluar en qué medida la temperatura de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara. -Evaluar en qué medida el tiempo de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), influye en la dureza del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara. 	<ul style="list-style-type: none"> -Controlando la velocidad de calentamiento de acuerdo los parámetros establecidos de los estándares del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá obtener una dureza optimo dentro de los parámetros de control del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara. -Controlando la temperatura de calentamiento del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), nos permitirá obtendrá una dureza optima dentro de los estándares de calidad del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara. -Con un control del tiempo de calentamiento de acuerdo los parámetros establecidos de los estándares del tratamiento térmico localizado post soldadura (PWHT), se obtendrá una dureza optimo dentro de los parámetros de control del prefabricado de tubería para el proyecto de la modernización de la refinería de Talara. 	<p>Tratamiento térmico</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de calentamiento. - Temperatura calentamiento. - Tiempo de calentamiento.

Anexo 3: Jr. Victor Andres Belaunde 852 - Callao – TERMOSOLDEX



Anexo 4: El Callao



**“PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO POST SOLDADURA
(PWHT) PARA MEJORAR LA DUREZA DE PREFABRICADO DE TUBERÍAS
PARA EL PROYECTO DE LA MODERNIZACIÓN DE LA REFINERÍA DE
TALARA”**

.....

Dr. SALCEDO MEZA, Máximo Tomas

Presidente

.....

M(o). RODRIGUEZ ESPINOZA, Ronald F.

Secretario

.....

Ing. ABARCA RODRÍGUEZ, Joaquín J.

Vocal

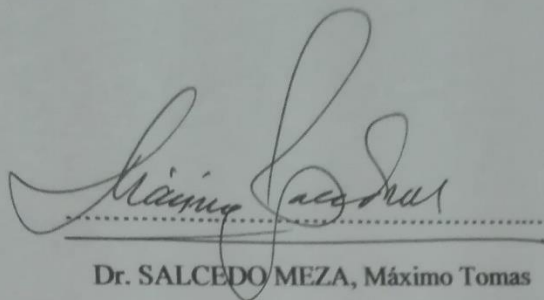
.....

M(o). IPANAQUE ROÑA, Juan M.

Asesor

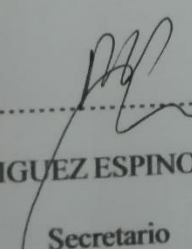
78

“PROCESO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO POST SOLDADURA
(PWHT) PARA MEJORAR LA DUREZA DE PREFABRICADO DE TUBERÍAS
PARA EL PROYECTO DE LA MODERNIZACIÓN DE LA REFINERÍA DE
TALARA”



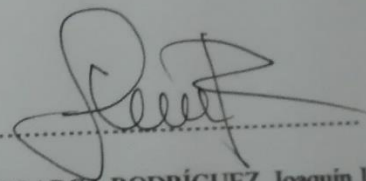
Dr. SALCEDO MEZA, Máximo Tomas

Presidente



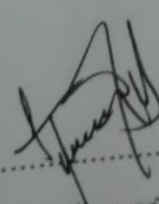
M(o). RODRIGUEZ ESPINOZA, Ronald F.

Secretario



Ing. ABARCA RODRÍGUEZ, Joaquin J.

Vocal



M(o). IPANAQUE ROÑA, Juan M.

Asesor