

Evaluación de un procedimiento de soldadura para el AISI 4130 sin PWHT bajo normas API 6A y ASME Sección IX

Carlos Naranjo G.
Departamento de Ciencia de la
Energía y Mecánica
Universidad de las Fuerzas Armadas-
ESPE
Sangolquí-Ecuador
crnaranjo@espe.edu.ec

Xavier Sánchez S.
Departamento de Ciencia de la
Energía y Mecánica
Universidad de las Fuerzas Armadas-
ESPE
Sangolquí-Ecuador
xrsanchez@espe.edu.ec

Juan Morales D.
Departamento de Ciencia de la
Energía y Mecánica
Universidad de las Fuerzas Armadas-
ESPE
Sangolquí-Ecuador
juanito_1415@hotmail.com

Abstract— Debido a la complejidad de realizar post-calentamiento en campo necesario para garantizar las propiedades mecánicas de una junta soldada de acero AISI 4130 de acuerdo con las normas API 6A [1] y ASME Sección IX [2], y evitar la presencia de martensita en la estructura metalográfica de la junta, siendo esta última perjudicial en los aceros y provocada por enfriamientos rápidos. Se ve la necesidad de desarrollar un procedimiento de soldadura capaz de satisfacer mencionadas condiciones sin emplear post-calentamiento. Para lo cual se realizó tres distintos procedimientos cuya base es la soldadura por revenido. Una vez elaborados los cupones de soldadura de cada procedimiento de prueba se llevaron a cabo los ensayos destructivos y no destructivos especificados en códigos a fin de evaluar las propiedades mecánicas y las características de la junta soldada y consecuentemente determinar qué proceso es el más adecuado en función de las condiciones a satisfacer previamente mencionadas. De las pruebas realizadas se obtiene que el Procedimiento de Soldadura 1 (S01) es el más adecuado ya que la junta soldada alcanza las mejores propiedades mecánicas tanto en dureza, tracción, impacto y ductilidad, las mismas que se han comparado con valores especificados en norma, adicionalmente es necesario mencionar que con dicho procedimiento la estructura metalográfica de la junta está libre de martensita. Del estudio realizado se concluye que el Procedimiento de Soldadura 1 (S01) es adecuado para soldar AISI 4130 en campo sin post-calentamiento, con buenas propiedades mecánicas y estructura metalográfica [10].

Keywords-component; acero AISI 4130, dureza, soldadura de revenido, tracción, doblado, impacto, metalografía.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando se realiza una soldadura con acero AISI 4130 en la Industria Petrolera es necesario un PWHT (Post Welding Heat Treatment) para garantizar las propiedades mecánicas y estructura metalográfica de la junta, la misma que estará en contacto directo con el petróleo, y si esta posee martensita el elemento mecánico del cual la junta soldada forma parte se fragilizará, si este último llega a corroerse o sufre sobrepresión su falla es inminente, no obstante en campo es muy complicado realizar un PWHT sea por tiempo, ubicación, logística o costos.

En la Norma ASME Sección IX-2013, en QW-290 ya se establecen las variables esenciales y no esenciales que se deben tomar en cuenta en la elaboración del WPS (Welding Procedure Specification) que fueron añadidas a partir del año 2004.

En las investigaciones previas que se han realizado sobre la soldabilidad de distintos aceros sin tener la necesidad de realizar un PWHT, no se ha incluido al acero AISI 4130, siendo este acero ampliamente utilizado en la industria petrolera, por lo que es de vital importancia profundizar y ampliar el conocimiento existente sobre la soldabilidad sin PWHT a fin de generar un procedimiento aplicable para el AISI 4130.

Consecuentemente en el presente estudio se desarrollan procedimientos de soldadura que aplican la soldadura por revenido a fin de determinar el más adecuado para la soldabilidad del acero AISI 4130, para en lo posterior aplicar este procedimiento en la industria.

II. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL WPS

A. Soldabilidad del AISI 4130

La soldabilidad de los aceros se enfoca tanto en la compatibilidad química entre el material aportado y el material base y las propiedades mecánicas, sin embargo en aceros aleados hay que tener en cuenta los aleantes que el acero posee ya que estos pueden ser perjudiciales para las propiedades mecánicas de la junta soldada, entre los cuales cabe destacar al Carbón, Silicio, Manganeso y Azufre.

TABLA I PORCENTAJE DE ALEANTES DEL ACERO AISI 4130

ELEMENTO	CONTENIDO (%)
Cromo, Cr	0.80 - 1.10
Manganeso, Mn	0.40 - 0.60
Carbón, C	0.28 - 0.33
Silicio, Si	0.15 - 0.30
Molibdeno, Mo	0.15 - 0.25
Azufre, S	0.040

Un factor clave para ver la soldabilidad de un acero es su carbono equivalente el cual indica la tendencia que posee este a endurecerse o fisurarse durante la soldadura. Para el cálculo del mismo, en este trabajo, se utilizó el código BPVC ASME Sección IX el cual en QW-403.26 establece una ecuación (1) para calcularlo:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%) \quad (1)$$

Con la cual se determina que el C_{eq} del acero AISI 4130 es 0,7 %, por lo tanto según IIW (International Institute of Welding) como posee un $C_{eq} > 0,55$ este acero requiere un pre-calentamiento y un PWHT para no presentar fisuras después de la soldadura.

B. Soldadura de Revenido

La Soldadura por Revenido es una técnica de soldadura que utiliza la energía (calor) que genera al depositar cordones de soldadura para revenir la zona aledaña siendo está la que sufre afecciones térmicas, consecuentemente mientras aporta material trata térmicamente a la junta[3]. Al utilizar el calor aportado por la segunda capa de cordones para revenir la primera capa de cordones, se obtiene un refinamiento en los cordones de la primera capa y si alcanza un refinamiento total en las zonas críticas de la microestructura formada con la primera capa de cordones.

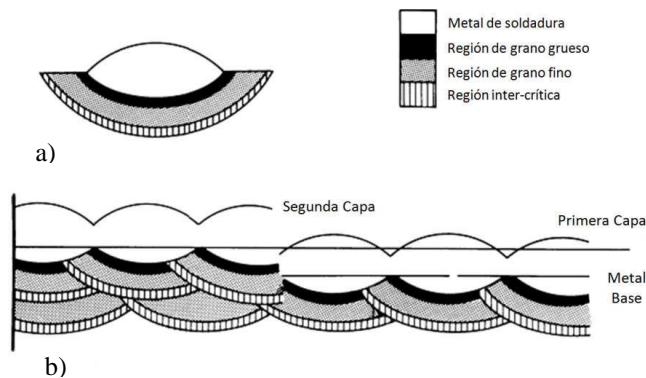


Figura 1. SOLDADURA DE REVENIDO. a) ZAT GENEADA EN EL PRIMER PASE DE SOLDADURA b) REFINAMIENTO DEL GRANO DE LA ZAT

C. Diseño del procedimiento de soldadura

Para realizar las pruebas se delimitó una junta del tipo V de 13 mm de profundidad, una apertura en la raíz de 6 mm y un ángulo de 45°, además se utilizó la distribución de cordones y el orden especificados en la figura 2.

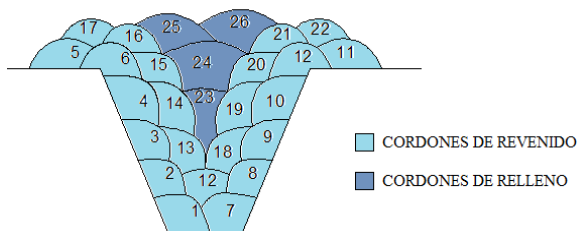


Figura 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS CORDONES DE SOLDADURA

Para realizar las pruebas se desarrollaron tres procedimientos de soldadura, cuyos parámetros están basados en la aportación de calor necesaria para realizar la técnica de Soldadura por Revenido los cuales serán nombrados como S01, S02 y S04 [4]. En las Tablas II y III se observan los distintos parámetros y las diferencias de calor aportado.

TABLA II PARAMETROS DE SOLDADURA DE TÉCNICA DE REVENIDO

Parámetros de soldadura	Procedimientos de Soldadura		
	S01	S02	S04
Amperaje	130 A	130 A	130 A
Voltaje	23.5 V	23.5 V	23.5 V
Velocidad de Avance Promedio	33 cm/min	30 cm/min	25 cm/min
Electrodo	E9018	E9018	E9018
Pre-calentamiento	250 °C	250 °C	250 °C
Calor aportado	5.45 KJ/m	6.00 KJ/m	7.32 KJ/m

TABLA III PARAMETROS DE SOLDADURA DE RELLENO

Parámetros de soldadura	Procedimientos de Soldadura		
	S01	S02	S04
Amperaje	130 A	130 A	130 A
Voltaje	23.5 V	23.5 V	23.5 V
Velocidad de Avance Promedio	140 cm/min	140 cm/min	140 cm/min
Electrodo	E9018	E9018	E9018
Pre-calentamiento	250 °C	250 °C	250 °C
Calor aportado	16 KJ/m	16 KJ/m	16 KJ/m

Después de terminada la soldadura se podrá dejar enfriar a temperatura ambiente sin necesidad de un PWHT.

III. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Para determinar las propiedades mecánicas de la soldadura se realizaron ensayos destructivos y no destructivos, tales como: inspección visual, tintas penetrantes, tracción, impacto, dureza, doblado y además metalografías para observar la estructura metalográfica del material base y del material de aporte.

A. Inspección Visual

La inspección visual de la soldadura es un ensayo NDT (Non-Destructive Testing), el cual sirve para identificar discontinuidades superficiales, para realizar este ensayo en los cupones de soldadura se remitió al código BPVC ASME Sección IX en QW-194, además se esperó 48 horas para realizar la inspección visual.



a)



b)



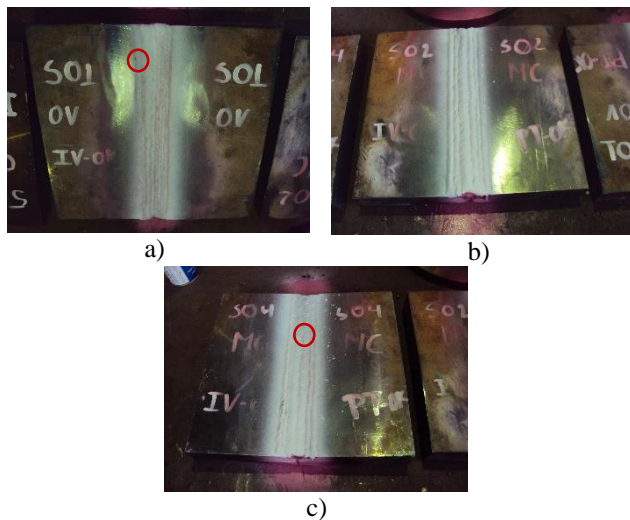
c)

Figura 3. INSPECCIÓN VISUAL DE LOS CUPONES DE SOLDADURA
a) PROCEDIMIENTO S01 CON MORDEDURA EN LA ZONA SUPERIOR, b) PROCEDIMIENTO S02, c) PROCEDIMIENTO S04 CON MORDEDURA EN LA ZONA MEDIA SUPERIOR.

Al realizar la inspección visual de las probetas soldadas se logra determinar que en los procedimientos S01 y S04 se presentaron mordeduras que se pueden observar en la figura 3 a) y figura 3 b) las cuales poseían una longitud de 1 mm y una profundidad de 0.5 mm.

B. Tintas penetrantes

El ensayo de tintas penetrantes es un ensayo NDT, el cual sirve para identificar discontinuidades superficiales y sub-superficiales. Para realizar este ensayo se esperó 48 horas para dar tiempo a la aparición de fisuras provocadas por el hidrógeno remanente que puede quedar en la soldadura, además se realizó bajo el código BPVC ASME Sección IX QW-195, el cual nos indica los criterios de aceptación de los resultados.



a)

b)

c)

Figura 4. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES a) PROCEDIMIENTO S01 CON INDICACIONES MOSTRADAS POR LAS TINTAS PENETRANTES, b) PROCEDIMIENTO S02, c) PROCEDIMIENTO S04 CON INDICACIONES MOSTRADAS POR LAS TINTAS PENETRANTES

Al realizar el ensayo de tintas penetrantes las discontinuidades apreciadas en la inspección visual fueron evidentes, por otro lado no se presentó ningún tipo de discontinuidad a lo largo de la junta soldada como se aprecia en la figura 4.

C. Ensayos de tracción

El ensayo a tracción consiste en la aplicación de una carga axial a una probeta, para lograr determinar su deformación plástica y también determinar su esfuerzo de rotura, estos ensayos fueron realizados en probetas cuyas dimensiones están normadas por el código BPVC ASME Sección IX en QW-462.1(a), el procedimiento para realizar los ensayos y el criterio de aceptación de los mismos fue guiado también en base a QW-150.

TABLA IV RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN

		Esfuerzo a la Rotura	Observaciones
Procedimiento S01	Probeta 1	94997 psi	Rotura en el material base
	Probeta 2	95237 psi	Rotura en el material base
Procedimiento S02	Probeta 1	92547 psi	Rotura en el material base
	Probeta 2	95340 psi	Rotura en el material base
Procedimiento S04	Probeta 1	87025 psi	Rotura en el material base
	Probeta 2	94391 psi	Rotura en el material base

Los ensayos realizados dieron como resultados los datos indicados en la tabla IV. Las probetas ensayadas se pueden apreciar en la figura 5, en donde se observa el encuellamiento existente en el material base.



Figura 5. PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN

D. Ensayos de doblado

El ensayo de doblez guiado proporciona un control de calidad de la soldadura que ayuda a determinar la ductilidad de la misma, además de ver la eficacia del procedimiento de soldadura. Como el espesor de la junta soldada es de 13 mm se realizó un ensayo de doblado lateral cuyo procedimiento y criterios de aceptación se encuentran en el código BPVC ASME Sección IX en QW-160, además las dimensiones de las probetas a utilizarse se basaron en QW-462.2.

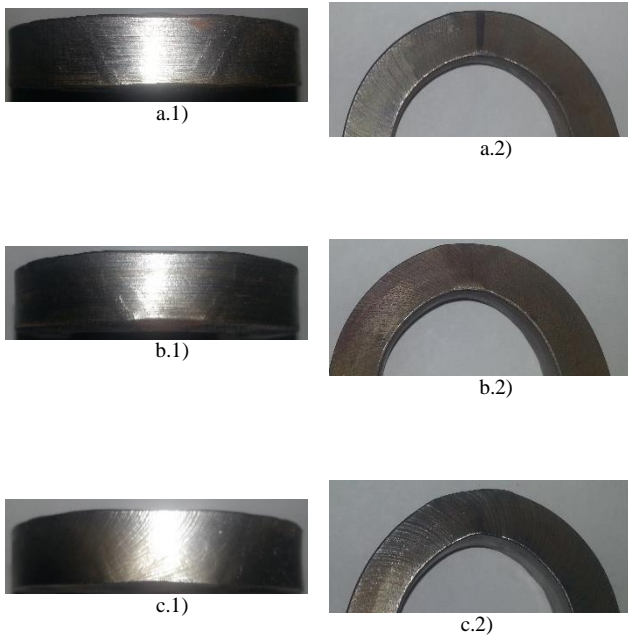


Figura 6. FOTOGRAFÍAS TRANSVERSALES Y LATERALES DEL ENSAYO DE DOBLADO. a) S01, b) S02, c) S04.

En la figura 6 se puede observar el tipo de curvatura y la deformación de las probetas dobladas transversalmente.

E. Ensayos de Impacto

El ensayo de impacto Charpy o también conocido como ensayo de tenacidad es utilizado para determinar la cantidad de energía que un material puede absorber antes de producirse la fractura. Este ensayo debe realizarse tal como indica la Norma ASTM E23 [5], en la que consta también el dimensionamiento de las probetas. Además también hay que tener en cuenta las menciones que hace el código BPVC ASME Sección IX en QW-171 que nos remite a SA-370 para el procedimiento a seguir en este ensayo. En el caso de juntas soldadas la ubicación para la extracción de la probeta de impacto debe realizarse con mucho cuidado y tratar de que la muesca realizada en la probeta está ubicada exactamente en la ZAT de la junta soldada como se puede apreciar en la figura 7.

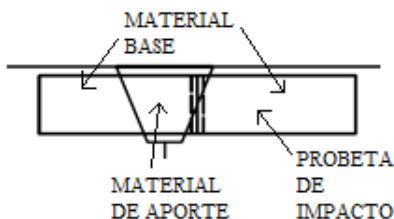


Figura 7. UBICACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE LA PROBETA DE IMPACTO EN EL CUPON DE SOLDADURA

En los datos de la tabla V obtenidos de los ensayos de impacto se puede apreciar que entre mayor calor aportado la resistencia al impacto aumenta.

TABLA V RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

	Valores Máximos del Ensayo	Valores Mínimos del Ensayo	Energía Promedia Absorbida
Procedimiento S01	47,2 J	41,2 J	44,2 J
Procedimiento S02	51,0 J	14,7 J	32,85 J
Procedimiento S04	57,9 J	53,0 J	65,25 J

Para tener un análisis completo no solo es necesario los datos, sino también el tipo de fractura que se posee después de haber sido ensayadas las probetas y estas se pueden apreciar en la figura 8.

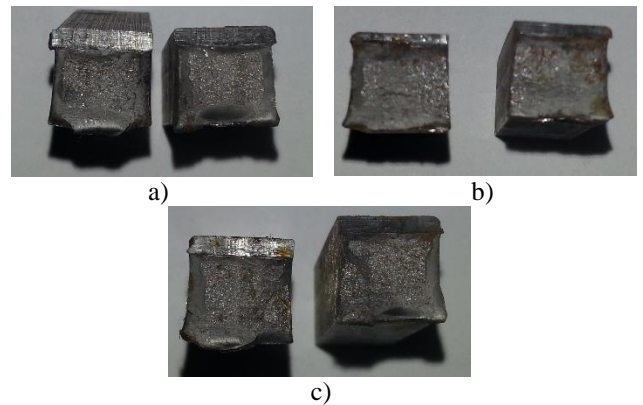


Figura 8. ENSAYO DE IMPACTO a) PROCEDIMIENTO S01 b) PROCEDIMIENTO S02, c) PROCEDIMIENTO S04

F. Ensayos de Dureza

Para realizar los ensayos de dureza de las probetas se utilizó la distribución indicada en la figura 9, siendo la zona crítica en el borde superior de la soldadura ya que este se encuentra en contacto directo con el medio ambiente y por este motivo se enfriará más rápido, pudiendo provocar la presencia de martensita en la ZAT (Zona Afectada Térmicamente).

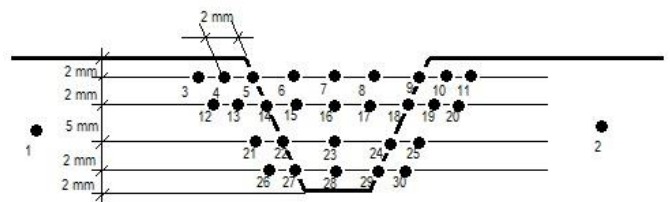


Figura 9. UBICACIÓN DE LAS IDENTACIONES REALIZADAS EN LOS ENSAYOS

G. Metalografías

Para realizar las metalografías se pulió con lijas de número 120, 240, 360, 600, 1000, 1200 y 1500 sucesivamente para después darle un último acabado con alúmina, después se atacó químicamente con Nital al 3%. Cabe recalcar que se tuvo en cuenta la ubicación de los puntos los cuales están descritos en la figura 10.



Figura 10. UBICACIÓN DE LAS METALOGRAFÍAS

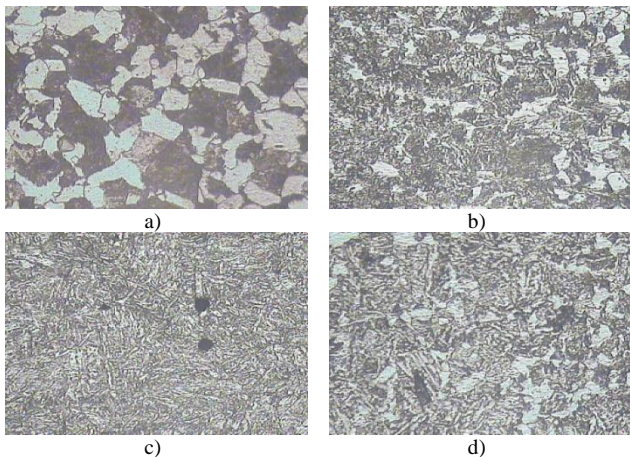


Figura 11. METALOGRAFÍAS DEL PROCEDIMIENTO S01. a) MATRIZ FERRÍTICA CON ISLAS DE PERLITA. b) ZONA DE TRANSICIÓN. c) MATRIZ PERLITICA FERRITICA DE GRANO FINO. d) PERLITA GRUESA

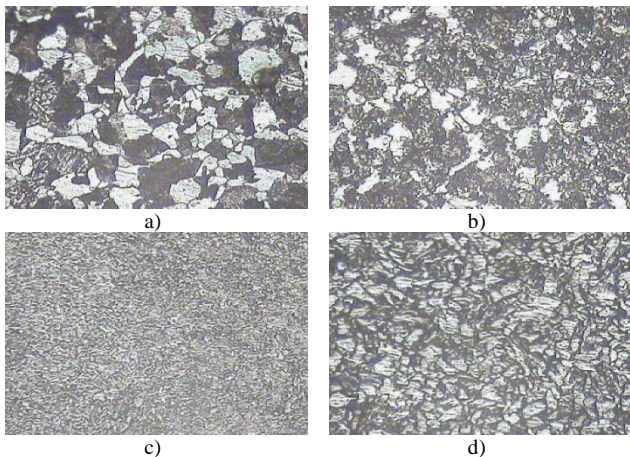


Figura 12. METALOGRAFÍAS DEL PROCEDIMIENTO S02. a) MATRIZ FERRÍTICA CON ISLAS DE PERLITA. b) ZONA DE TRANSICIÓN. c) MATRIZ PERLITICA FERRITICA DE GRANO FINO. d) MATRIZ FERRITICA PERLITICA

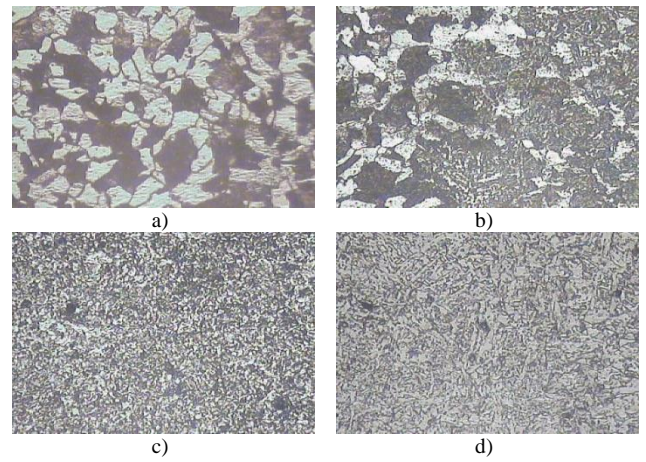


Figura 13. METALOGRAFÍAS DEL PROCEDIMIENTO S04. a) MATRIZ FERRÍTICA CON ISLAS DE PERLITA. b) ZONA DE TRANSICIÓN. c) MATRIZ PERLITICA FERRITICA DE GRANO FINO. d) PERLITA GRUESA

En las figuras 11, 12 y 13 se puede apreciar la estructura metalográfica que se presentó en los procedimientos S01, S02 y S04 respectivamente.

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

A lo largo del artículo se ha definido tres procedimientos alternativos sin PWHT, los cuales fueron evaluados con distintos ensayos destructivos para establecer sus propiedades mecánicas.

A. Ensayos de Tracción

Con respecto a la resistencia a la tracción en la norma API 6A del 2004 en su tabla 5 nos indica que los materiales con designación 60K el cual hace referencia al acero utilizado en este estudio debe poseer un esfuerzo mínimo a la rotura de 85000 psi, por lo cual el material depositado deberá tener igual o superior esfuerzo a la rotura. Con los resultados de la tabla IV se realizó la gráfica de barras de la figura 14 en la que se puede observar que la resistencia a la tracción de las juntas soldadas disminuye a medida que el aporte de calor aumenta, por lo cual estos datos presentan una clara relación inversamente proporcional.

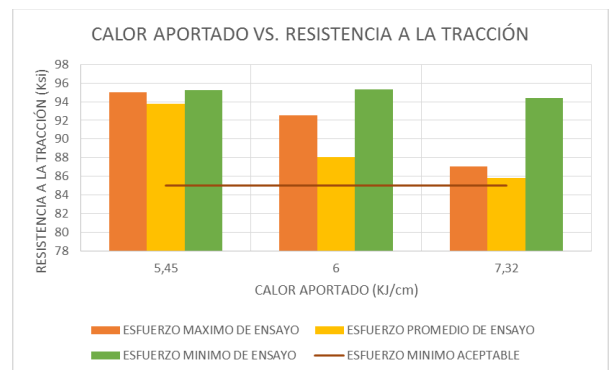


Figura 14. APOORTE DE CALOR VS RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Teniendo en cuenta el esfuerzo mínimo aceptable en la norma API 6A de 85000 psi se constata que todos los procedimientos están sobre este valor establecido, siendo el procedimiento S01 con una aportación de calor de 5,45 KJ/cm el que mejor resultados presentó.

B. Ensayos de Tracción

Como se puede observar en la figura 6, los radios de curvatura de a.2, b.2 y c.2, los cuales representan a los procedimientos S01, S02 y S04 respectivamente, son distintos, ya que al poseer una entrada de calor de 5,45 KJ/cm las probetas del procedimiento S01 obtiene un radio de curvatura uniforme a lo largo de toda la probeta, por otro lado el procedimiento S02 con una entrada de calor de 6 KJ/cm posee un radio de curvatura en el material base diferente con respecto al material de aporte, por lo que se percibe una curvatura más aguda en la zona del material de aporte, y por último los ensayos realizados en la probeta del procedimiento S04 con una entrada de calor de 7,32 KJ/cm posee una curvatura más aguda en la zona del material de aporte que en el procedimiento S02. Teniendo esto en cuenta se puede observar que el procedimiento S01 posee una ductilidad similar tanto en el material base como en el material de aporte, lo cual produjo el radio uniforme, mientras que en los otros procedimientos el material de aporte posee una ductilidad inferior al material base, por lo cual a mayor calor aportado la ductilidad del material de aporte aumenta.

C. Ensayos de Impacto

Al apreciar la figura 15 se puede observar que la energía máxima absorbida en los ensayos va aumentando a medida que aumenta el calor aportado, por lo cual el procedimiento S01 posee una capacidad de absorción de energía inferior al procedimiento S02, de igual manera pasa entre el procedimiento S02 y S04, lo cual hace que el procedimiento S04 sea el que más energía absorbe de los tres.

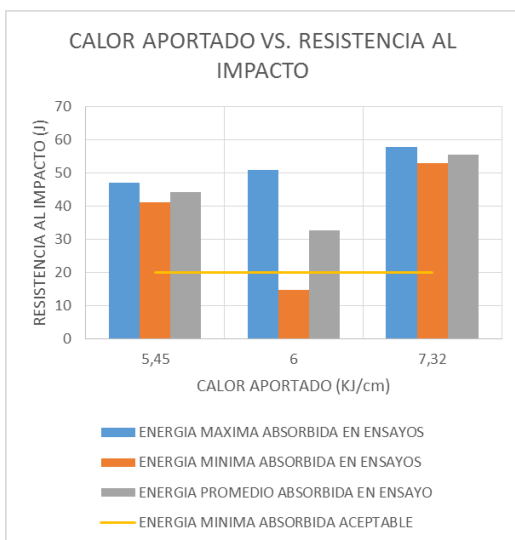


Figura 15. CALOR APORTADO VS. RESISTENCIA AL IMPACTO

También hay que tomar en cuenta que la norma API 6A nos indica que para este ensayo la energía que debe absorber la junta soldada a una temperatura de -29°C es de 20 J, por lo cual el valor mínimo del procedimiento S02 de la tabla V de 14,7 J quedaría descartado, mientras que el procedimiento S01 y S04 estarían aprobados para ser utilizados.

D. Ensayos de Impacto

En la figura 16 se puede observar con línea roja el límite máximo de Dureza Vickers que es de 250 HV para este tipo de material establecidos por la NACE MR0175 [7], por lo tanto el procedimiento S04 quedaría descartado, ya que este proceso posee dureza máximas de 259 HV, mientras que los procedimientos S01 y S02 cumplen los valores establecidos según la norma NACE MR0175, además se puede observar que en los puntos 4, 5, 9 y 10 se obtiene los valores más altos de cada procedimiento, lo que se debe fundamentalmente a que están ubicados en la ZAT.

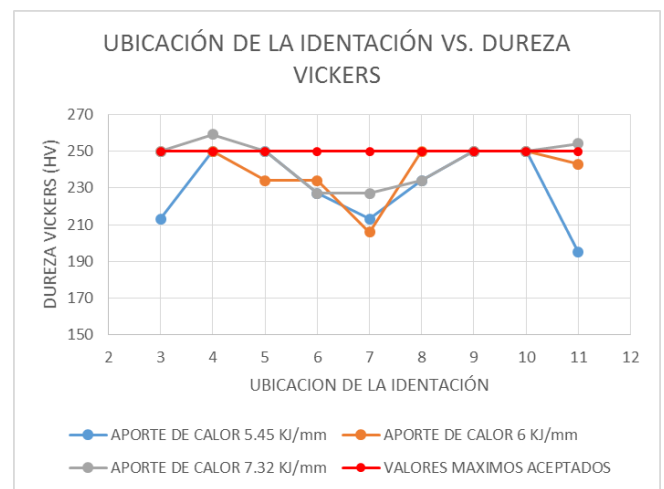


Figura 16. UBICACIÓN DE LA IDENTACIÓN VS. DUREZA VICKERS

E. Metalografías

Las metalografías muestran los microconstituyentes del material y como estos han sido afectados por la soldadura, como se puede apreciar no existe la presencia de martensita lo cual corrobora los resultados de dureza obtenidos ya que las durezas obtenidas son relativamente bajas considerando que la martensita es un microconstituyente con una dureza alta. Además que la estructura de la zona de transición se muestra un grano refinado, seguido por una matriz ferrítica perlítica lo cual nos indica que la posible martensita existente al principio del proceso se transformó en una matriz ferrítica con cementita la cual también es conocida como perlita [8], esta transformación se puede apreciar en el la figura 14 donde se muestra un diagrama TTT del acero AISI 4130 [9].

VI. RECOMENDACIONES

1. Se debe realizar un control permanente del soldador con la finalidad de que mantenga los parámetros de soldadura a lo largo de todo el proceso de soldadura para que la técnica brinde los resultados deseados.
2. Realizar un adecuado pre-calentamiento del material base como también de los electrodos a utilizar si estos son de bajo hidrógeno y procurar que sean E9018 H4.
3. Manufacturar las probetas evitando procesos de corte con aportación térmica tales como corte Oxiacetilénico o el corte con Plasma, ya que estos pueden afectar la metalurgia del material y por ende sus propiedades mecánicas.

REFERENCIAS

- [1] American Petroleum Institute, "API 6A Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment", pp 33-34, Julio 2004.
- [2] The American Society of Mechanical Engineers, "Section IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications", Edición del 2013, pp 70-71.
- [3] Elizabeth Hoyos, "Efecto de la técnica de pases de revenido en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743: Grado CA 6 NM", Medellín 2009.
- [4] Cleiton C., Victor H.C., Cicero R.O., Willys M., Jesualdo P., "Evaluation of AISI 4140 Steel Repair Without Post-Weld Heat Treatment", ASM International, 30 de Mayo de 2008.
- [5] American Society for Testing Materials, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials".
- [6] ASM Handbook, Volumen 9 "Metallography and Microstructures", 2004.
- [7] National Association of Corrosion Engineers, "Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing - Environments in oil and gas production- Part 2: Cracking-resistant carbon and low steels, and the use of cast irons", pp 18-19.
- [8] F.R. Morral, E. Jimeno, P. Molera, "Metalurgia general", Tomo II, Editorial Reverté, S.A., 1985, pp 1113.
- [9] Steel Founders Society of America and ASM International, "Steel Castings Handbook", Sexta Edición, pp 24-5.
- [10] Juan Morales D., "Diseño de un procedimiento de soldadura sin postcalentamiento para el acero AISI 4130 bajo la norma API 6A y la norma ASME Sección IX"; Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE; 2014.

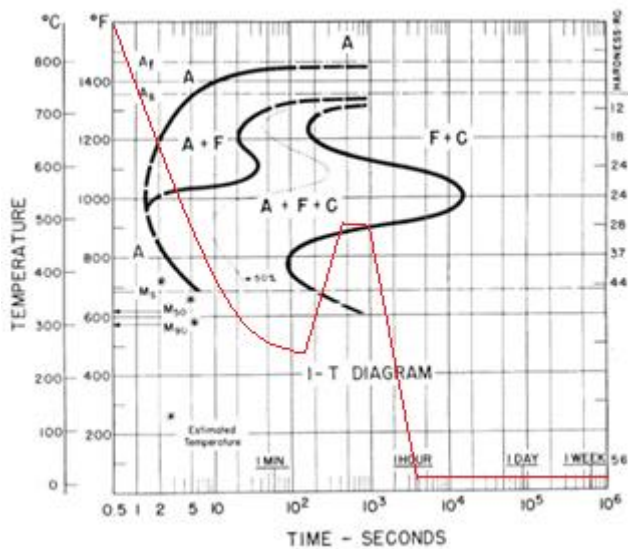


Figura 14. DIAGRAMA TTT DEL ACERO AISI 4130 CON EL CICLO DE SOLDADURA INCLUYENDO EL REVENIDO

V. CONCLUSIONES

1. Con una aportación de calor de 5.45 KJ/cm y una velocidad de avance del soldador de 33 cm/min se obtiene que la resistencia a la tracción es de 94,997 Ksi, que está sobre el valor mínimo de la norma el cual es de 85 Ksi. También se obtuvo que la energía que es capaz de absorber la soldadura es de 41.2 J que de igual manera es superior al mínimo establecido de la norma que es de 20 J, presenta una gran ductilidad y por último los valores de dureza tuvieron como valor máximo 250 HV siendo este mismo el valor máximo aceptado por la norma.
2. Al efectuar cualquiera de los procedimientos realizados se tiene la ventaja que no es necesario un PWHT, debido a que estos procedimientos han logrado satisfacer los requisitos de las normas y códigos, lo cual es favorable si esta soldadura se hace en campo.
3. Al aumentar la aportación de calor en la soldadura de revenido se identifica que la resistencia a la tracción disminuye.
4. La energía absorbida después del impacto en los ensayos realizados aumenta a medida que el calor aportado aumenta.
5. La dureza máxima obtenida en la soldadura proviene de la ZAT con un valor de 272 HV en el procedimiento S03.