

Estudio del área afectada por el calor en los aceros al carbono, por efecto de precalentamiento y soldadura

Study of the affected area by heat in carbon steels, due to the effect of preheating and welding

Nelver J. Escalante-Espinoza, Mg¹, Johnny F. Fernández-Urbano, Ing,¹ Serapio A. Quillos-Ruiz, Dr¹, Ruben A. Figueroa-León, Ing¹, and Johnny Nahui-Ortiz, Ph. D².

¹Universidad Nacional del Santa, Perú, cfpnjee@yahoo.es, jhonny042093@hotmail.com, s_quillos@hotmail.com, rfigueroa2709@gmail.com, ²National University of Engineering - UNI, Perú, jnahui@uni.edu.pe

Abstract- *The affected area by heat was studied in ASTM A36 carbon steels, with thicknesses of 12 mm, analyzing the effect of preheating on their properties. The welding process used was SMAW, then tensile, hardness, metallography and numerical calculations were carried out, for which a temperature range of 100 °C was established; 120 °C; 145 °C; 160 °C, concluding that the optimum preheating temperature is 145 °C, with which the following results of the tensile test (515.82 Mpa) and hardness (232 HV) were obtained; according to recommendations of the percentage of carbon equivalent and hardness ratios, the material will not present fissures when it will get cold. On the other hand, the results of stress (424.15-500.36 MPa) and hardness (209-250 HV) due to preheating effect show that both are inversely proportional. In addition, the effect of preheating decreases the cooling rate in order to avoid brittleness of the material and the maximum martensite formation, in addition, the width of the heat-affected area increases as the heat input increases. Then it was determined that the influence of preheating on the microstructure is essential to reduce the amount of martensite through a slow cooling and do not cause hardening levels in the affected area caused by heat; avoiding so risks of cold cracking. Finally, it was possible to understand the microstructural variations (tensile and hardness), of the affected area by heat, in order to avoid the appearance of fissures in the weld seam.*

Keywords- *Cracking, preheating, cooling speed, hardness, microstructure.*

Resumen- *Se estudió el área afectada por el calor en los aceros al carbono ASTM A36, con espesores de 12 mm, analizando el efecto del precalentamiento en sus propiedades. El proceso de soldeo empleado fue SMAW, luego se realizaron ensayos de tracción, dureza, metalografía y cálculos numéricos, para lo cual se estableció un rango de temperaturas de 100°C; 120°C; 145°C; 160°C, concluyendo que la temperatura de precalentamiento óptima es de 145°C, de la cual se obtuvo los siguientes resultados del ensayo de tracción (515.82 Mpa) y dureza (232 HV), tal es así que de acuerdo a las recomendaciones por el porcentaje de carbono equivalente y relaciones de dureza, el material no presentará fisuración en frío. Por otro lado, en los resultados del esfuerzo (424.15-500.36 MPa) y la dureza (209-250 HV) por efecto del precalentamiento se observa que ambos son inversamente proporcionales entre sí. Asimismo, el efecto del precalentamiento minimiza la velocidad de enfriamiento para evitar fragilidad del*

material y la máxima formación de martensita, además el ancho del área afectada por el calor se incrementa a medida que se incrementa el aporte de calor. Posteriormente se determinó que la influencia del precalentamiento sobre la microestructura es indispensable para reducir la cantidad de martensita mediante un enfriamiento lento para no provocar niveles de endurecimiento en el área afectada por el calor con el fin de no generar riesgos de fisuración en frío. Finalmente, se pudo comprender las variaciones microestructurales (tracción y dureza), del área afectada por el calor, con el fin de evitar la aparición de fisuración en el cordón de soldadura.

Palabras clave- *Fisuración, precalentamiento, velocidad de enfriamiento, dureza, microestructura.*

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se han realizado investigaciones importantes relacionadas a la influencia del precalentamiento en la soldadura. Inicialmente se realizó un estudio a través de ensayos de dureza, resiliencia y tenacidad en los puntos críticos de la zona afectada por el calor, determinando que la resiliencia aumenta con tratamiento post-soldeo, además en la raíz muestra una ligera mayor dureza que en los cordones superiores, debido al ciclo térmico sufrido en esa zona que le da mayor fragilidad [1].

Años más tarde, se investigó la influencia de los consumibles y la entrada de calor para no generar problemas de fisuración en frío, en aceros utilizados para blindajes, determinando que las fisuraciones se incrementan debido a un mal almacenaje de electrodos y que la entrada de calor no tenía efecto para prevenir dicho problema, seguidamente hicieron una estimación de los requisitos de precalentamiento de soldadura para grados desconocidos de aceros al carbono y de baja aleación [2][3].

Luego se evaluó el efecto del precalentamiento "Post Weld Heat Treatment" (PWHT) sobre el comportamiento mecánico, dureza, susceptibilidad al agrietamiento en frío y esfuerzos residuales de varios tipos de acero, recientemente, se realizó un estudio sobre si la entrada de calor modificaba las propiedades microestructurales y mecánicas en la cercanía de la zona o región afectada por el calor a través de muestras ensayadas para un mejor alcance en el sector hidrocarburos, empleando diversos procesos de soldadura como Shield Metal Arc Welding (SMAW), Gas Metal Arc Welding

Digital Object Identifier: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.238>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390
DO NOT REMOVE

(GMAW) y el Flux Cored Arc Welding (FCAW) [4], determinando que la adición de calor genera un cambio importante en las propiedades mecánicas y microestructurales, reduciendo las tensiones generadas en el proceso [5]. Finalmente se realizó una investigación experimental y numérica de los efectos del precalentamiento en la modificación de los esfuerzos residuales en el proceso de soldadura de reparación [6].

A. Conceptos principales

A.1. Zonas Metalúrgicas de la soldadura

Metal Base (MB) es la región donde no ocurre cambio microestructural.

Metal de Soldadura o Zona de Fusión (ZF) es la zona donde se alcanza la fusión completa. Además, el metal de soldadura es el resultado de un proceso de dilución.

Zona o área afectada por el calor (ZAC) es la zona donde su estructura original y propiedades mecánicas son modificadas mediante un ciclo térmico [7].

A.2. Factores que afectan en los cambios de temperatura durante la soldadura

Aporte de calor neto es el calor que se libera durante el proceso de soldado.

Temperatura de precalentamiento consiste en calentar el material base antes y durante el proceso.

Geometría de la soldadura comprende el espesor, la forma y las dimensiones de la soldadura y el ángulo empleado entre las juntas a unir.

Conductividad Térmica consiste en la capacidad de la sustancia para transmitir el calor de sus moléculas a otras adyacentes que están en contacto.

Fisuración en frío, se produce cuando el metal soldado se encuentra en proceso de enfriamiento o cuando, posteriormente, el metal ya está frío. No hay una sola causa que explique este tipo de fisuración, más bien son muchos los factores que intervienen en ella. Dentro de la fisuración en frío, se puede distinguir una serie de tipos, de acuerdo a los diferentes mecanismos que inducen a la fragilización y posterior al agrietamiento en la unión soldada [7].

B. Ecuaciones principales

B.1. Aporte de calor neto

$$Q_{neto} = \frac{V \times I}{v} \times \eta \quad (1)$$

Donde Q_{neto} representa el aporte de calor neto en J/mm, V , el voltaje, I , la Intensidad de Corriente, v , la velocidad de avance en la soldadura en mm/s, η , la eficiencia de la transferencia de calor.

B.2. Temperatura de precalentamiento mínimo (T_0)

Método de Seferian

$$C_q(\%) = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \quad (2)$$

$$C_T(\%) = C_q + C_e = C_q * (1 + 0.005e) \quad (3)$$

$$T_0(^{\circ}C) = 350\sqrt{C_T - 0.25} \quad (4)$$

Donde C_q representa el carbono equivalente químico en base a las propiedades del material ASTM A36, e , el espesor del material en mm y C_T el carbono equivalente total.

B.3. Velocidad de enfriamiento

$$\tau = e \sqrt{\frac{\rho C(T_c - T_0)}{H_{net}}} \quad (5)$$

Luego de evaluado el espesor relativo τ , Se usa la fórmula de velocidad de enfriamiento para placas delgadas.

$$V_e = \frac{-2\pi k \rho C(e)^2 (T_c - T_0)^2}{Q_{neto}^2} * (T_c - T_0)^3 \quad (6)$$

Donde T_0 es la temperatura de precalentamiento, k , conductividad térmica del material en J/mm s°C, T_c representa la temperatura a la que se calcula la velocidad de enfriamiento, V_e , la velocidad de enfriamiento durante el proceso en °C/s, e , es el espesor del material ensayado en mm, ρ , la densidad del metal base en g/mm³ y C , es el calor específico en J/g°C.

B.4. Temperatura máxima en cada punto y ancho de la zona afectada por el calor

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi \epsilon \rho C e Y}}{Q_{neto}} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (7)$$

Donde T_p es la temperatura máxima obtenida, ϵ , épsilon, Y es la distancia desde el borde de fusión de la soldadura en mm y T_f , la temperatura de fusión alcanzada.

B.5. Tiempo de solidificación de la zona afectada por el calor

$$T_s = \frac{L Q_{neto}}{2\pi k \rho C (T_f - T_0)^2} \quad (8)$$

Donde L es el calor latente de fusión y es igual a 2J/mm³.

B.6. Dureza en el acero y en el área afectada por el calor

Se usará la ecuación para calcular el carbono equivalente DE IIW (Instituto Internacional de Soldadura).

$$CE = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (9)$$

Dureza máxima en el acero:

$$Dureza \text{ Máxima (HV)} = 939C + 284 \quad (10)$$

Dureza máxima en el área afectada por el calor:

$$Dureza \text{ Máxima (ZAC)(HV)} = 1200CE - 200 \quad (11)$$

II. METODOLOGÍA

A. Preparaci3n de probetas

Las probetas son de acero estructural ASTM A36 de 12 x 100 x 300 mm con bisel de 60°, se prepararon 5 probetas para cada nivel de temperatura, siendo las temperaturas de ensayo de 100°C, 120°C, 145°C y 160 °C. Probetas uniformes.

El esquema de la probeta se muestra en la Fig. 1.

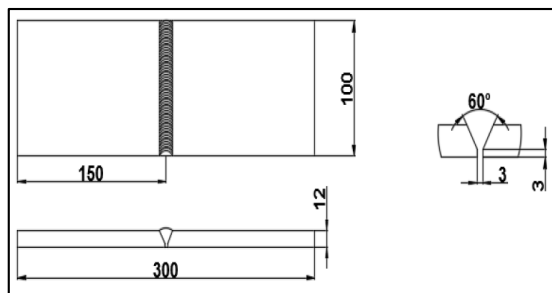


Fig. 1 Esquema de probeta de trabajo.

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM A36

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
0.26	1.2	0.4	0.04	0.05

Fuente: [8].

En la Tabla 1 se muestra la composición química del acero ASTM A36.

B. Selección de electrodos

Para el proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW con electrodo recubierto se utilizó un electrodo E-7018, de 3 mm de diámetro.

TABLA II
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ELECTRODO SUPERCITO 7018

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)	Otros (%)
0.05	1.00	0.60	Max 0.02	Max 0.02					

Fuente: [8].

TABLA III
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL METAL DEPOSITADO

Tratamiento térmico	Resistencia a la Tracción (Mpa)	Límite de Fluencia (Mpa)	Elongación (%)	Energía absorbida ISO-V (°C)
Sin tratamiento	520 - 610	400	mín. 23	-30 °C

Fuente: [8].

Las propiedades del electrodo utilizado se muestran en las tablas Tablas II y III.

C. Proceso de soldadura

La soldadura se realizó de acuerdo a los parámetros de soldeo recomendados por Soldexa.



Fig. 2 Medición de temperatura de precalentamiento con el pirómetro.



Fig. 3 Proceso de soldadura de las probetas.

Se utilizó una corriente de 140 Amperios y fue ejecutada por un soldador calificado, ver Fig. 3, partiendo de la toma de datos con el medidor de temperatura (Pirómetro) Fig. 2.

D. Ensayos no destructivos

En la Fig. 4 se muestra el Método de Prueba Estándar de Líquidos Penetrantes de acuerdo a la Norma ASTM E-165-95, realizado a las muestras, finalizada la operación de soldadura.



Fig. 4 Ensayos no destructivos.

E. Medición de dureza y resistencia

Para el ensayo de la dureza y la metalografía, se realizaron los siguientes pasos:

- Probetas seccionadas de dimensiones 12 x 30 x 70 mm.
- Desbaste de las probetas.
- Pulido de las probetas.
- Ataque con reactivo Nital 2%.



Fig. 5 Medición de dureza y resistencia: a) Probetas seccionadas, b) Desbaste de probetas, c) Pulido de probetas y d) probetas de dimensiones seccionadas de 70 x 30 x 12 mm.



Fig. 6 a) Máquina de tracción y b) Máquina de medición dureza Vickers-Innova Test.

F. Cálculos numéricos en el área afectada por el calor.

De acuerdo a la información recolectada en campo se procedió a realizar los cálculos numéricos y elaborar gráficas dentro de la zona como objeto de estudio.

- Cálculos del aporte calórico neto.
- Cálculo de la temperatura de precalentamiento mínimo de acuerdo al método Seferian.
- Cálculo de la velocidad de enfriamiento en el centro del área afectada por el calor.
- Cálculo de la distribución de la temperatura máxima dentro del área afectada por el calor.
- Cálculo del ancho del área afectada por el calor.
- Cálculo del tiempo de solidificación del área afectada por el calor.
- Predicción de la dureza máxima en el área afectada por el calor.
- Análisis gráfico con los resultados obtenidos.

III. RESULTADOS

A. Temperatura óptima

TABLA IV
RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO EN LAS PROBETAS

Ítem	Probeta	Temperatura Precalentamiento (°C)	Velocidad enfriamiento (°C/s)	Dureza Máxima (HV)	Esfuerzo Máximo (Mpa)
1	PT-01	100	-39.692	241.0	424.15
2	PT-02	120	-34.631	209.0	496.37
3	PT-03	145	-28.935	232.0	515.82
4	PT-04	160	-25.838	250.0	500.36

En la TABLA IV, se muestran los resultados obtenidos de los cálculos y ensayos para cada probeta seleccionada según la temperatura de ensayo.

Las selecciones de la probeta de cada grupo de temperatura responden porque tiene mejor presentación, soldadura y acabado de mejor apariencia y el análisis metalográfico mostró mejor estructura metalúrgica.

B. Evaluación de propiedades mecánicas

B.1. Ensayos de tracción

TABLA V
RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DE LAS PROBETAS SOLDADAS

Muestra	Espesor (mm)	T (°C)	Ancho probeta (mm)	Fuerza máxima (kg)	Esfuerzo máximo kg/mm ² (Mpa)	Obs.
PT-1	12.03	100	19.38	10120.19	43.25 (424.15)	Fractura en el material base
PT-2	12.04	120	19.43	11840.94	50.61 (496.37)	
PT-3	12.24	145	19.09	11957.19	52.5 (515.82)	
PT-4	11.95	160	19.42	11955.94	51.08 (500.36)	

En la TABLA V, se muestran los resultados de los ensayos de tracción para cada probeta soldada.

B.2. Ensayos de dureza

Se realizaron en la máquina Vicker, a las probetas, y las que mostraron mejor dureza estable fue seleccionada, fue otro criterio tomado.

PROBETA PT-1 (Tp=100°C)			PROBETA PT-2 (Tp=120°C)		
PUNTO A	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO A	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	161	METAL BASE		159	METAL BASE
PUNTO B	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO B	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	185.8	ZONA ZAC GRANDE		154	ZONA ZAC GRANDE
PUNTO C	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO C	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	186.9	ZONA ZAC GRANDE CON MARTENSITA		177	ZONA DE SOLDADURA - FUSION
PUNTO D	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO D	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	215	METAL DE SOLDADURA PEGADA A LA LINEA DE FUSION		209	LINEA DE FUSION
PUNTO E	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO E	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	241	LINEA CENTRAL DE LA SOLDADURA			

Fig. 7 Perfiles de dureza en probeta a) PT-1 (Tp=100°C) b) PT-2 (Tp=120°C)

PROBETA PT-3 (Tp=145°C)			PROBETA PT-4 (Tp=160°C)		
PUNTO A	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO A	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	147	METAL BASE		164	METAL BASE
PUNTO B	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO B	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	182	ZONA ZAC GRANO MEDIO		165	ZONA ZAC GRANO GRUESO
PUNTO C	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO C	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	232	METAL DE APOORTE FUNDIDO		215	ZONA DE FUSION PEGADO A LA LINEA DE FUSION
PUNTO D	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO D	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
	177	LINEA DE FUSION		250	ZONA DE FUSION EN FERRITA ACICULAR
PUNTO E	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS	PUNTO E	DUREZA (HV 0.5)	COMENTARIOS
				177	LINEA DE FUSION

Fig. 8 Perfiles de dureza en probeta a) PT-3 (Tp=145°C) b) PT-4 (Tp=160°C).

En la Fig. 7 y 8, se muestran los perfiles de dureza para cada probeta y para las distintas temperaturas.

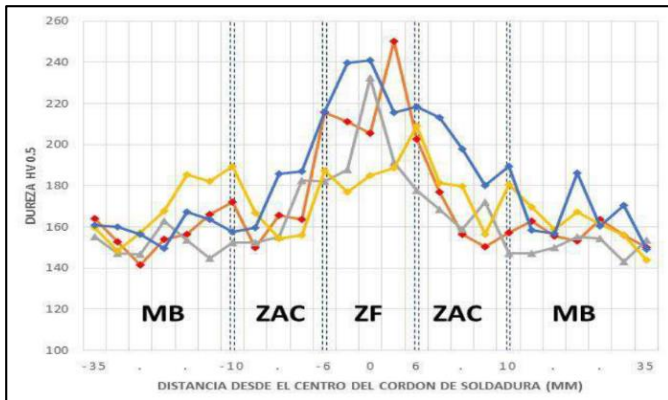


Fig. 9 Dureza Vickers de las probetas en todas las zonas.

Finalmente, en la Fig. 9, se muestra la distribución de puntos de cada probeta en todas las zonas.

C. Efecto del precalentamiento

TABLA VI
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO Y ANCHO DE ÁREA AFECTADA POR EL CALOR

Ítem	Probeta	T. Precal. (°C)	Veloc. Enf. (°C/s)	Ancho ZAC (mm)
1	PT-01	100	-39.692	3.33
2	PT-02	120	-34.631	3.49
3	PT-03	145	-28.935	3.70
4	PT-04	160	-25.838	3.85

La TABLA VI, muestra la velocidad de enfriamiento y el ancho de área afectada por el calor para cada probeta y Temperatura de precalentamiento.

D. Resultados de la microestructura

D.1. Tiempo de solidificación

La Fig. 10 representa la relación existente entre la temperatura de precalentamiento y el tiempo de solidificación y la Fig. 11, el tiempo de solidificación con la velocidad de enfriamiento.

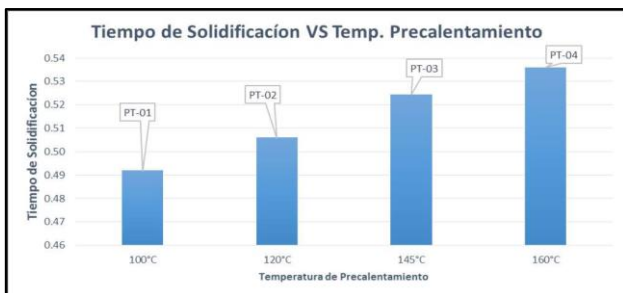


Fig. 10 Relación temperatura de precalentamiento vs tiempo de solidificación.

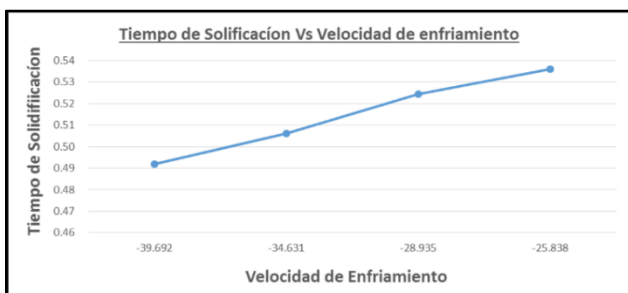


Fig. 11 Relación tiempo de solidificación vs velocidad de enfriamiento.

D.2. Análisis metalográfico

Así también, se realizó el análisis metalográfico para cada probeta cuyo resultado se muestra a continuación.

PROBETA	RESULTADOS DE ANÁLISIS METALOGRAFICO			PROBETA	RESULTADOS DE ANÁLISIS METALOGRAFICO		
	REFERENCIA	FOTOGRAFIA	COMENTARIOS		REFERENCIA	FOTOGRAFIA	COMENTARIOS
a	ZONA METAL BASE		MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)	b	ZONA METAL BASE		MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)
	ZONA ZAC		MEZCLA DE MARTENSITA ACICULAR Y MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)		ZONA ZAC		MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)
	ZONA DE METAL DE SOLDADURA		FERRITA ACICULAR (AUMENTO 200X)		ZONA DE METAL DE SOLDADURA		FERRITA ACICULAR Y FERRITA (AUMENTO 200X)

Fig. 12 Metalografía de probeta a) PT-1 (T=100°C) b) PT-2 (T=120°C)

PROBETA	RESULTADOS DE ANÁLISIS METALOGRAFICO			PROBETA	RESULTADOS DE ANÁLISIS METALOGRAFICO		
	REFERENCIA	FOTOGRAFIA	COMENTARIOS		REFERENCIA	FOTOGRAFIA	COMENTARIOS
a	ZONA METAL BASE		MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)	b	ZONA METAL BASE		MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)
	ZONA ZAC		MEZCLA DE ACICULAR DE ACICULAR Y MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)		ZONA ZAC		MEZCLA DE ACICULAR DE ACICULAR Y MARTENSITA REVENIDA (AUMENTO 200X)
	ZONA DE METAL DE SOLDADURA		FERRITA ACICULAR (AUMENTO 200X)		ZONA DE METAL DE SOLDADURA		FERRITA ACICULAR Y FERRITA (AUMENTO 200X)

Fig. 13 Metalografía de probeta a) PT-3 (T=145°C) b) PT-4 (T=160°C).

La Fig. 12 y 13 muestran el resultado del análisis metalográfico para cada probeta sometida a distinta temperatura de precalentamiento.

IV. DISCUSIÓN

1. A fin de determinar la temperatura óptima que garantice una buena soldabilidad y ausencia de fisuraciones en frío, muchas investigaciones consideran a la dureza como un factor importante para determinar el riesgo de fisuraciones por endurecimiento del área afectada por el calor, concluyendo que durezas menores a 280HV no presentarán riesgos de fisuraciones en frío y no habría necesidad de un tratamiento post-soldadura. Además, según el carbono equivalente (0.44%-0.55%), se recomienda rangos de temperatura de precalentamiento entre 100°C a 200°C para los aceros al carbono [7]. En la presente investigación se obtuvo un carbono equivalente de 0.53%, temperatura óptima de T=145°C, un esfuerzo de 515.82 Mpa y una dureza máxima de 232 HV con una disminución de la velocidad de enfriamiento. Además, habiendo analizado cuatro probetas por cada nivel de temperatura, se determinó que las durezas en el área afectada por el calor fueron menores a 280HV.

2. En un trabajo similar para evaluar el esfuerzo y la dureza por efecto del precalentamiento, [9] obtuvo como resultado un esfuerzo máximo de 664.012 Mpa, en una probeta con precalentamiento a 200°C, en comparación con el material de juntas soldadas con temperaturas mayores a 200°C. Tal es así que el autor infiere que, a medida que se va aumentando la temperatura de precalentamiento, se disminuye la dureza, pero mejora el esfuerzo del material. En cambio, nuestro esfuerzo máximo fue de 515.82 Mpa a una T=145°C, es decir que están relacionados a un cambio en escala microestructural, producto del precalentamiento, velocidad de enfriamiento; e inversamente proporcional a la dureza.

3. En otros estudios para analizar el efecto del precalentamiento sobre el ancho del área afectada por el calor, [7] afirma que “Al aumentar el aporte del calor de la soldadura, se incrementa igualmente el ancho del área afectada por el calor”. En nuestra investigación se determinó que el ancho del área afectada por el calor crece de manera lenta a medida que recibe una mayor entrada de calor, ya que en la probeta a T=100°C el ancho fue de 3.33 mm y para T=160°C, 3.85mm.

4. En investigaciones orientadas a analizar la influencia del precalentamiento a la microestructura en el área afectada por el calor, [10] afirma que la caracterización de las microestructuras fueron totalmente homogéneas en cada una de sus zonas de mapeo, lo cual indica que el precalentamiento no tuvo influencia significativa en ellas, quedando de la siguiente forma: metal base, estructura martensítica; zona afectada por el calor, estructura martensita, ferrita y vainita; mientras que en el metal de soldadura se evidenció una estructura de columna típica de ferrita acicular y perlita. En la presente investigación los efectos del precalentamiento en las cuatro probetas soldadas mostraron cambios en su microestructura. En el metal base, se observó la presencia de una microestructura martensita revenida con mayor definición. En la zona afectada por el calor, las probetas PT-1, PT-3 y PT-4, muestran la presencia de martensita revenida y agujas de austenita, mientras que en la probeta PT-2 se observa la formación de martensita revenida. En la zona de metal de soldadura (MS), en las cuatro probetas, se observa una microestructura de ferrita acicular y perlita.

V. CONCLUSIONES

1. La temperatura de precalentamiento óptima es de 145°C, debido a que garantiza una buena soldabilidad en el proceso de soldadura en planchas ASTM A36 con espesores de 12 mm, a la vez que no presentará riesgos de fisuración en frío, destacando la importancia sobre el efecto de precalentar las juntas soldadas para evitar una velocidad de enfriamiento alta en el cordón de soldadura así como mayores niveles de endurecimiento en el área afectada por el calor, siendo innecesario realizar un tratamiento post-soldadura.

2. Los esfuerzos y durezas máximas en cada una de las probetas: PT1 (424.15 MPa, 241 HV); PT2 (496.37 MPa, 209 HV); PT3 (515.82 MPa, 232 HV); PT4 (500.36 MPa, 250 HV), producidos por el efecto del precalentamiento, son inversamente proporcionales.

3. La temperatura de precalentamiento, velocidad de enfriamiento y el ancho del área afectada por el calor en cada una de las probetas: PT1 (100°C, -39.692 °C/s, 3.33 mm); PT2 (120°C, -34.631 °C/s, 3.49 mm); PT3 (145°C, -28.935 °C/s, 3.70 mm); PT4 (160°C, -25.838 °C/s, 3.85 mm); permitió concluir que si el precalentamiento es menor, ocasionará una velocidad de enfriamiento mayor y que el ancho del área afectada por el calor sea menor; mientras que si el precalentamiento es mayor, la velocidad de enfriamiento será menor, y el ancho de área afectada mayor.

4. La influencia del precalentamiento sobre la microestructura es indispensable para reducir la cantidad de martensita mediante un enfriamiento lento para no provocar niveles de endurecimiento en el área afectada por el calor con el fin de no generar riesgos de fisuración en frío.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Santa, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, a la Empresa Metal Paz Estructuras E.I.R.L., por prestar sus instalaciones de Planta de Fabricación, a la Empresa Ademinsac por apoyar con ensayos en su Laboratorio de Ensayos de Tracción, así también, a la Universidad Nacional de Trujillo por facilitar el acceso a su Laboratorio de Metalurgia.

VII. REFERENCIAS

- [1] R. González, y F. Carrillo, “Análisis de la metalurgia y mecánica de la fractura en la ZAC en un proceso por arco sumergido”, *Revista de Metalurgia*, vol.35, no. 3, pp. 155-165, 1999.
- [2] J. Unfried, E. Torres, J. Giraldo, U. Bastidas, “Influencia del estado de consumibles y del precalentamiento en la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno en la soldadura de un acero para blindaje”, *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. vol. 27, no. 2, pp. 114-123, 2007.
- [3] R. W. Hinton, R. K. Wiswesser, “Estimating welding preheat requirements for unknown grades of carbon and low-alloy steels”, *Welding journal*, vol. 87, no. 11, pp. 273-76, 2008.
- [4] B. K. Srivastava, S.P. Tewari, J. Prakash, “A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on mechanical behavior of ferrous metals”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 625-631, 2010.
- [5] Gómez, F. (2016). *Influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y microestructurales finales de la zona afectada por el calor (ZAC) en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [6] M. Charkhi, M., D. Akbari, “Experimental and numerical investigation of the effects of the pre-heating in the modification of residual stresses in the repair welding process”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 171, pp. 79-91, 2019.
- [7] Fosca, C. (2003). *Introducción a la metalurgia de la soldadura*. Lima, Perú: Editorial Grams.
- [8] Soldexa (2012). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos*, Lima, Perú, Séptima edición.
- [9] Gorrochotegui, A. (2011). *Efecto de la temperatura de precalentamiento sobre la formación de grietas en el cordón de soldadura y sobre la microestructura en juntas soldadas de acero al molibdeno AISI 4140, utilizando el proceso de GMAW* (Tesis de grado). Universidad de Carabobo, Nguanagua, Colombia.
- [10] Monsivais, M. (2012). *Estudio microestructural de la zona afectada por el calor en los aceros HSLA soldados por el proceso GMAW en los pisos de la caja del camión de minería* (Tesis de Post-Grado). Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Villa Hermosa, México.