

Research Article

Experimental Evaluation to Characterize Welded A36 Steel Joints Using the FCAW Process

Evaluación Experimental Para Caracterizar Juntas De Acero A36 Soldadas Mediante El Proceso FCAW

C Ramos Hernández*, C Serrano Aguiar, A Noguera Cundar

Carrera Ingeniería Mecánica. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. EC 060155.

V CONGRESO
INTERNACIONAL DE
INGENIERÍA DE MECÁNICA

Corresponding Author: C
Ramos Hernández; email:
cris-
tiana.ramos@epoch.edu.ec

Published: 24 July 2024

Production and Hosting by
Knowledge E

© C Ramos Hernández
et al. This article is distributed
under the terms of the
[Creative Commons](#)
[Attribution License](#), which
permits unrestricted use and
redistribution provided that
the original author and
source are credited.

Abstract

The objective of this investigation was the evaluation of mechanical properties and metallographic characterization of welded joints of ASTM A-36 steel through the FCAW process with cored wire E71T11 of 1.2 mm in diameter; applying the AWS D1.1 2020 welding code. Variations were made in voltage, current intensity, and feed speed. The welding process was carried out using Lincoln Arc R3S equipment. The joints were welded in 3 thickness groups, and each group had four variations in the weld seam. In addition, the welding processes have a WPS backup. Once the weld beads were made, ultrasound tests and visual inspection were applied to rule out discontinuities, surface imperfections, and incomplete fusion. In the corresponding test tubes for micrographs, it was possible to identify the filler material, base material, and the zone affected by heat, the same in which the microstructure was identified and then compared with the base material. A hardness profile was determined in the base material, ZAC, and the filler material. It is concluded that after applying the non-destructive and destructive tests, better conditions were achieved with the parameters established in the WPS of the following coupons FCAW-230-6, FCAW-225-8, FCAW-300-8, and FCAW-225- 10, evidencing that its mechanical and metallographic properties did not change significantly. It is recommended that the specimens obtained from the weld coupons have a cooled cut to avoid variations in the mechanical and metallographic properties.

Keywords: FCAW process, ASTM A-36 steel, ASW D1.1 Standard, ZAC, mechanical properties, metallographic analysis.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo la evaluación de propiedades mecánicas y caracterización metalográfica de juntas soldadas de acero de ASTM A-36 mediante el proceso FCAW con alambre tubular E71T11 de 1.2 mm de diámetro; aplicando el código de soldadura AWS D1.1 2020. Se realizó variaciones en el voltaje, intensidad de corriente y velocidad de alimentación. El proceso de soldadura se lo realizó con un equipo Lincoln Arc R3S. Las juntas fueron soldadas en 3 grupos de espesores, cada grupo cuenta con 4 variaciones en el cordón de soldadura. Además, los procesos de soldadura cuentan con un WPS de respaldo. Una vez realizados los cordones de soldadura se aplicaron ensayos de ultrasonido e inspección visual para descartar discontinuidades, imperfecciones superficiales y fusión incompleta. En las probetas correspondientes para micrografías se logró identificar el material de aporte, material base y la zona afectada por el calor, misma en la que se identificó la microestructura y luego fue comparada con el material base.

 OPEN ACCESS



Se determinó un perfil de dureza en el material base, ZAC y el material de aporte. Se concluye que luego de aplicar los ensayos no destructivos y destructivos, se consiguieron mejores condiciones con los parámetros establecidos en los WPS de los siguientes cupones FCAW-230-6, FCAW-225-8, FCAW-300-8 y FCAW-225-10, evidenciando que sus propiedades mecánicas y metalográficas no cambian de manera significativa. Se recomienda, que las probetas obtenidas de los cupones de soldadura tengan un corte refrigerado para evitar variaciones en las propiedades mecánicas y metalográficas.

Palabras Clave: *Proceso FCAW (Flux Core Arc Welding), Acero ASTM A-36, Norma AWS D1.1, ZAC, Propiedades mecánicas, Análisis metalográfico.*

1. Introducción

El acero ASTM A-36 es utilizado en la industria ecuatoriana para la construcción de estructuras metálicas y diferentes elementos de tipo estructural, por lo tanto, es imprescindible que las juntas soldadas garanticen las propiedades mecánicas y que cumplan las exigencias del trabajo de aplicación.

Para soldar un material metálico se debe tomar en cuenta que existen diversos procesos, por lo cual es importante determinar cuál es el más adecuado. En este trabajo se utilizó el proceso FCAW-S (Self-Shielded Flux Cored Arc Welding), caracterizado por el uso de un alambre tubular que genera una atmosfera autoprotectora por los componentes tipo fundentes presentes en el interior, este proceso es ideal para soldadura de campo [1]. Debido a que la soldadura juega un papel importante en la industria ecuatoriana es indispensable determinar los parámetros adecuados para generar soldaduras que cumplan con estándares [2].

En el presente estudio se pretende analizar las propiedades mecánicas y características microestructurales de placas de acero A36 al variar parámetros en el proceso de soldadura FCAW como voltaje, intensidad de corriente y velocidad de alimentación de alambre para diferentes espesores y como esto puede repercutir en el desempeño de las juntas, para posteriormente identificar las alteraciones a las que estaría sujeta la zona afectada por el calor y sus alrededores el acero ASTM A36.

2. Materiales y Métodos

2.1. Proceso FCAW

El proceso FCAW aprovecha el arco eléctrico entre el metal base y un alambre continuo de metal de aporte. Este tipo de soldadura emplea un alambre tubular que en su interior contiene fundente, el mismo que ayuda a que se forme una capa protectora en el



cordón de soldadura. Existen dos tipos de alambre tubular, el que contiene en su interior un fundente y el que necesita de una protección externa gaseosa [3, 4].

Para elaboración de los cupones de soldadura se utilizó la norma AWS D1.1 2020, en espesores de 6, 8 y 10 mm con un bisel tipo V con soldadura a tope. Los procedimientos de soldadura fueron evaluados y calificados en el laboratorio de soldadura de la Escuela Superior Politécnica Nacional.

2.2. Material Base

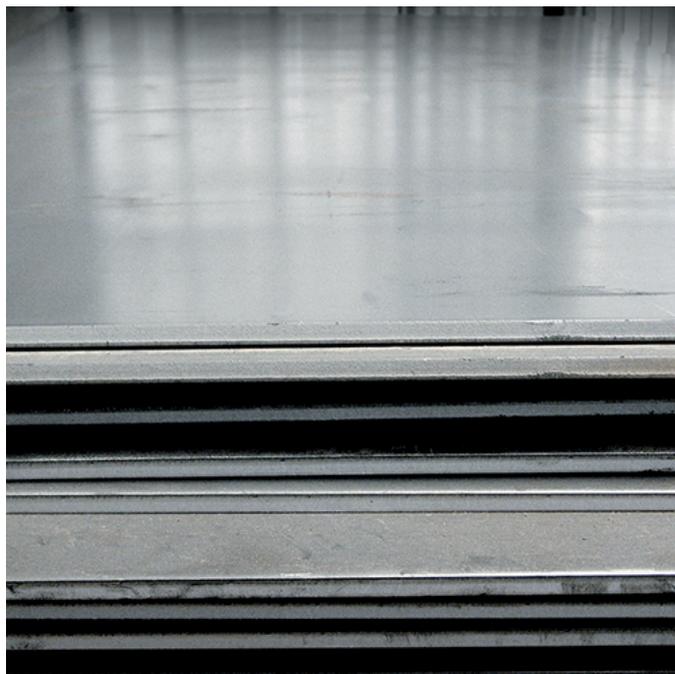


Figura 1

Plancha de acero ASTM A-36 DIPAC.

El material base es acero ASTM A-36, mismo que se lo adquirió en piezas de (40x18) cm, en espesores de 6 mm, 8 mm y 10 mm dando un total de 24 piezas, 8 para cada espesor, es importante destacar que las placas fueron de una misma plancha, dicho material se adquirió en DIPAC. S.A.

2.3. Material de aporte

El proceso FCAW se caracteriza por tener un alambre tubular, en cuyo interior se encuentra una mezcla de fundentes, mismo que crean una atmósfera autoprotectora sin necesidad de aportar un gas. Se utilizó un alambre tubular E71T11 de 1,2 mm de diámetro.

Los porcentajes de fundente varían de un 15 a 35 % en el peso del material aportado [5].



Figura 2

Alambre E71T11 diámetro 1,2 mm.

Tabla 1

Composición química del alambre de aporte.

C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	S	P
= 0.2 %	< 1.75 %	< 0.6 %	< 0.35 %	< 0.5 %	< 0.2 %	< 0.3 %	< 0.08 %	< 1.8 %	< 0.03 %	< 0.03 %

2.4. Preparación de cupones

Los biseles de los cupones fueron preparados con una fresadora para tener precisión en las dimensiones de las ranuras.

2.5. Factores que influyen en el proceso FCAW

2.5.1. Forma y dimensión de las juntas

Se va a realizar una junta en V, debido a que es la junta más usada en la industria, además permite visualizar la penetración en la ZAC. Las dimensiones se evidencian en la Figura 3, cabe destacar que para este tipo de juntas la dimensión del talón debe ser de 3 mm.

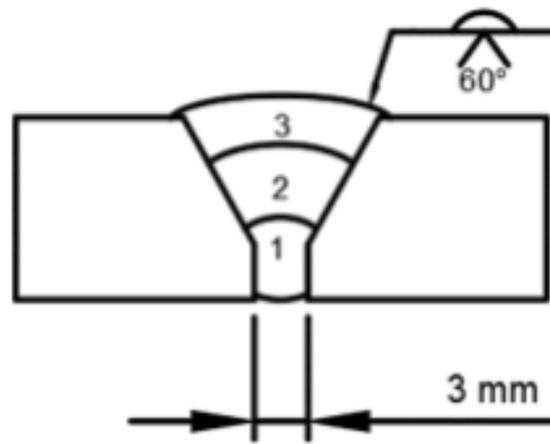


Figura 3

Junta para procedimiento.

2.5.2. Amperaje

La corriente es proporcional a la velocidad de alimentación del alambre [5] Un valor alto hace que el material de aporte aumente e igual la penetración. La norma AWS D1.1 [6], establece una variación del 10%.

2.5.3. Voltaje

El voltaje tiene una relación con la longitud de arco, dichos valores pueden afectar el aspecto, la integridad y las propiedades de soldadura [5]. La norma AWS D1.1, permite una variación del 7%.

2.6. Proceso para soldar

El proceso de soldadura se lo hizo un equipo multiproceso marca Lincoln R3S-400; en la Figura 4, se muestra un cupón antes de realizar los procesos de soldadura, para

mantener una separación uniforme en las placas se utilizaron puentes de refuerzo y platinas en los extremos para evitar que al depositar el material de aporte se agujereee [7].



Figura 4

Preparación de cupones a soldar.

2.7. Parámetro para construcción de WPS

Luego de soldar se obtuvieron los siguientes rangos de amperaje, voltaje, velocidad de alimentación y tiempos de ejecución para cada uno de los espesores.

Tabla 2

Parámetros para placas de 6 mm proceso FCAW.

Cupón	Amperaje A	Voltaje V	IPM	Tiempo
FCAW-6-125	124 - 142	18,4 - 18,7	125	0:11:41
FCAW-6-175	131 - 145	19,7 - 20,1	175	0:08:13
FCAW-6-225	158 - 190	20,6 – 21,3	225	0:07:27
FCAW-6-300	174 - 180	22,4 – 22,6	300	0:05:50

Tabla 3

Parametros para placas de 8 mm proceso FCAW.

Cupón	Amperaje A	Voltaje V	IPM	Tiempo
FCAW-8-150	124-142	18.4-18.8	150	0:09:28
FCAW-8-175	131-142	19.7-20.1	175	0:08:22
FCAW-8-225	158-190	20.6-21.3	225	0:07:53
FCAW-8-300	174-181	22.3-22.6	300	0:06:51

Tabla 4

Parametros para placas de 10 mm proceso FCAW.

Cupón	Amperaje A	Voltaje V	IPM	Tiempo
FCAW-10-225	154 – 173	21 – 21,7	225	0:09:28
FCAW-10-275	172 - 196	22 – 22,5	275	0:08:22
FCAW-10-325	187 -208	22,6 - 23,1	325	0:07:53
FCAW-10-375	192 – 241	22,7 23-	375	0:06:51

2.8. Diemeniones de las probetas

Para la obtención de las probetas, se observa en la Figura 5, siguiendo la disposición En la Norma AWS D1.1 2020.

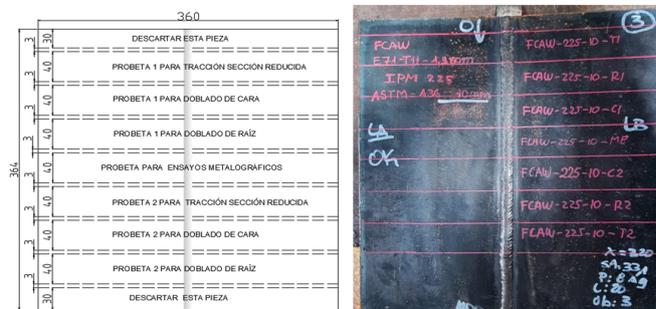


Figura 5

Disposcion de probetas cupon soldado.

2.9. Proceso para obtención de las probetas

Debido al estudio que se va a realizó, es necesario que las probetas no sean sometidas a aumentos de calor, para no afectar las propiedades mecánicas y estructurales en los cupones, para lo cual fue necesario realizar un maquinado de los biseles en una fresadora de cabezal inclinado, y una vez soldados los cupones se obtienen las probetas por corte en frío.

2.10. Medir el valor de Dureza

Consiste en estimar la dureza mediante un indentador esférico de 2.5 mm, con una carga de 187.5 kg sobre la superficie del material a estudiar, posteriormente se mide la

MARCO METODOLÓGICO



Figura 6

Corte con sierra refrigerada.

huella marcada por el indentador con ayuda de un microscopio que cuenta con escalas micrométricas [8]. Para las probetas se hace un estudio en el MB, ZAC y MA.

2.10.1. Dureza Brinell HBW

Esta dureza está normalizada por ASTM E10 “Método de prueba estándar para dureza Brinell de materiales metálicos”.

2.11. Proceso de preparación para metalografía

Se emplea un microscopio metalográfico con diferentes lentes objetivos y sustancias que permiten revelar las zonas analizadas, mismas en la que se puede determinar: tamaño de grano y diferentes fases presentes. [9]

2.12. Proceso de preparación para metalografía

Para tener una mejor apreciación de las fases presentes en las muestras, estas deben tener una superficie libre de impurezas para lo cual se realiza un desbaste con papel lija desde un grano grueso hasta un grano fino y posteriormente un pulido de la muestra. ASTM E-3 [10].

2.13. Tamaño de grano

El tamaño de grano de las muestras en las zonas a ser analizadas se determina mediante la aplicación del Método de Interceptos aplicando la norma ASTM E112 [11].



Figura 7

Pulido de las muestras.

Tomando en cuenta los valores G de tamaño de grano de la tabla

Tabla 5

Tamaño de grano ASTM.

VALORES	TIPO DE GRANO
$G < 3$	Grueso
$4 < G < 6$	Medio
$7 < G < 9$	Fino
$G > 9$	Ultrafino

3. Resultados y discusión

3.1. Espectrometría material base

Para determinar y tener la certeza que el material base tiene una composición de un acero ASTM A-36 se realizó espectrometrías de una muestra de cada plancha utilizada, teniendo los siguientes resultados:

Se aprecia que los valores obtenidos corresponden a un acero ASTM A-36, sin embargo, en las placas de 8 mm y 10 mm tienen una mayor concentración de manganeso, mismo que se encuentran dentro de los valores aceptados.

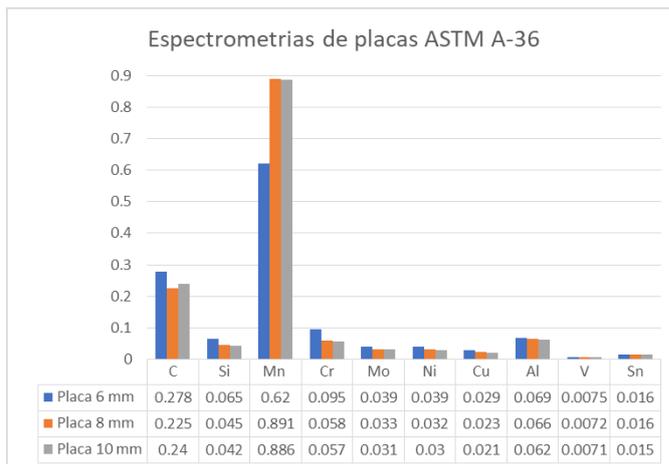


Figura 8

Comparativa de espectrometrías.

3.2. Ensayos no destructivos END

3.2.1. Inspeccion visual

En la norma AWS D1.1 2020 se menciona que:

No debe existir una socavación mayor a 1 mm.

la máxima concavidad de raíz debe ser de 2 mm

Este ensayo fue evaluado bajo los criterios de aceptación del código de soldadura AWS D1.1 2020, dando como resultado que todos los cupones fueron aceptados.

3.2.2. Ensayos de ultrasonido UT

Tabla 6

Resultados ensayos UT.

DENOMINACIÓN	IMAGEN	Observación	CALIFICACIÓN
FCAW-6-125		<p>Ubicación: Lado A 240 mm</p> <p>Discontinuidad: Clase A</p> <p>Profundidad: 3 a 4 mm</p> <p>Longitud: 40 mm</p>	Rechazada
FCAW-6-175		Ninguna	Aceptada
FCAW-6-200		Ninguna	Aceptada
FCAW-6-230		Ninguna	Aceptada

Tabla 6

Continued.

DENOMINACIÓN	IMAGEN	Observación	CALIFICACIÓN
FCAW-8-150		<p>Ubicación: Lado B 0 mm</p> <p>Discontinuidad: Clase A</p> <p>Profundidad: 6 a 7 mm</p> <p>Longitud: 80 mm</p>	Rechazada
FCAW-8-175		Ninguna	Aceptada
FCAW-8-225		Ninguna	Aceptada
FCAW-8-300		Ninguna	Aceptada

Tabla 6

Continued.

DENOMINACIÓN	IMAGEN	Observación	CALIFICACIÓN
FCAW-10-225		Ninguna	Aceptada
FCAW-10-275		Ninguna	Aceptada
FCAW-10-325		Ninguna	Aceptada
FCAW-10-375		Ubicación: Lado A 205 mm Discontinuidad: Clase A Profundidad: 6 a 8 mm Longitud: 20 mm	Rechazada

3.3. Ensayos destructivos ED

3.3.1. Tracción en sección reducida

Este ensayo se evidencia el comportamiento de la junta soldada frente a esfuerzos de tracción constante, las dimensiones de las probetas se las tiene en la Figura 9.

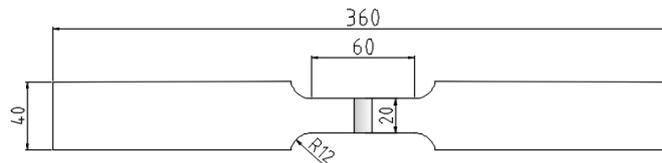


Figura 9

Dimensiones en mm para probeta para tracción en sección reducida.

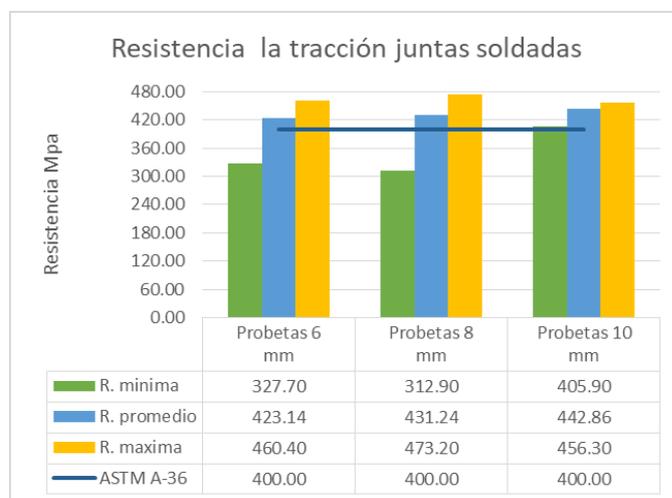


Figura 10

Espesores vs Resistencia.

Se presenta valores mínimos inferiores al admisible del material (400 MPa) base en las probetas de 6 mm y 8 mm, mientras que en las probetas de 10 mm se observan valores superiores al MB.

3.3.2. Doblado de cara y raíz

Este ensayo muestra la capacidad de ductilidad de la junta soldada, mismo que permite evidenciar la calidad de la misma.



Tabla 7

Resultados de ensayos doblado de cara y raíz.

CUPÓN	OBSERVACIÓN	CALIFICACIÓN
FCAW – 6 – 125 (C1-C2-R1-R2)	R2: Indicación mayor a 3 mm	Rechazada
FCAW – 6 – 175 (C1-C2-R1-R2)	Ninguna	Aceptada
FCAW – 6 – 200 (C1-C2-R1-R2)	Ninguna	Aceptada
FCAW – 6 – 230 (C1-C2-R1-R2)	Ninguna	Aceptada
FCAW – 8 – 150 (C1-C2-R1-R2)	C1: Fractura toatal R1-R2: Fractura total	Rechazada
FCAW – 8 – 175 (C1-C2-R1-R2)	C1-C2: Fractura total	Rechazada
FCAW – 8 – 225 (C1-C2-R1-R2)	R1: Indicación 2x1mm R2: Suma menor a 6 mm.	Rechazada
FCAW – 8 – 300 (C1-C2-R1-R2)	R1: Indicación de 1,6 mm	Aceptada
FCAW – 10 – 225 (C1-C2-R1-R2)	Ninguna	Aceptada
FCAW – 10 – 275 (C1-C2-R1-R2)	R1: Indicación mayor a 4 mm	Rechazada
FCAW – 10 – 325 (C1-C2-R1-R2)	C1: Fractura parcial	Rechazada
FCAW – 10 – 375 (C1-C2-R1-R2)	Fractura parcial en todas las probetas	Rechazada

Tabla 8

Dureza HBW placa 6 mm.

DENOMINACIÓN	MA				ZAC				MB			
	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom
FCAW-6-125	161,3	159,1	159,1	160	140,1	138,3	140,7	140	140,1	134,3	135,4	137
FCAW-6-175	167,3	168	169,6	168	147,6	144,4	141,9	145	140,7	134,3	137,7	138
FCAW-6-200	177,7	178,5	182,8	180	146,9	145,6	141,3	145	144,4	143,1	140,7	143
FCAW-6-230	168,8	176	168,8	171	145,	143,8	145,6	145	144,4	141,3	143,1	143

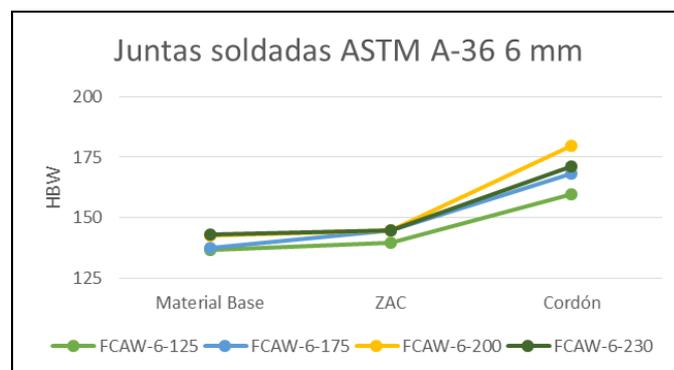


Figura 11

Perfil de dureza junta soldada 6 mm.



3.3.3. Dureza Brinell HBW

En la Figura 11, se puede observar la disposición de la dureza tendiendo a incrementar desde un valor mínimo de HB137 para la probeta FCAW-6-125 en el material base y un máximo de HB 180 en la probeta FCAW-6-200 en el metal de aporte.

Tabla 9

Dureza HBW placa 8 mm.

DENOMI- NACIÓN	MA				ZAC				MB			
	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom
FCAW-8-150	178,5	177,7	170,4	176	147,6	152,2	154,9	152	142,5	140,1	143,1	142
FCAW-8-175	224	172,8	165,7	187	151,5	154,9	154,2	154	144,4	143,1	141,9	143
FCAW-8-225	187,2	189,9	188,1	188	157,7	157	156,3	157	148,2	146,3	144,4	146
FCAW-8-300	192,7	184,5	189,9	189	162	159,8	169,6	164	151,5	150,2	150,8	151

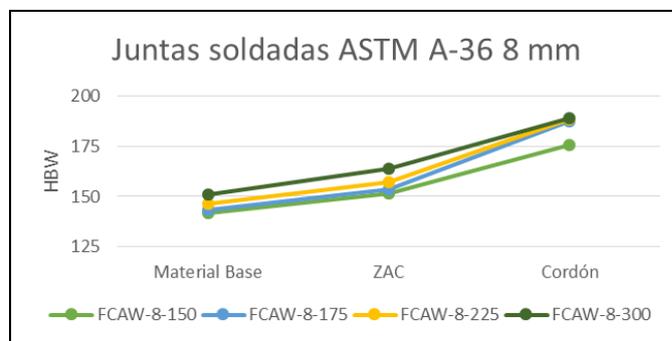


Figura 12

Perfil de dureza juntas soldadas 8 mm.

En la Figura 13, se observa la disposición de la dureza tendiendo a incrementar desde un valor mínimo de HB142 para la probeta FCAW-8-150 en el material base y un máximo de HB 151 en la probeta FCAW-8-300 en el metal de aporte.

Tabla 10

Dureza HBW placa 10 mm.

DENOMI- NACIÓN	MA				ZAC				MB			
	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom
FCAW-10-225	172,8	169,6	174,4	172	157,7	155,6	156,3	157	157	157	154,2	156
FCAW-10-275	182,8	186,3	178,5	183	161,3	156,3	154,9	157	158,4	157,7	154,9	157
FCAW-10-325	188,1	186,3	190,9	188	168,	163,5	171,2	168	154,9	158,4	159,1	157
FCAW-10-375	187,2	194,6	191,8	191	171,2	168	165	168	157,7	155,6	159,8	158

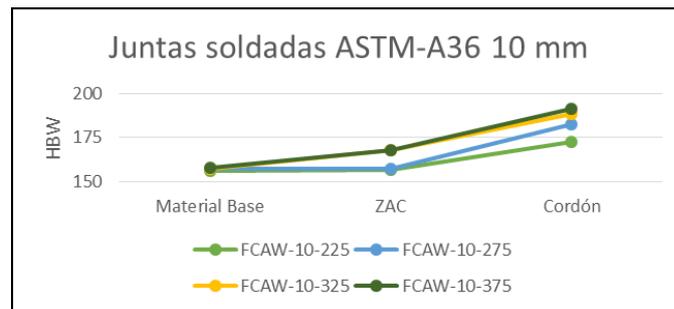


Figura 13

Perfil de Dureza juntas soldadas 10 mm.

En la Figura 14, se observa la disposición de la dureza tendiendo a incrementar desde un valor mínimo de HB 156 para la probeta FCAW-10-225 en el material base y un máximo de HB 191 en la probeta FCAW-10-375 en el metal de aporte.

3.4. Metalografías

Al hacer un macro ataque, en las zonas de las probetas destinadas para el análisis metalográfico se diferencian 3 zonas: Material de aporte (MA), Zona Afectada por el Calor (ZAC) y Metal Base (MB).

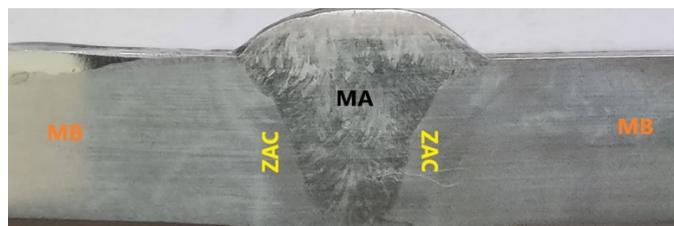


Figura 14

Disposición de zonas analizadas.

3.4.1. Medicion del material de aporte

En la Figura 16, se puede observar que existe en la ZAC (d) una tendencia a incrementar su medida con un valor mínimo en la probeta FCAW-6-175 y un valor máximo en la probeta FCAW-6-200, además el valor de la garganta (c) también se ve una tendencia de crecimiento con un valor máximo en la probeta FCAW-6-230 con una medida aproximada de 14,4 mm; de la misma manera la penetración (c) tiende a tener un valor máximo de 6,91 mm en la probeta FCAW-6-125.

Tabla 11

Medidas en el cordón de soldadura placas de 6 mm.

Denominación	Imagen	Refuerzo de cara (a mm)	Distancia entre Pies (b mm)	Altura de penetración (c mm)	Ancho material de aporte (d mm)	ZAC (e mm)
FCAW-125-6		1,594	13,729	6,912	2,868	2,402
FCAW-175-6		1,789	10,015	5,665	2,099	3,066
FCAW-200-6		2,129	11,965	4,806	3,237	3,311
FCAW-230-6		2,483	14,402	5,843	2,981	2,194

Se observa que en la ZAC (d) tiende a mantener un valor de 3,7 mm, además el valor de la garganta (c) ve una tendencia a decrecer con un valor máximo en la probeta FCAW-8-150 con una medida aproximada de 14,7 mm; de la misma manera la penetración (c) tiende a tener un máximo valor de 8,13 en la probeta FCAW-8-150.

Se observa que en la ZAC (d) tiende a mantener un valor aproximado de 4,2 mm, además el valor de la garganta (c) mantiene una medida aproximada de 9,4 mm; de la misma manera la penetración (c) tiene un máximo valor de 9.71 en la probeta FCAW-10-225.

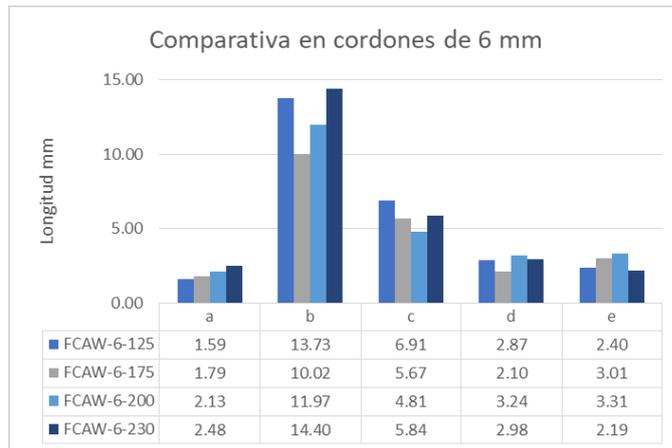


Figura 15

Comparativa en cordones de soldadura placas de 6 mm.

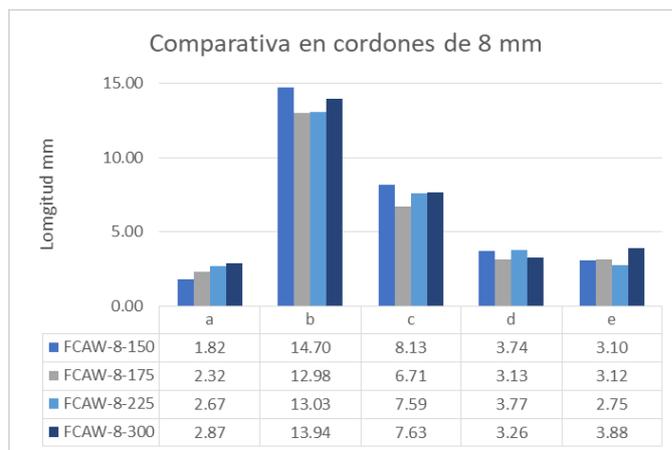


Figura 16

Comparativa en cordones de soldadura placas de 8 mm.

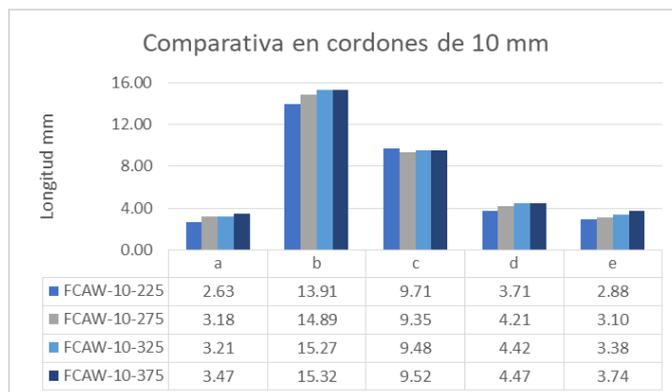


Figura 17

Comparativa en cordones de soldadura placas de 10 mm.

Tabla 12

Medidas en el cordón de soldadura placas de 8 mm.

Denominación	Imagen	Refuerzo de cara (a mm)	Distancia entre Pies (b mm)	Altura de penetración (c mm)	Ancho material de aporte (d mm)	ZAC (e mm)
FCAW-150-8		1,816	14,701	8,132	3,744	3,103
FCAW-175-8		2,316	12,982	6,706	3,132	3,118
FCAW-225-8		2,667	13,034	7,588	3,772	2,745
FCAW-300-8		2,873	13,944	7,634	3,256	3,884

3.4.2. Micrografías MB, ZAC y MA

Todas las zonas analizadas se empleó un ataque químico con Nital al 5% durante 10 s aproximadamente, las micrografías se obtuvieron con una ampliación de 10X, a continuación, se muestran las micrografías de los cupones que aprobaron los END y ED, además de las micrografías que presentan cambios significativos.

El MA presenta (1) Ferrita Widmanstätten generada a partir de los límites de grano, (2) Ferrita poligonal. Para la ZAC y MB se presenta perlita en una matriz ferrítica, la perlita (zonas oscuras) y ferrita (zonas blancas) con granos bien definidos, además en la ZAC se observa que la matriz tiene una orientación horizontal debido a la laminación en caliente y al compararlo con el MB el tamaño de grano es más refinado.

Tabla 13

Medidas en el cordón de soldadura placas de 10 mm.

Denominación	Imagen	Refuerzo de cara (a mm)	Distancia entre Pies (b mm)	Altura de penetración (c mm)	Ancho material de aporte (d mm)	ZAC (e mm)
FCAW-225-10		2,632	13,912	9,706	3,706	2,884
FCAW-275-10		3,182	14,892	9,353	4,213	3,097
FCAW-325-10		3,206	15,265	9,483	4,421	3,376
FCAW-375-10		3,473	15,321	9,519	4,465	3,742

En el MA presenta (1) Ferrita Widmanstätten en forma de placas y listones. Para la ZAC (b) y MB (c) se observa perlita (zonas oscuras) y ferrita (zonas blancas), además en la ZAC se observa que la matriz ferrítica perlítica tiene una orientación horizontal debido a la laminación en caliente y al comparar la ZAC respecto al MB el tamaño de grano es más fino en la ZAC.

En el MA (a), se muestra (1) Ferrita Windmastäten y (2) Bainita Superior. La ZAC (b), presenta Ferrita Acicular, Ferrita Alotriomórfica además de perlita en los límites de grano. En el MB (c), se observa perlita en una matriz ferrítica con una disposición horizontal debido a la laminación en caliente.

En el MA (a), se muestra (1) Ferrita Windmastäten en forma de listones. La ZAC (b), presenta Ferrita Acicular, Ferrita Alotriomórfica y perlita en los límites de grano. En el

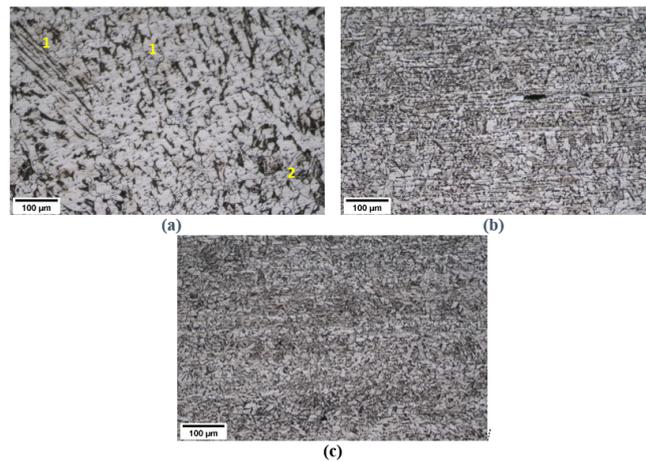


Figura 18

Metalografía FCAW-125-6-Me. Amp 10X. (a) MA, (b) ZAC y (c) MB

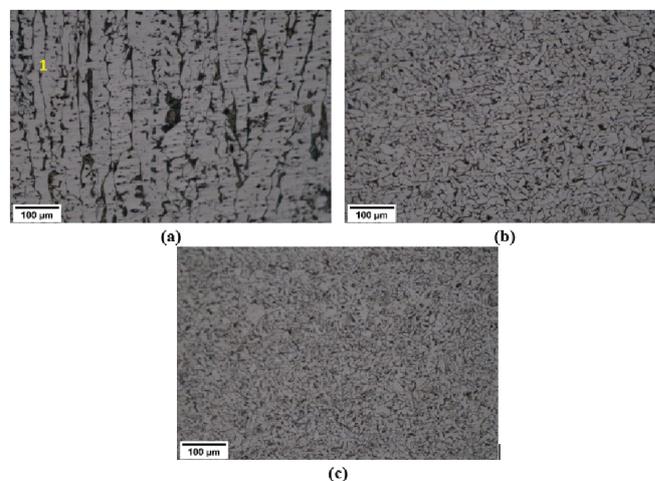


Figura 19

Metalografía FCAW-230-6-Me. Amp 10X. (a) MA, (b) ZAC y (c) MB.

MB (c), se observa perlita en una matriz ferrítica con una disposición horizontal debido a la laminación en caliente.

En el MA (a), se muestra (1) Ferrita Windmastäten y (2) placas de Martensita. La ZAC (b), presenta Ferrita Acicular, Ferrita Alotriomórfica y perlita en los límites de grano. En el MB (c), se observa perlita en una matriz ferrítica con una disposición horizontal debido a la laminación en caliente.

En el MA (a), se muestra (1) Ferrita Windmastäten y (2) Martensita en forma de placas. La ZAC (b), presenta Ferrita Acicular, Ferrita Alotriomórfica y perlita en los límites de grano. En el MB (c), se observa perlita en una matriz ferrítica con una disposición horizontal debido a la laminación en caliente.

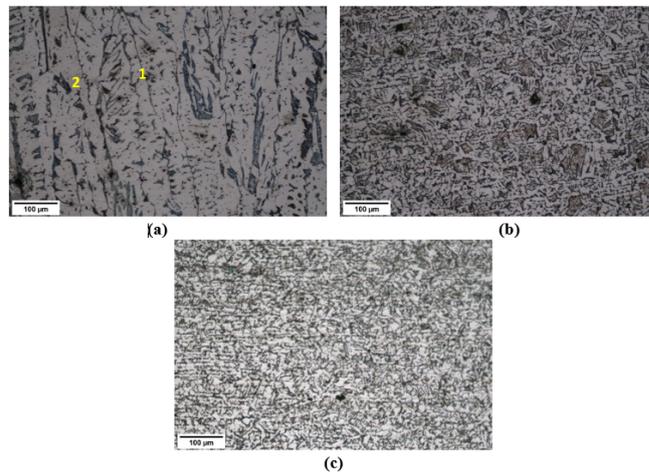


Figura 20

Metalografía FCAW-225-8-Me. Amp 10X. (a) MA, (b) ZAC y (c) MB.

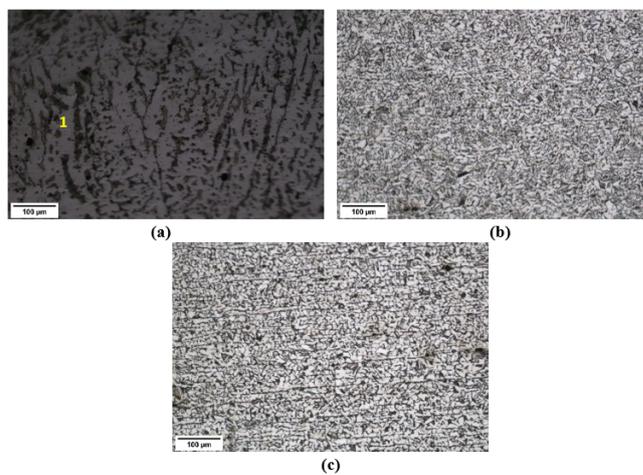


Figura 21

Metalografía FCAW-300-8-Me. Amp 10X. (a) MA, (b) ZAC y (c) MB.

3.4.3. Tamaño de grano ASTM ZAC y MB

Para determinar el tamaño de grano ASTM, las zonas analizadas fueron atacadas con Nital al 5% durante 10 s aproximadamente; luego se toma las micrografías con una ampliación de 40x en la ZAC y en el MB, a continuación, se muestran los tamaños de grano de los cupones aprobados.

La ZAC muestra un tamaño de grano más pequeño frente al material base (MB), teniendo un valor del grano ASTM 8 y en el material base un tamaño de grano ASTM 9, correspondientes a un grano fino.

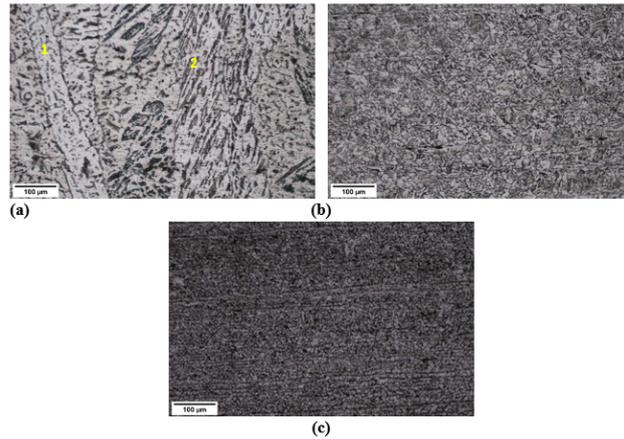


Figura 22

Metalografía FCAW-225-10.-Me. Amp:10X. (a) MA, (b) ZAC y (c) MB.

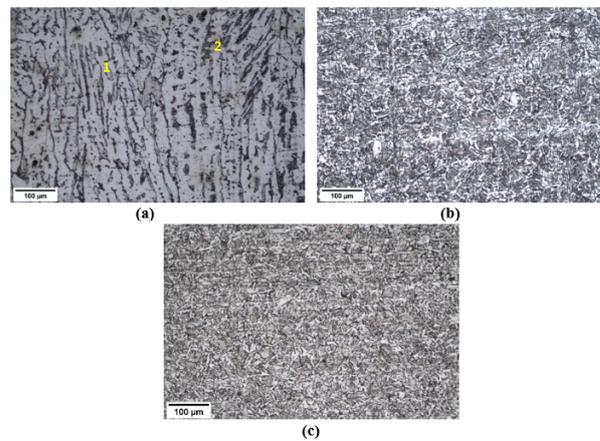


Figura 23

Metalografía FCAW-375-10.-Me. Amp:10X. (a) MA, (b) ZAC y (c) MB.

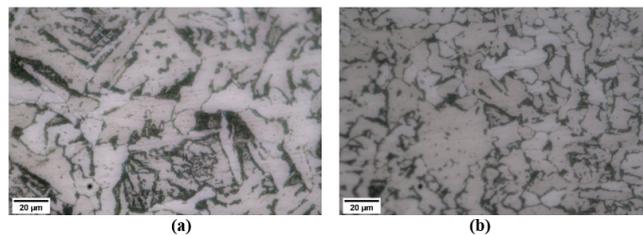
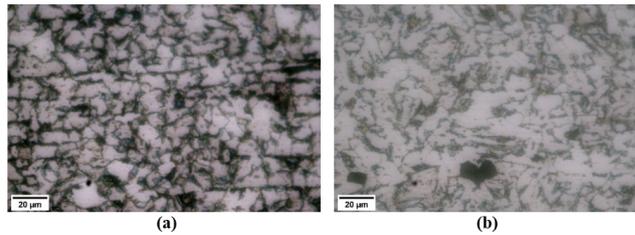


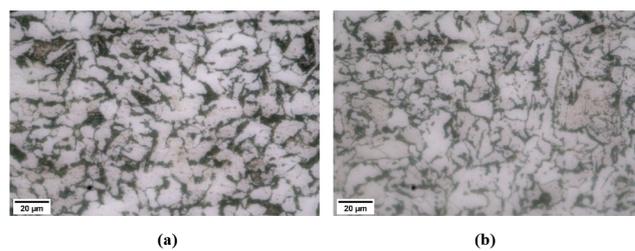
Figura 24

Metalografía FCAW-230-6 Me. Amp: 40X. (a) ZAC y (b) MB.

La ZAC muestra un tamaño de grano más pequeño frente al material base (MB), teniendo un valor del grano ASTM 10 y en el material base un tamaño de grano ASTM 9, correspondientes a un grano ultrafino y fino respectivamente.

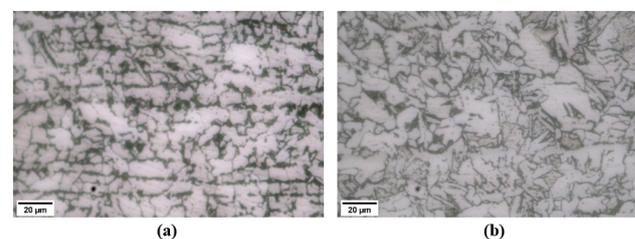
**Figura 25**

Metalografía FCAW-225-8-Me. Amp: 40X. (a) ZAC y (b) MB.

**Figura 26**

Metalografía FCAW-300-8-Me. Amp: 40X. (a) ZAC y (b) MB.

La ZAC muestra un tamaño de grano más pequeño frente al material base (MB), teniendo un valor del grano ASTM 10 y en el material base un tamaño de grano ASTM 9, correspondientes a un grano ultrafino y fino respectivamente.

**Figura 27**

Metalografía FCAW-225-10-Me. Amp: 40X. (a) ZAC y (b) MB.

Se observa que en la ZAC tiene un tamaño de grano más pequeño frente al material base (MB), teniendo un valor del grano ASTM 10 y en el material base un tamaño de grano ASTM 9, correspondientes a un grano ultrafino y fino respectivamente.

3.5. Resumen de ensayos

De los cupones de 6 mm, después de aplicar los ensayos correspondientes solo se acepta el cupon con el código: FCAW-230-6

**Tabla 14**

Resultados globales en cupones de 6 mm.

Cupón	Inspección visual	Ultrasonido	Doblado de cara y raíz	Tracción sección reducida	Calificación global
FCAW-125-6	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Aceptado	RECHAZADO
FCAW-175-6	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	RECHAZADO
FCAW-200-6	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	RECHAZADO
FCAW-230-6	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	ACEPTADO

Tabla 15

Resultados globales en cupones de 8 mm.

Cupón	Inspección visual	Ultrasonido	Doblado de cara y raíz	Tracción sección reducida	Calificación global
FCAW-150-8	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	RECHAZADO
FCAW-175-8	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado	RECHAZADO
FCAW-225-8	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	ACEPTADO
FCAW-300-8	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	ACEPTADO

En los cupones de 8 mm después de realizar los ensayos se aceptan los cupones: FCAW-225-8 y FCAW-300-8.

Tabla 16

Resultados globales en cupones de 10 mm.

Cupón	Inspección visual	Ultrasonido	Doblado de cara y raíz	Tracción sección reducida	Calificación global
FCAW-225-10	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	ACEPTADO
FCAW-275-10	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado	RECHAZADO
FCAW-325-10	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado	RECHAZADO
FCAW-375-10	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Aceptado	RECHAZADO

Para los cupones de 10 mm luego de ser evaluados en los ensayos el cupon aceptado es: FCAW-225-10.



4. Conclusiones

Realizando el estudio de la evaluación experimental para caracterizar juntas de acero ASTM A36 soldadas mediante el proceso FCAW se concluye lo siguiente:

Se obtuvieron las probetas de cada uno de los cupones soldados mediante la aplicación de la norma AWS D1.1 2020 en la cual indica las dimensiones de las probetas para los ensayos destructivos y cupón en general.

Los ensayos no destructivos (END) (inspección visual y ultrasonido) para los cupones, cumplieron con los criterios de aceptación del código AWS D1.1 2020.

En el tamaño de grano ASTM obtenido para la ZAC es un equivalente a grano ultrafino en cuanto al material base (MB) tienen una equivalencia de grano fino.

Para los ensayos de doblado de cara y raíz se evidencia que las probetas de 10 mm son las que presentan mayores fallas, debido a la velocidad de enfriamiento de la junta, prediciendo de esta manera que tiene un comportamiento tipo frágil, mismo que se comprueba en las estructuras presentes en el material de aporte.

Debido a la presencia de diferentes zonas microestructurales en las juntas soldadas, se realizó un barrido que va desde el MA, ZAC y MB, tratando de hacer las indentaciones en lugares similares de las probetas, dando así que el metal base (MB) tiene una dureza de HB 137 a HB 158, en cuanto a la ZAC los valores están en HB 140 a HB 168 y en la zona céntrica del cordón es de HB 172 a HB 191.

Las juntas soldadas presentan una penetración del 100%, sin embargo debido a que existen diferentes ensayos a los cuales fueron sometidas se concluye que se puede soldar en condiciones óptimas teniendo en cuenta los parámetros establecidos en los WPS de los siguientes cupones de soldadura: FCAW-230-6, FCAW-225-8, FCAW-300-8 y FCAW-225-10, al aplicar la norma AWS D1.1 2020, sin que se vean afectadas de manera significativa las propiedades mecánicas y microestructurales.

References

- [1] Sánchez Osorio M, Rincón Reina E. Análisis de soldadura del acero estructural A572 grado 50 con el proceso de soldeo al arco eléctrico con electrodo tubular aprotectado (FCAW-S) y comparada con el proceso de soldadura al arco con electrodo metálico revestido (SMAW) (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria Los Libertadores; 2017. pp. 14–47.
- [2] Medina C, Quispe F, Hernán. Análisis de soldabilidad y propiedades mecánicas de una tubería de revestimiento (casing) en junta soldada con el proceso FCAW



- Innershield u Outershield [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Ecuador, Quito. 2020. [citado 19 de octubre 2022]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20739>
- [3] Syarul M, Izatul I, Amalina A, Abdul G. The effect od flux core arc welding (FCAW) processes on diferentent parameters. [Internet]. 2012 [citado 19 octubre 2022]; ELSEVIER, 41: p 1497-1501. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812027415>
- [4] ASTM E-112. Métodos de prueba estándar para la determinación de tama no de grano.
- [5] FERNÁNDEZ. Ariana. Manual de estudio FCAW. [Internet]. 2016 (Chile), pp. 20-32 [citado 18 octubre 2022]. Disponible en: https://issuu.com/hangariana/docs/manual_fcaw
- [6] Lincoln Electric. Soldeo con alambre tubular. [Internet]. 32 [citado 18 octubre 2022]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut54/doc1tut54.pdf>
- [7] AWS-D1.1 2020. Codigo de soldadura estructural – Acero. ASTM E-10. Método de prueba estándar para dureza Brinell de materiales metálicos.
- [8] BUEHLER. A guide to materials preparation and analysis. [Internet]. 2018 4ta Edición. USA: Calameo, 2018. [Consulta: 15 de abril 2022]. Disponible en: <https://en.calameo.com/buehler/read/006393291a14f7be86036>
- [9] Ortiz F, Pulido A, Mesa D, Andrés F, MESA D. “Caracterización mecánica, metalográfica y tribológica de un buje metálico del cable aéreo de Manizales”. Scientia et Technica, no 20; 2016. (Colombia) pp. 1-6.
- [10] Ramos Hernández C. Evaluación experimental para caracterizar juntas de acero A36 soldadas mediante el proceso FCAW. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2022.
- [11] ASTM E-3. Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas.