

CARACTERIZACION DE INCLUSIONES PRODUCIDAS POR PROCESOS DE SOLDADURA SMAW Y FCAW EN ACERO ESTRUCTURAL

CHARACTERIZATION OF INCLUSIONS PRODUCED BY SMAW AND FCAW WELDING PROCESSES IN STRUCTURAL STEEL

*Hivo Alfonso Patarroyo Pulido ⁽¹⁾ Maria Teresa Yate Hernández ⁽²⁾ Arnold Sneider Gutiérrez Olaya ⁽³⁾
Leidy Yohana Garay Rodríguez ⁽⁴⁾ Rolando Díaz Sarmiento ⁽⁵⁾*

1. Ingeniero Metalúrgico, Sena Centro de Materiales y Ensayos, Investigador, GIMES (Grupo de Investigación Materiales y Ensayos), Bogotá, Colombia.
apatarroyo@misena.edu.co
2. Aprendiz Tecnólogo en supervisión de productos metálicos soldados, Sena Centro de Materiales y Ensayos, Investigador, GIMES (Grupo de Investigación Materiales y Ensayos), Bogotá, Colombia.
asgutierrez98@misena.edu.co
3. Aprendiz Tecnólogo en supervisión de productos metálicos soldados, Sena Centro de Materiales y Ensayos, Investigador, GIMES (Grupo de Investigación Materiales y Ensayos), Bogotá, Colombia.
mtyate@misena.edu.co
4. Aprendiz Tecnólogo en supervisión de productos metálicos soldados, Sena Centro de Materiales y Ensayos, Investigador, GIMES (Grupo de Investigación Materiales y Ensayos), Bogotá, Colombia.
lei_garay@misena.edu.co
5. Aprendiz Tecnólogo en supervisión de productos metálicos soldados, Sena Centro de Materiales y Ensayos, Investigador, GIMES (Grupo de Investigación Materiales y Ensayos), Bogotá, Colombia.
rdiaz6@misena.edu.co

RESUMEN

Este proyecto permitirá establecer de manera cuantitativa la morfología, distribución y aproximación a la composición química de las inclusiones no metálicas presentes en los depósitos de soldadura de las juntas en T realizadas en la unión de aceros estructurales, las cuales son de uso intensivo en el país, se debe armonizar el código colombiano de construcción sismo resistente NSR 2010, con los aspectos metalúrgicos de la zona afectada por el calor y los depósitos de soldadura elaborados con procesos SMAW y FCAW. lo cual proporcionará el criterio de comparación con las normas internacionales de soldadura para establecer comportamientos mecánicos y metalúrgicos de las juntas soldadas, estos criterios permitirán a calculistas, fabricantes, inspectores e interventores de estructuras metálicas determinar la aceptación o rechazo de un componente soldado o determinar la vida útil residual de estructuras en uso.

Palabras Claves: Discontinuidad, Disolución, Inclusión, Nuclear, Z.A.C

ABSTRACT

This project will establish quantitatively the morphology, distribution and approximation to the chemical composition of the non-metallic inclusions present in the weld deposits of the T-joints made in the union of structural steels, which are intensively used in the country. The Colombian earthquake resistant construction code NSR 2010 must be harmonized with the metallurgical aspects of the area affected by heat and welding deposits made with SMAW and FCAW processes. It will provide the criteria for comparison with international welding standards to establish mechanical and metallurgical behaviors of welded joints, these criteria will allow calculators, manufacturers, inspectors and inspectors of metal structures to determine the acceptance or rejection of a welded component or determine the residual life of structures in use.

Keywords: Dilution, Discontinuity, Dissolution, Inclusion, Nuclear, H.A.Z

1. INTRODUCCION

La soldadura brinda la posibilidad de comportarse a los miembros estructurales como un solo cuerpo, conservando sus propiedades y sirviendo como canal de conducción de los esfuerzos aplicados a la estructura metálica. Por ello la soldadura, que es la mezcla metalúrgica entre el metal de aporte, el metal base y los pases de soldaduras antepuestos, debe presentar homogeneidad en toda su masa, el principal problema de las juntas soldadas está delimitado en la pérdida de la homogeneidad, debida entre otros fenómenos a las inclusiones no metálicas generadas en los procesos de soldeo con protección por escoria como lo son SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y FCAW (Flux Cored Arc Welding), por lo tanto se postula la pregunta de investigación ¿Es la inclusión una discontinuidad que consta de características no metálicas y es resultante de la mutua disolución de impurezas de flujo líquido en los procesos de soldadura?. Por tanto la estabilidad estructural depende en gran medida de la homogeneidad de los depósitos soldados, es por ello que una discontinuidad en la soldadura, en condiciones de servicio, puede nuclear y propagar grietas, llevando al colapso de la estructura. Se hace necesario, establecer la morfología, la distribución y la composición química de dicha indicación, con el fin de indagar sobre los futuros efectos en los depósitos soldados.

En Colombia se viene realizando construcciones en acero soldado, cumpliendo los requisitos del Código Colombiano de Construcción Sismo resistente N.S.R. 2010 Título F, el cual establece los factores de diseño y toma como referente el código de soldadura AWS (American Welding Society) D.1.1. Se hace importante, desarrollar investigaciones en procesos de soldeo, inspección y metalurgia de la soldadura, para asegurar que en Colombia se entiendan los fenómenos metalúrgicos y mecánicos que rigen el comportamiento de las estructuras metálicas soldadas, lo cual impactará a todos los profesionales que se desempeñan en el área de las construcciones metálicas, montaje e interventoría de obras de infraestructura pública y privada, que son construidas en las diferentes zonas sísmicas del país, para generar confianza en el empleo, asegurar el ciclo de vida de los elemen-

tos soldados y contribuir a la disminución de colapsos estructurales, el objetivo de esta investigación es realizar una caracterización de las inclusiones que se encuentren dentro de los cordones de soldadura afectando su homogeneidad, y así determinar en qué casos una inclusión puede hacer que la soldadura sufra una nucleación, basándose en el código AWS D1.1 se realizara los respectivos procesos de soldadura con todas las variables que exige el código documentando cada proceso en los pertinentes wps y posteriormente a la ejecución del proceso se harán los ensayos destructivos para poder verificar que inclusiones se generen y que variables afectan en este proceso.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto, se construyó el estado del arte en cuanto a la identificación de inclusiones en cordones de soldadura, dando como resultado la selección de la norma internacional de soldadura del AWS (Asociación Americana de Soldadura), conforme al análisis de consumo de acero, para construcción civil, se determinó el acero ASTM A 572 Gr 50.

Los procesos de soldeo se emplean en dos etapas; de fabricación de las estructuras, el proceso FCAW, es el adecuado en trabajos de prefabricación en planta, mientras el proceso SMAW, es empleado en montaje de campo, por lo tanto, los procesos de soldeo para esta investigación fueron FCAW y SMAW, con aportes AWS ER 70T-11 y AWS E7018 respectivamente. Se especificó, que la junta en T con soldadura de filete en posición vertical con progresión ascendente, abarcaría el alcance de soldaduras tanto de prefabricación como de montaje.

Se estimó por medio de análisis estadístico el tamaño de la muestra representativa, tomando como base la fabricación de una estructura de 100 toneladas en acero estructural sismo resistente.

Se estudiaron las ecuaciones de fuentes internacionales, para la determinación del Carbono equivalente, las cuales se cruzaron con los criterios normativos de entrada de calor, para determinar los ciclos térmicos de precalentamiento, temperatura entre pases y enfriamiento lo que delimitó la caracterización de am-

peraje y el diferencial de potencial, para el desarrollo de WPS (Especificación del procedimiento de soldadura) y posteriores PQR (Registro de calificación del procedimiento).

Se ejecutaron los procesos de soldeo, sobre cupones de ensayo normalizado obteniendo los ítems de ensayo, que fueron preparados con aporte térmico cero.

En los laboratorios del Centro de Materiales y Ensayos del SENA, se evaluaron por medio de técnicas de análisis químico por espectrometría de emisión óptica, macrografía, microscopía óptica y microscopía S.E.M (Scanning Electron Microscope) con sonda EDS (Emisión Detection Scan). Se obtuvo así, la caracterización de las inclusiones en los depósitos de soldadura, en cuanto a tipo, ubicación, morfología y aproximación de su composición química.

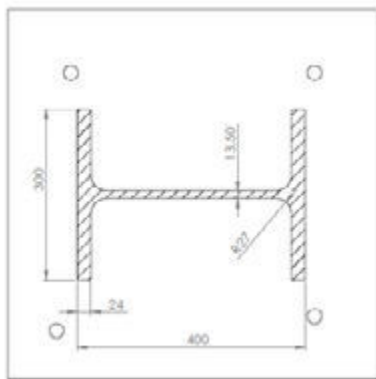
3. DESARROLLO DE CONTENIDOS

3.1 Diseño estadístico

Base de cálculo de la población: Partiendo de la fabricación de una estructura metálica de 100 toneladas, se seleccionaron como universo las juntas correspondientes a la unión entre la placa base (lámina ASTM A572 GR 50) y la columna (HEB 400).

Ver figura 1 y detallada en figura 2.

Perfil HEB 400 ASTM A 572 GR 50



Placa base ASTM A 572 GR 50

Figura 1. Placa base-columna

Fuente: autores del proyecto

Las juntas se encuentran soldadas por proceso SMAW/FCAW.

3.1.1 Determinación del tamaño de la muestra

Consideraciones: Tomando de la estructura metálica las uniones en filete se seleccionaron las juntas columna-placa base, siendo las representativas de la es-

tructura por la carga que transmiten. ver Fig 2.

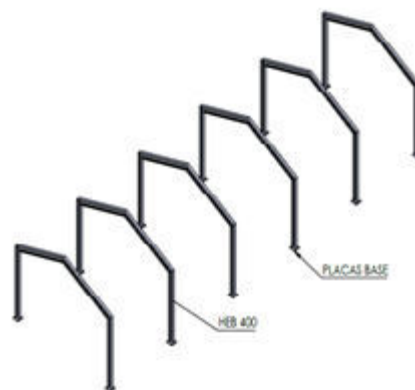


Figura 2. Estructura metálica

Fuente: autores del proyecto

De las 12 juntas columnas-placa base con las que cuenta la estructura se calculó el perímetro de la junta en centímetro [cm].

De la figura 1 se determina el perímetro soldado para una HEB 400:

Ecuación 1.

$$\text{Perímetro HEB 400} = 30\text{cm} \times 2 + 35,2\text{cm} \times 2 + 14,32\text{cm} \times 4 + 2,4\text{cm} \times 4$$

$$\text{Perímetro HEB 400} = 197,3\text{cm} [1]$$

Fuente: Ing. Patarroyo

Perímetro total para las 12 juntas columnas- placa base de la estructura:

$$\text{Perímetro HEB 400} \times 12 \text{ juntas} = 197,3\text{cm} \times 12 \text{ juntas} = 2368\text{cm}$$

El resultado es el universo.

Para determinar la muestra se estimó de la siguiente manera:

Calculo del valor crítico de la distribución normal en el nivel de confianza requerido.

Tabla 1. Valores del factor z [2]

NIVEL DE CONFIANZA	PUNTUACIÓN Z
80% 1	.28
85% 1	.44
90% 1	.65
95% 1	.96
99% 2	.58

- Determinación del margen de error (rango esperado donde se encuentra la población), = Margen de error [porcentaje expresado con decimales] = 5% (0,05)
- Desarrollo de la ecuación.

Ecuación 2.

$$n = \frac{z \times p \times (1-p)}{e^2 \times N} \quad [2]$$

Donde:

n = Tamaño de muestra

N = Tamaño de población = 2.368 cm

e = Margen de error [porcentaje expresado con decimales] = 5% (0,05)

z = Coeficiente nivel de confianza. 95% = 1.96

Reemplazando los valores para determinar el tamaño de la muestra de la ecuación 3.

$$\frac{[1,96]^2 \times 0,5[1 - 0,5]}{0,05^2} \div \frac{1 + \{1,96^2 \times 0,5[1 - 0,5]\}}{0,05^2 \times 2,368 \text{ cm}}$$

Resultado: 330,5455cm

Numero de cupones a soldar:

Ecuación 4.

$$\frac{331 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} \times \frac{x}{\text{cupon de ensayo}} = \frac{331 \text{ cm} \times 1}{20 \text{ cm}} = 16.55 \text{ cupones de ensayo}$$

Se realizaron 17 cupones de ensayo.

3.2 Determinación del carbono equivalente

Los elementos aleantes que se encuentran presentes en el material base influyen en las propiedades metalúrgicas, el carbono es uno de los elementos con mayor influencia directa en el comportamiento de los aceros; existe una relación directa entre las transformaciones estructurales y las propiedades metalúrgicas al momento de realizar una aplicación de soldadura. Una serie de discontinuidades que se presentan en el material base, donde normalmente hay una transformación de fase de Austenita a Martensita o Ferrita acicular, que resulta de la rápida pérdida de calor del cordón

de soldadura al material base, lo cual genera la zona afectada por el calor; estudios previos han llegado a la conclusión que al conocer el contenido de carbono equivalente del acero se puede determinar la dureza del metal de soldadura y una aproximación de la cantidad del microestructura acicular en él y en la Z.A.C.

El principio de la ecuación para determinación del Carbono Equivalente (C.E), es determinar la composición química del metal base (M.B), para luego aplicar una serie de factores numéricos que ponderan los comportamientos equivalentes al Carbono de los diferentes elementos químicos de la aleación que dan origen a los aceros.

Por tanto, el carbono equivalente es un indicador importante para determinar parámetros previos al proceso de soldeo.

3.2.1 Ecuaciones para carbono equivalente

Ecuación 7.

$$\begin{aligned} \text{IIW: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr}{5} \\ + \frac{\%V}{5} + \frac{\%Cu}{15} \\ \text{IIW: CE: } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,025\%Mo}{5} + \frac{0,008\%Ni}{15} + \frac{0,024\%Cr}{5} \\ + \frac{0,004\%V}{5} + \frac{0,024\%Cu}{15} = 0,3799\%CE \end{aligned}$$

Ecuación 6.

$$\text{WES: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Si}{24} + \frac{\%Mo}{29} + \frac{\%V}{14} \quad [3]$$

$$\begin{aligned} \text{WES: CE: } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,217\%Si}{24} + \frac{0,025\%Mo}{29} + \frac{0,004\%V}{14} \\ = 0,3783\%CE \end{aligned}$$

Ecuación 7.

$$\text{DEARDEN O'NEILL: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr}{5} [3]$$

$$\text{DEARDEN O'NEILL: CE: } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,025\%Mo}{4} + \frac{0,008\%Ni}{15} + \frac{0,024\%Cr}{5} = \mathbf{0,3765 \%CE}$$

Ecuación 10.

$$\text{WINTERTON: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{50} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%V}{10} + \frac{\%Cu}{40} [3]$$

$$\text{WINTERTON: CE } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,025\%Mo}{50} + \frac{0,008\%Ni}{20} + \frac{0,004\%V}{10} + \frac{0,009\%Cu}{40} = \mathbf{0,3696 \%CE}$$

Ecuación 8.

$$\text{KIHARA SUZUKU TAMURA: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Ni}{40} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%V}{14} + \frac{\%Si}{24} [3]$$

$$\text{KIHARA SUZUKU TAMURA: } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,025\%Mo}{4} + \frac{0,008\%Ni}{40} + \frac{0,024\%Cr}{5} + \frac{0,004\%V}{14} + \frac{0,217\%Si}{24} = \mathbf{0,3887 \%CE}$$

Ecuación 11.

$$\text{BRADSTREAT: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{20} + \frac{\%Mo}{10} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%V}{10} [3]$$

$$\text{BRADSTREAT: CE } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{20} + \frac{0,025\%Mo}{10} + \frac{0,008\%Ni}{15} + \frac{0,024\%Cr}{10} + \frac{0,004\%V}{10} = \mathbf{0,2408 \%CE}$$

Ecuación 9.

$$\text{STOUT: CE: } \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{10} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Cu}{40} [3]$$

$$\text{STOUT: CE } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,025\%Mo}{10} + \frac{0,008\%Ni}{20} + \frac{0,024\%Cr}{5} + \frac{0,009\%Cu}{40} = \mathbf{0,3736 \%CE}$$

Ecuación 12.

$$\text{LORENZ DÜREN: CE: } \%C + \frac{\%Si}{26} + \frac{\%Mn}{19} + \frac{\%Cu}{22} + \frac{\%Cr}{12} + \frac{\%Ni}{38} + \frac{\%Mo}{13} + \frac{\%V}{7} [3]$$

$$\text{LORENZ DÜREN: CE: } 0,178\%C + \frac{0,217\%Si}{26} + \frac{1,141\%Mn}{19} + \frac{0,009\%Cu}{22} + \frac{0,024\%Cr}{12} + \frac{0,008\%Ni}{38} + \frac{0,025\%Mo}{13} + \frac{0,004\%V}{7} = \mathbf{0,2515 \%CE}$$

Ecuación 13.

KOCH BERSCH: CE

%C+

$$\frac{(\%Mn + \%Mo + \%Ni + \%Cr + \%V + \%Cu + \%Si)}{20}$$

[3]

KOCH BERSCH: CE

0,178%C+

$$\frac{(1,141\%Mn + 0,025\%Mo + 0,008\%Ni + 0,024\%Cr + 0,004\%V + 0,009\%Cu + 0,217\%Si)}{20} = 0,2494 \%CE$$

Ecuación 14.

$$\text{GRAVILLE: CE } \%C + \frac{\%Mn}{16} + \frac{\%Mo}{7} + \frac{\%Cr}{23} + \frac{\%Ni}{50} + \frac{\%Nb}{8} + \frac{\%V}{9} [3]$$

$$\text{GRAVILLE: CE } 0,178\%C + \frac{1,141\%Mn}{16} + \frac{0,025\%Mo}{7} + \frac{0,024\%Cr}{23} + \frac{0,008\%Ni}{50} + \frac{0,022\%Nb}{8} + \frac{0,004\%V}{9} = 0,3406 \%CE$$

Ecuación 15.

YURIOKA OHSHITA: CE %C +

$$A(C) \left(\frac{\%Si}{24} + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%Nb + \%V)}{5} \right) \div 5 + 5 \times B$$

$$A(C) = 0,75 + 0,25TANH [20(C - 0,12)] = 0,9552 [3]$$

YURIOKA OHSHITA: CE 0,178%C +

$$0,9552 \times \left(\frac{0,217\%Si}{24} + \frac{1,141\%Mn}{6} + \frac{0,009\%Cu}{15} + \frac{0,008\%Ni}{20} + \frac{(0,024\%Cr + 0,025\%Mo + 0,022\%Nb + 0,004\%V)}{5} \right) \div 5 + 5 \times 0,0012\%B = 0,3902 \%CE$$

Tabla 2. Elementos químicos acero astm a 572 gr 50

Fuente: autores del proyecto

Carbono	0,178%
Silicio	0,217%
Manganeso	1,141%
fosforo	0,003%
azufre	0,018%
Cromo	0,024%
Molibdeno	0,025%
Níquel	0,008%
Cobre	0,009%
Cobalto	0,012%
Boro	0,0012%
Titanio	0
Vanadio	0,004%
Niobio	0,022%

Las ecuaciones indican el valor del carbono equivalente y junto con el espesor del metal base, afectan el comportamiento del precalentamiento, temperatura entre pases, pos calentamiento y tratamiento térmico post soldadura. Para la investigación se empleó el acero ASTM A572 Gr 50 con un espesor de 5/8" (15.875 mm) al aplicar la ecuación del carbono equivalente total (Ecuación 17), resulta:

Ecuación 16.

$$[1 + 0,005 * \text{Espesor en mm}] =$$

$$[1 + 0,005 * 15,875] = 1.07975 [4]$$

Ecuación 17

$$CE \times 1.07975 = CE_t [4]$$

Resultados parciales de la aplicación de las ecuaciones de Carbono equivalente.

Tabla 3. Carbono equivalente total

Fuente: autores del proyecto

AUTOR	CEt	ECUACION
IIW 0	,410%	5+17
WES	0,408% 6	+17
DEARDEN O'NEILL	0,406% 7	+17
KIHARA SUZUKU TAMURA	0,419% 8	+17

STOUT	0,403%	9+17
WINTERTON	0,399%	0+17
BRADSTREAT	0,260%	1+17
LORENZ DÜREN	0,271%	2+17
KOCH BERSCH 0	,269%	13+17
GRAVILLE	0,367%	4+17
YURIKA OHSHITA	0,421%	5+17

Se generaron los resultados del carbono equivalente total, para determinar las temperaturas de precalentamiento y temperatura entre pases. Con la aplicación de la ecuación de ITO BESSYO (ecuación 18 y 19) la cual tiene en cuenta el diseño de la junta, la clase de electrodo (básico o celulósico) y el espesor del material base:

Ecuación 18.

$$\text{ITO BESSYO: CE } \%C + \frac{\%Mn}{20} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Cr}{20} + \frac{\%V}{10} + \frac{\%Cu}{20} + \frac{\%Si}{30} + 5 \times B + \frac{H}{60} + \frac{A \times T}{600} \quad [3]$$

Donde:

A= 1; en junta libre

A= 2; en junta embreada

T= espesor en mm

H= 5; para electrodos básicos

H= 20; para electrodos celulósicos

Ecuación 19

TPC (°C): $1440 \times \text{PCM} - 392$ [3]

Ecuación 18.

ITO BESSYO: CE $0,178\%C +$

$$\frac{1,141\%Mn}{20} + \frac{0,025\%Mo}{15} + \frac{0,008\%Ni}{60} +$$

$$\frac{0,024\%Cr}{20} + \frac{0,004\%V}{10} + \frac{0,009\%Cu}{20} + \frac{0,21\%Si}{30} +$$

$$5 \times 0,0012\%B + \frac{5}{60} + \frac{1 \times 15,875}{600} =$$

0,3619 %CE

PCM: 0,3619%

Ecuación 19.

TPC: $1440 \times 0,3619 \%CE - 392 = 129,172^\circ\text{C}$

Se determinó que la temperatura de precalentamiento y entre pases para los ensambles sería de 130°C .

3.3 PAUTAS SOBRE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PRECALENTAMIENTO [5]

3.3.1. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL DE DUREZA O CONTROL DE HIDROGENO

Determinar el carbono y calcular el Carbono equivalente:

Ecuación 20.

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

Ubicar la posición del acero en la figura 3

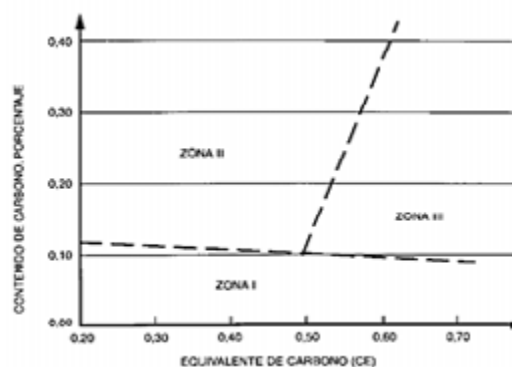


Figura 3. Zona de clasificación de aceros

Fuente: [5]

Notas:

1. Ecuación 20. $\text{CE} = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$

2. véase h5.2 (1). (2). o (3) para características aplicables de la zona. (Anexo h AWS d1.1/2015)

Zona I: El agrietamiento es improbable, pero puede ocurrir con hidrógeno alto o restricción alta. Usar el método de control de Hidrógeno para determinar el precalentamiento de los aceros de esta zona.

Zona II. El método de control de dureza y la dureza seleccionada deberán ser utilizados para determinar la entrada mínima de calor para soldaduras en filete

de pasada única sin precalentamiento.

Si la entrada mínima de calor no resulta práctica, use el método de control de Hidrógeno para determinar el precalentamiento.

Para soldaduras en ranura, debe utilizarse el método de control de Hidrógeno para determinar el precalentamiento.

Para aceros con alto carbono, puede requerirse una entrada mínima de calor para el control de la dureza y un precalentamiento para el control de Hidrógeno en ambos tipos de soldadura, es decir, soldadura en filete y en ranura.

Zona III. Deberá usarse el método de control de Hidrógeno. Donde se restringe la entrada de calor para preservar las propiedades de la HAZ (por ejemplo, en algunos aceros templados y revenidos) deberá usarse el método de control de Hidrógeno para determinar el precalentamiento.

3.3.2. MÉTODO DE CONTROL DE DUREZA

a. Calcular el Carbono equivalente CE

Ecuación 20.

$$CE = C + (\%Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad [5]$$

b. Determinar el índice de enfriamiento crítico, para establecer una dureza de HAZ máxima seleccionada de 400 HV o de 350 HV según FIGURA 4.

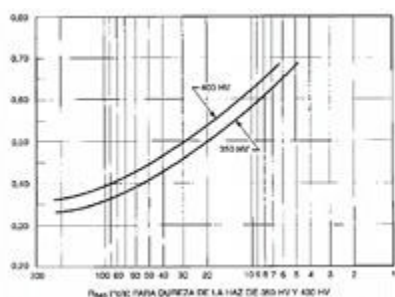


Figura 4. Índice de enfriamiento crítico para 350 hv y 400 hv

Fuente:[5]

Nota-CE: $C + (Mn + Si)/5 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ [5]

c. Mediante los espesores correspondientes de láminas para “flanche” y “alma”, deberá seleccionarse el diagrama apropiado de la Figura 8 y deberá determinarse la entrada mínima de energía para una soldadura

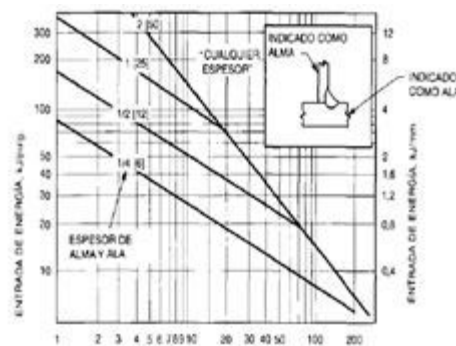
en filete de pasada única.

Esta entrada de energía se aplica a las soldaduras SAW. Para otros procesos, la entrada mínima de energía para soldaduras en filete de pasada única puede ser estimada aplicando los siguientes factores de multiplicación a la energía estimada en el proceso SAW:

Tabla 2. Factor de multiplicación

Fuente: [5]

Proceso de soldadura	Factor de multiplicación
SAW	1
SMAW 1	,5
GMAW,FCAW	1,25

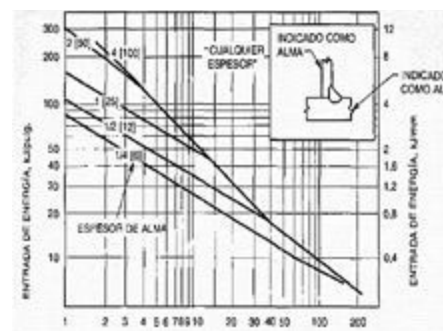


Tasa de enfriamiento a 540°C (°C/s)

Figura 5. Soldaduras de filete saw de pasada simple con alma y a la del mismo espesor.

Fuente: [5]

NOTA: la entrada de energía determinada a partir de la gráfica no debe implicar conveniencia para aplicaciones prácticas. Para cierta combinación de espesores puede haber fusión a través del espesor.



tasa de enfriamiento a 540°C (°C/s)

Figura 6. Soldaduras de filete saw de pasada simple con alas de 1/4 de pulgada [6 mm] y espesor de alma variable

Fuente: [5]

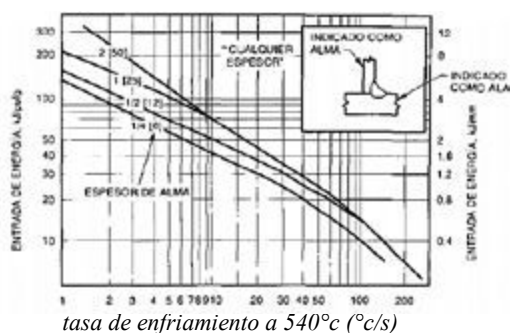


Figura 7. Soldaduras de filete saw de pasada simple con as de 1/2 pulg. [12mm] y espesor de alma variable
Fuente: [5]

NOTA: la entrada de energía determinada a partir de la gráfica no debe implicar conveniencia para aplicaciones prácticas. Para cierta combinación de espesores puede haber fusión a través de espesor.

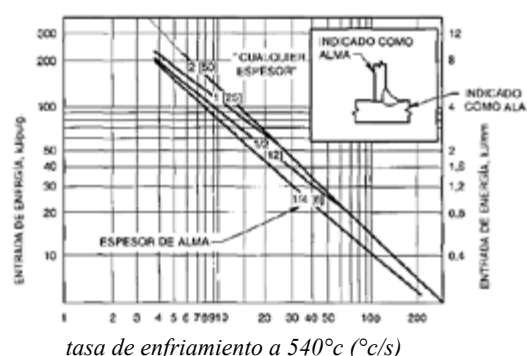


Figura 10. Soldaduras de filete saw de pasada simple con alas de 4 pulg. {100mm} y espesor de almas variables.
Fuente: [5]

NOTA: La entrada de energía determinada a partir de la gráfica no debe implicar conveniencia para aplicaciones prácticas. Para cierta combinación de espesores puede haber fusión a través del espesor.



Figura 8. Soldaduras de filete saw de pasada simple con alas de 1 pulg. [25 mm] y espesores de alma variables
Fuente: [5]

NOTA: La entrada de energía determinada a partir de la gráfica no debe implicar conveniencia para aplicaciones prácticas. Para cierta combinación de espesores puede haber fusión a través del espesor.

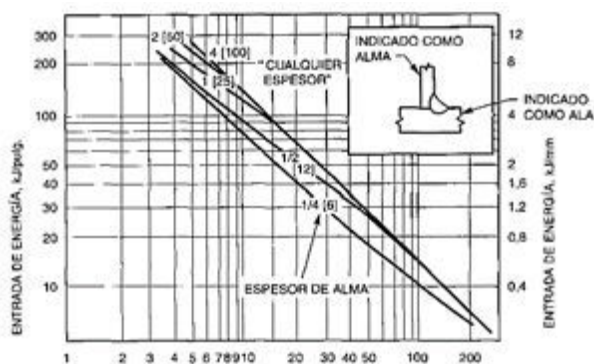


Figura 9. Soldaduras de filete saw de pasada simple con alas de 2 pulgadas {50mm} y espesores de alma variables
Fuente: [5]

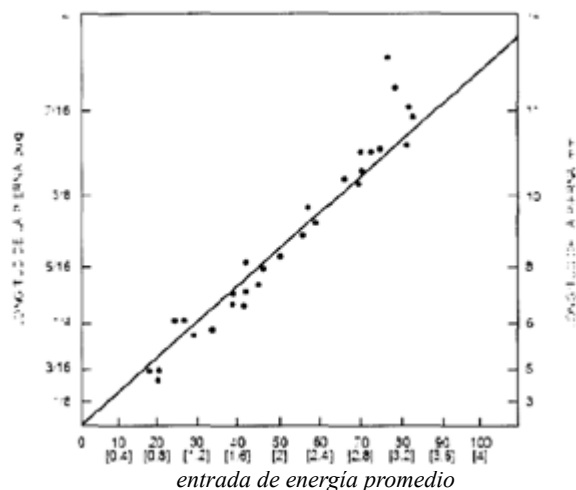


Figura 11. Soldadura por arco con electrodo metálico revestido (smaw)
Fuente: [5]

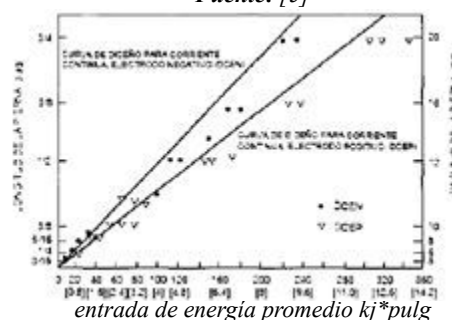


Figura 12. Soldadura por arco sumergido (saw)
Fuente: [5]

3.3.3 MÉTODO DE CONTROL DE HIDRÓGENO

a. El valor del parámetro de composición, Pcm deberá ser calculado de la siguiente manera:

Ecuación 21.

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

b. El nivel de Hidrógeno deberá ser determinado y definirse de la siguiente manera:

H1 Hidrógeno extra bajo: Estos consumibles deben tener un contenido de Hidrógeno difusible menor que 5 ml/100 g del metal depositado cuando se mide de acuerdo con la norma ISO 3690-1976 o un contenido de humedad del recubrimiento del electrodo de 0,2% máximo de acuerdo con las normas AWS A5.1 o A5.5. Esto se puede establecer ensayando cada tipo, marca o combinación alambre/fundente utilizada después de la extracción del paquete o contenedor y la exposición a la duración prevista, con la debida consideración de las condiciones reales de almacenamiento previo al uso inmediato.

Se puede considerar que lo que sigue a continuación cumple este requisito:

(a) Electrodo de bajo hidrógeno tomados de contenedores herméticamente sellados, secados a 700°F a 800°F [370°-430 °C] por una hora y usados dentro de las dos horas de ser retirados,

(b) GMAW con alambres sólidos limpios.

H2 Bajo Hidrógeno: Estos consumibles deben tener un contenido de hidrógeno difusible menor que 10ml/100g del metal depositado cuando se mide de acuerdo con la norma ISO 3690-1976 o un contenido de humedad del recubrimiento del electrodo de 0,4% máximo de acuerdo con la norma A WS A5.1. Esto se puede establecer ensayando cada tipo, marca de consumible o combinación alambre/fundente utilizada. Se puede considerar que lo que sigue a continuación cumple este requisito:

(a) Electrodo de bajo hidrógeno tomados de contenedores herméticamente sellados, acondicionados de acuerdo con la sección 5.3.2.1 del código y usados dentro de las cuatro horas luego de ser retirados,

(b) SAW con fundente seco.

H3 Hidrógeno no controlado: El resto de los consumibles que no alcanzan los requisitos de H 1 o H2. Debe determinarse el grupo correspondiente al índice de susceptibilidad de la Tabla 3.

Tabla 3. Agrupamiento del índice de susceptibilidad como función del nivel de hidrogeno "H" y parametro de composicion Pcm

FUENTE: [5]

Agrupamiento del índice de susceptibilidad ^c					
Equivalente del carbono- ^{pa} _{cm}					
Nivel de hidrogeno. H	<0,18	< 0,23	< 0,28	< 0,33	< 0,38
H1 A	B	C	D	E	
H2 B	C	D	E	F	
H3 C	D	E	F	G	

$$a. \text{ Ecuación 21. } PCM = C + \frac{SI}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad [5]$$

b. Índice de susceptibilidad – 12 Pcm + log in H.

c. Las agrupaciones de índices de susceptibilidad, desde A hasta G. abarcan el efecto combinado del parámetro de composición, Pcm y el nivel de hidrogeno, H, de conformidad con la fórmula que muestra en la nota b.

Las cantidades numéricas exactas se obtienen de la fórmula de la nota b, utilizando los valores de Pcm y los siguientes valores dados en ml/100g de metal de soldadura.(véase H6.2.2.(1).(2).(3)) [5] .

Para una mayor conveniencia, las agrupaciones de índices de susceptibilidad han sido expresadas en la tabla por medio de las letras, desde A hasta G, para cubrir los siguientes rangos estrechos.

A=3,0. B=3,1-3,5; C=3,6-4,0; D=4,1-4,5; E=4,6-5,0; F=5,1-5,5; G=5,6-7,0.

Estas agrupaciones se usan en la Tabla 4 en conjunto con la restricción y el espesor para determinar la temperatura mínima de precalentamiento y entre pasadas.

Niveles mínimos de temperatura de precalentamiento y entre pases.

La Tabla 4 proporciona las temperaturas mínimas de

precalentamiento y entre pasadas que deberán utilizarse.

La Tabla 4 establece tres niveles de restricción.

El nivel de restricción a utilizarse deberá determinarse según el criterio indicado en

Tabla 4. Temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pases para tres niveles de restricción (Revisar anexo 1 del documento)

Fuente: [5]

Nivel de restricción	Espesor* pulgadas	Temperatura mínima de precalentamiento y entre pasadas (°F)						
		Agrupación del índice de susceptibilidad						
		A	B	C	D	E	F	G
Baja	< 3/8	< 65	< 65	< 65	< 65	140	280	320
	3/8 - 1/4 incl.	< 65	< 65	65	140	210	280	300
	> 3/4 - 1/2 incl.	< 65	< 65	65	175	230	280	300
	> 1/2 - 3 incl.	65	65	100	200	250	280	300
	> 3	65	65	100	200	250	280	300
Media	< 3/8	< 65	< 65	< 65	< 65	160	280	320
	3/8 - 1/4 incl.	< 65	< 65	65	175	240	280	320
	> 3/4 - 1/2 incl.	< 65	65	165	220	280	320	320
	> 1/2 - 3 incl.	65	175	230	265	300	320	320
	> 3	200	250	280	300	320	320	320
Alta	< 3/8	< 65	< 65	< 65	180	230	300	320
	3/8 - 1/4 incl.	< 65	65	155	220	280	320	320
	> 3/4 - 1/2 incl.	65	185	240	280	300	320	320
	> 1/2 - 3 incl.	240	265	300	300	320	320	320
	> 3	240	265	300	300	320	320	320

3.3.4 Restricción:

La clasificación de los tipos de soldadura con distintos niveles de restricción se determinará según la experiencia, el análisis de ingeniería, la investigación o el cálculo. Se han establecido tres niveles de restricción:

3.3.4.1 Restricción baja:

Este nivel describe juntas soldadas en filete y en ranura comunes, en las cuales existe una libertad razonable de movimiento de los miembros.

3.3.4.2 Restricción media: Este nivel describe juntas soldadas en filete y en ranura, en las cuales debido a que los miembros se encuentran ya fijos a una pieza estructural, existe una libertad de movimiento reducida.

3.3.4.3 Restricción alta: Este nivel describe soldaduras en las cuales casi no existe libertad de movimiento para los miembros unidos (tales como soldaduras de reparación, especialmente con materiales de gran espesor).

3.4 FLUJOGRAMA DEL PROYECTO

(revisar anexo 2 del documento)

Figura 13 Diagrama de flujo

3.5 HERRAMIENTAS DE TRABAJO



Figura 14. Equipo de soldadura

Fuente: autores del proyecto

Este es un equipo de soldadura marca sweiss sky pulse 4060 se utilizó para realizar la aplicación en el acero al carbono ASTM a 572 gr 50 variando según el material, la calamina, la humedad del electrodo, así pudimos llegar a un buen término de culminación del proyecto.

Partes del equipo de soldadura:



Figura 15. Antorcha para el proceso gmaw

Fuente: autores del proyecto

Sirve para alimentar y soldar el material base con la transferencia de gas y alambre.



Figura 16. Manómetro

Fuente: autores del proyecto

Sirve para calibrar la salida y cantidad de mezcla al momento de soldar.



Figura 17. Pinza masa
Fuente: autores del proyecto

Se utiliza para colocarlo en la pieza de trabajo y permitir que haya una buena conducción eléctrica al momento del proceso de soldeo



Figura 20. Disco flat
Fuente: autores del proyecto

Este disco se usó para la corrección de las imperfecciones en el material después del corte con la maquina con el cual realizamos los ítems.



Figura 18. Porta electrodo
Fuente: autores del proyecto

Sirve para fijar el electrodo y permitir que haya una trasferencia de eléctrica al electrodo



Figura 20. Pulidora metalográfica
Fuente: autores del proyecto

Maquina utilizada en la preparación de los ítems de ensayo pasando facilitando el pulido para realizar las pruebas y poder observar las discontinuidades.



Figura 19. Pulidora
Fuente: autores del proyecto

Pulidora marca makita se utilizó manualmente para remover el exceso de material.

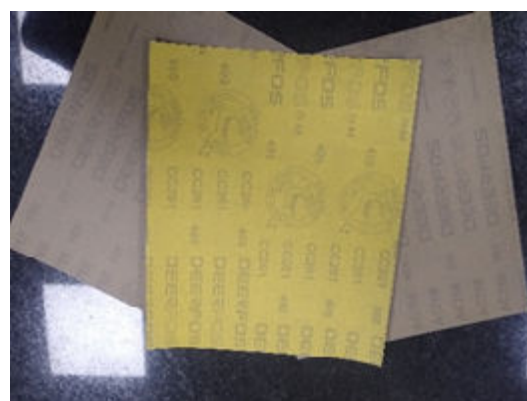


Figura 21. Lijas
Fuente: autores del proyecto

Se inició desde la lija 220 hasta la lija 2000 para afinar la superficie a ser examinada.

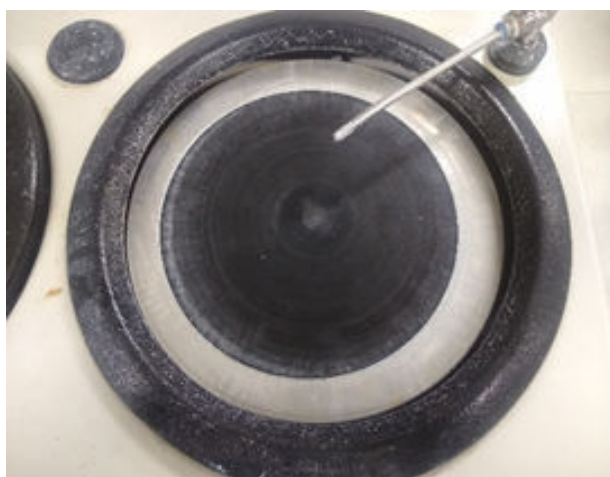


Figura 22. Paño

Fuente: autores del proyecto

Se utilizó para la terminación de los ítems de ensayo para dar el acabado llamado brillo espejo.



Figura 23. Alúmina de 0.5 micras

Fuente: autores del proyecto

Se utiliza al momento de realizar el pulido en el paño para que las pequeñas partículas afinen y brillen la pieza metálica



Figura 24. Microscopio sem phenom xl

Fuente: autores del proyecto

Microscopio de barrido sirve para observar fases, micro constituyente. Posee gran posibilidad de campos

y permite enfocar una gran parte de la muestra son equipos que pueden disponer de diversos detectores como energía dispersa. Estudios en formas microscópicas y nanoscópicas a su vez da apariencia tridimensional a la imagen.



Figura 25. Microscopio de barrido zeiss

Fuente: autores del proyecto

Microscopio de barrido sirve para hacer observación metalográfica.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables que nuclean las inclusiones son en su orden de impacto; humedad, la cual esta presente en la calamina del proceso de laminación de aceros estructurales, debido a que es un óxido ferroso férrico hidratado.

Pintura y anticorrosivos, los cuales en las uniones en montaje no son removidas del área a soldar.

Humedad en el revestimiento de electrodos AWS E 7018, por deficiencia en el acondicionamiento y manipulación de los mismos.

Ángulos de avance y de trabajo fuera de los rangos calificados en el WPS, para procesos FCAW y SMAW. Carencia de WPS.

La inclusiones analizadas, son nucleadas en su mayoría por la acción química entre el oxígeno con los elementos aleantes con preferencia por el Fe, Si, Mn, en este orden, produciendo compuestos Inter metálicos, tipo óxidos y silicatos complejos, los cuales tienen puntos de fusión y durezas altos, que en juntas en servicio producen micro fisuras, las cuales bajo las acciones de los flujos de cargas transmitidos por los

elementos estructurales, se embridan, propagan y crecen, hasta el colapso de la estructura.

Las morfologías, analizadas son volumétricas, con aristas tridimensionales en ángulos menores a 45°. Que se cree que producen concentradores de esfuerzos.

La hidratación de los compuestos no se pudo determinar, debido a que, en los procesos de preparación de los ítems de ensayo, se emplearon equipos con refrigeración por agua, enmascarando de esta forma las moléculas que hidratarían a los compuestos, óxidos y silicatos complejos.

5. CONCLUSIONES

Los autores, concluyen parcialmente que de los factores analizados en los WPS, para FCAW y SMAW, en la nucleación de los compuestos de las inclusiones, esta de manera significativa el amperaje y el voltaje, que derivan en calores de entrada, que aumentan la temperatura del ensamble y de las zonas adyacentes, que en pases sucesivos, disminuyen la relación de enfriamiento, creando charcos de fusión elipsoides que demoran en su enfriamiento, provocando así, dos fenómenos, uno la nucleación y otro, su crecimiento.

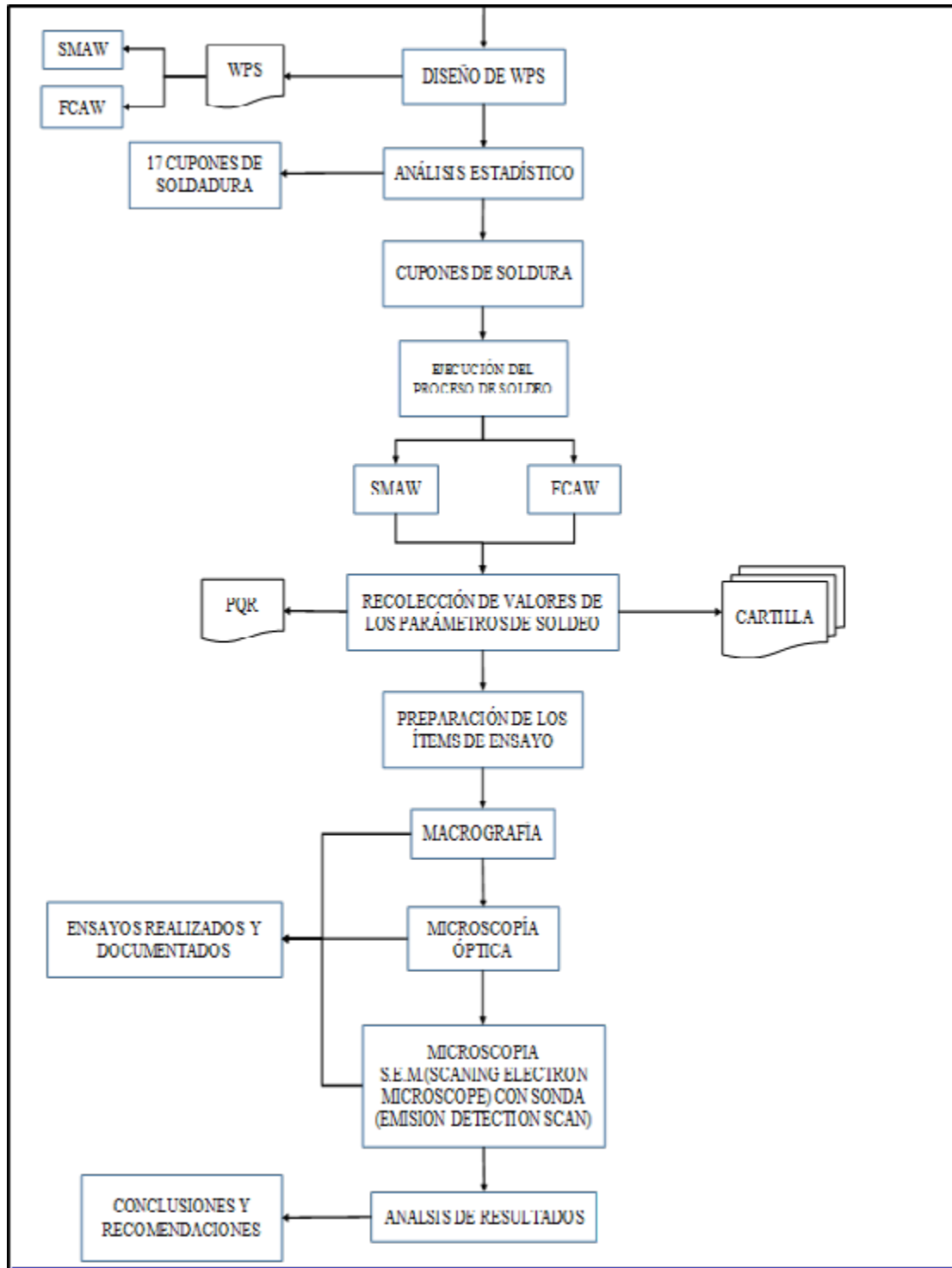
Anexo 1

Tabla 4. Temperaturas minimas de precalentamiento y entre pases para tres niveles de restriccion

Fuente: [5]

nivel de restriccion	Espesor pulgadas	temperatura minima de precalentamiento y entre pasadas (°F)						
		Agrupacion del indice de susceptibilidad						
		A	B	C	D	E	F	G
bajo	<3/8	< 65	< 65	< 65	< 65	140	280	300
	3/8-3/4 incl	< 65	< 65	65	140	210	280	300
	>3/4-1<1/2 incl	< 65	< 65	65	175	230	280	300
	>1-1/2-3 ind	65	65	100	200	250	280	300
	>3	65	65	100	200	250	280	300
medio	<3/8	< 65	< 65	< 65	< 65	160	280	320
	3/8-3/4 incl	< 65	< 65	65	175	240	290	320
	>3/4-1-1/2 incl	< 65	65	165	230	280	300	320
	> 1-1/2-3ind	65	175	230	265	300	300	320
	>3	200	250	280	300	320	320	320
Alto	<3/8	< 65	<65	<65	100	230	300	320
	3/8-3/4 incl	< 65	65	150	220	280	320	320
	>3/4-1-1/2 incl	65	185	240	280	300	320	320
	> 1-1/2-3 incl	240	265	300	300	320	320	320
	>3	240	265	300	300	320	320	320

continuación



REFERENCIAS

[1] ecuacion 1, ingeniero patarroyo

[2].SurveyMonkey, calculadora del tamaño de la muestra, [en línea] disponible:
<https://es.surveymonkey.com/mp/sample-size-calculator/>

[3] ING. Sergio G, Tratamiento térmico de soldadura, Termo soldex s.a. 2004

[4] ecuacion 16,ecuacion 17.ingeniero patarroyo.

[5] AWS D1.1, código de soldadura estructural-acero, anexo H, American Welding Society, 2015.