

# Implicancias en la Soldabilidad de Aceros A36 y A615 mediante Proceso SMAW

Elías Esquicha-Larico Dr<sup>1</sup>, José Esquicha-Tejada Mg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, [eesquicha@unsa.edu.pe](mailto:eesquicha@unsa.edu.pe)

<sup>3</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, [jesquichat@unsa.edu.pe](mailto:jesquichat@unsa.edu.pe)

**Resumen**– En los trabajos que desarrollan en las pequeñas y medianas empresas, al aplicar el proceso SMAW es común ver que utilizan materiales económicos como es el A36 y el A615 sin considerar, las normas que en sus códigos y estándares previenen la soldabilidad de los aceros. Para que logren mejorar sus producciones y evitar retrabajos, en este estudio se plantea la aplicación de procedimientos que permiten evitar defectos provenientes del trabajado de estos dos aceros por medio de la soldadura. Por lo que se ha llegado a experimentar y realizar acercamientos estadísticos en las variables esenciales que se aplican el proceso SMAW, y que tienen incidencia en el comportamiento de las propiedades de estos metales.

Estas variables son determinantes en el momento de una operación y proceso de soldadura y al controlarlos se previenen los malos resultados en la calidad de la soldabilidad de un producto.

**Palabras Clave**-- Soldabilidad SMAW, Defectos, Procedimientos, Variables Esenciales, Experimentos Estadísticos.

**Abstract**- In the work carried out in small and medium-sized companies, when applying the SMAW process it is common to see that they use cheap materials such as A36 and A615 without considering the norms that in their codes and standards prevent the weldability of steels. To improve their productions and avoid rework, this study proposes the application of procedures that make it possible to avoid defects from the working of these two steels using welding. Therefore, it has been possible to experiment and carry out statistical approaches in the essential variables that are applied to the SMAW process, and that has an impact on the behavior of the properties of these metals.

These variables are decisive at the time of a welding operation and process and by controlling them, poor results in the quality of the weldability of a product are prevented.

**Keywords**-- SMAW weldability, defects, procedures, essential variables, statistical experiments.

## I. INTRODUCCIÓN

Es muy común ver en nuestro medio, el uso de los aceros A615 y A36 soldadas en diversas construcciones estructurales en viviendas económicas, los cuales están sometidos a esfuerzos, que deben ser garantizados en este tipo de trabajos por el bien de nuestra comunidad [1].

Por lo tanto, este trabajo experimental permite verificar los parámetros de soldabilidad y los alcances procedimentales donde la AWS recomienda su soldeo el acero A615, si es que

se toma en consideración procedimientos que lo dan especialistas en soldadura” [20].

Del análisis encontrado en este tipo de trabajos se determinó, que la mayoría de los talleres, desarrollan trabajos proyectados a bajo costo; pero, no toman conciencia del alto costo que se generarían si se produce un accidente.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Los Aceros Estructurales

Los aceros A36 (ASTM), forman parte de los aceros estructurales, conocidos como aleaciones hierro – carbono, se adicionan aleaciones (Mn, Si) que permiten la reducción de exceso del oxígeno, azufre y fósforo. [13].

### B. Los Aceros Microaleados

Están considerados en los Aceros de Alta Resistencia y Baja Aleación (HSLA), con pequeñas aleaciones de aluminio, vanadio, titanio y niobio; en algunas veces cobre, molibdeno, níquel y cromo, mejoran sus propiedades y su soldabilidad se complica CE. [14].

TABLA I

COMPOSICIÓN DE UN ACERO HSLA.

Muestra	Composición Química en %										C.E.
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	
½"	0.24	1.31	0.19	0.021	0,032	0,05	0,05	0,01	0,22	0,01	0,47

### C. Transformaciones Microestructurales en la Soldadura y Manufactura.[5]

- Las transformaciones alotrópicas se acrecientan en la zona fundida (ZF) y en la zona afectada por el calor (ZAC) al realizarse la soldadura (ver fig. 1).
- Promueven problemas en las etapas de manufactura como (fragilización en frío y/o en caliente).
- Generan problemas en la calidad del producto; por ejemplo, propagando grietas, pérdida de resistencia a la corrosión, fluencia, etc.

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.417>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

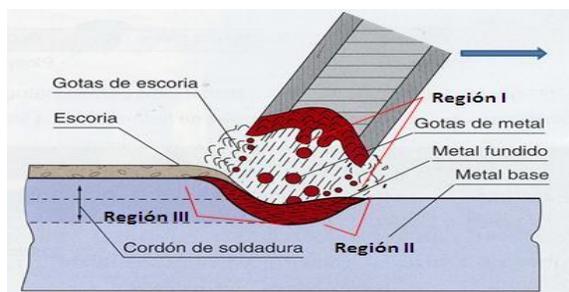


Fig.1 Soldadura SMAW y sus Regiones

D. La Metalurgia de la Soldadura

Las solubilidades en el metal líquido - sólido (Fe - δ) son 27,7 y 7,8 ml/100g. Estos valores dependen de los elementos aleantes, como el C, B, Si y Al; que reducen la solubilidad del hidrógeno, mientras que el Mn, Ni y Cr que incrementan su solubilidad [8]. Se toman las precauciones siguientes:

- Limpieza del material a soldar, eliminando óxidos, grasas y contaminantes que puedan generar poros en la soldadura (ver fig.2).
- Usar procesos con protección gaseosa, cuya composición y pureza sea adecuada.
- Use electrodos revestidos secos de acuerdo con indicaciones del fabricante.
- Aplicar parámetros correctos durante el proceso.

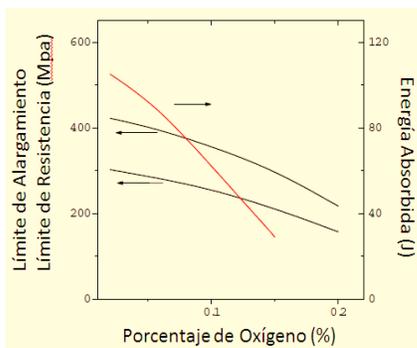


Fig. 2 Presencia de poros, efectos negativos en las propiedades [6]

E. Factores que Participan en la Formación del Ciclo Térmico.

- El aporte de calor neto
- El espesor del metal base a soldar
- Tipo de junta
- Propiedades térmicas del material
- Temperatura inicial del metal base a soldar
- Diámetro de electrodo

TABLA II

GASES QUE PUEDEN OCASIONAR POROS EN LA SOLDADURA [21]

Gas	Origen	Materiales
H <sub>2</sub>	En la atmósfera, humedad de los electrodos, superficies oxidadas, suciedad o material orgánico en los revestimientos de los electrodos, aceite o grasa, etc.	Aceros, Aluminio
N <sub>2</sub>	Contaminación por la atmósfera	Aceros, Níquel, Cobre
CO	De la reacción: $C + O \rightarrow CO$ $FeO + C \leftrightarrow Fe + CO$	Aceros, Níquel
H <sub>2</sub> O	De las reacciones: $Cu_2O + H_2 \rightarrow 2Cu + H_2O$ $FeO + 2H \leftrightarrow Fe + H_2O$	Cobre y Aceros
H <sub>2</sub> S	De la reacción: $S + H_2 \leftrightarrow H_2S$	Aceros
CH <sub>4</sub>	De la reacción: $Fe_3C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 + 3Fe$	Aceros

F. Control del hidrógeno en la Soldadura.

La Weld Metal Hydrogen Levels and the Definition of Hydrogen Controlled Electrodes, clasifica la ocurrencia de grietas al frío en base a la cantidad de hidrógeno difusible en ml por 100 g de metal, como se ve [11] [20]:

- Muy Bajo, entre 0 a 5 ml/100 g
- Bajo, entre 5 a 10 ml/100 g
- Medio, entre 10 y 15 ml/100 g
- Alto, mayor de 15 ml/100g.

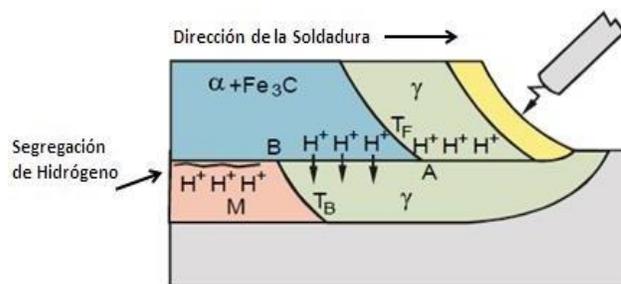


Fig. 3 Migración de Hidrógeno en un cordón de soldadura.

En la fig.3 del proceso SMAW se observa la migración del hidrógeno difusible a través de la zona de soldadura formada.

G. Efecto de la Microestructura

Durante la soldadura se forman microestructuras diversas en las tres zonas de la soldadura (ZF, ZAC y MB [20][2]).

- *La Ferrita Primaria, P<sub>f</sub>* que se forma entre los 1000 y 700°C con bajas tasas de enfriamiento.
- *Ferrita Secundaria Alineada. FS(A)*. se forma entre los 700 y 650°C con bajo enfriamiento.
- *Ferrita Acicular, AF*, que se forma por debajo de la temperatura de 650°C.
- *El agregado de carburo de ferrita, FC* donde la bainita está encuadrada, por lo tanto, indeseable.
- *La martensita, M*, por sus características de alta dureza y fragilidad [19].

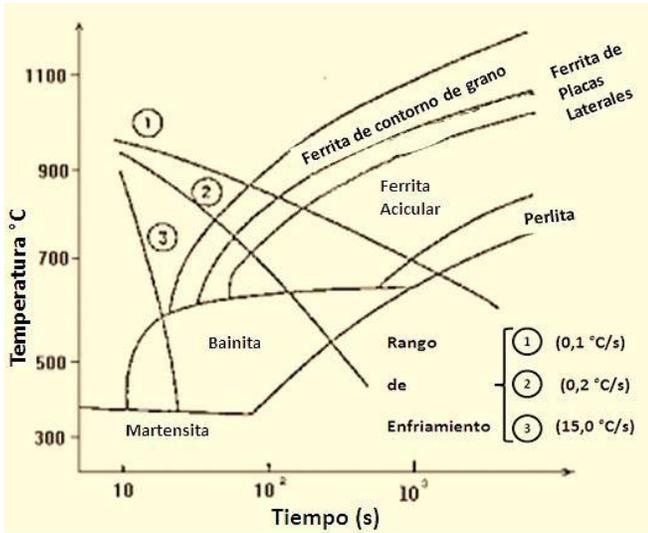


Fig. 4 Diagrama TTT mostrando el efecto de los tres rangos de enfriamiento en la formación de microestructuras [20].

#### H. Efecto de la Composición Química

Los diferentes aleantes, son importantes en la formación de las microestructuras y por lo tanto no se dejan de lado en la formación de fisuras al frío, especialmente cuando se mejora su dureza.

Pero es mediante el Carbono Equivalente que se puede evaluar la influencia de la composición química en la formación de fisuras; por ello, el International Institute of Welding (IIW), considera la siguiente ecuación:

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

Si el Carbono Equivalente (CE) del acero micro aleado es mayor del 0,4 existe la posibilidad de la presencia de fisuras en frío, ver fig.6 [8].

La presencia de cada elemento aleante es como sigue:

- *Carbono*, su porcentaje en aceros micro aleados es de 0,05 a 0,15 controla formación de carburos que

favorecen la presencia de ferrita acicular, en vez de ferrita primaria en contorno de grano.

- *Manganeso*, refina la microestructura, en porcentajes de 1,5 formando ferrita acicular; normalmente aumenta la dureza en la soldadura (ver fig.5).
- *Silicio*: Es el principal desoxidante en la soldadura, no es muy efectivo en la formación de ferrita acicular. Ito y Bessyo (1969) [4] demostraron que aumenta la templabilidad del acero y sus aleaciones.
- *El Niobio, Vanadio y Titanio son fuertes formadores de nitruros y carburos*. Pequeñas partículas de carburos estables tienden a retenerse o anclar el movimiento de los contornos de grano, resultando una microestructura más refinada debida a la dificultad de crecimiento de los granos [14].

#### C. Efecto de la Temperatura

La difusión del hidrógeno en una junta soldada, ocurren a temperaturas inferiores a 200°C, siendo su valor crítico aprox. a los 30°C, por eso para que no exista fisuras o grietas debe mantenerse temperaturas por encima de 200°C durante el mayor tiempo posible.

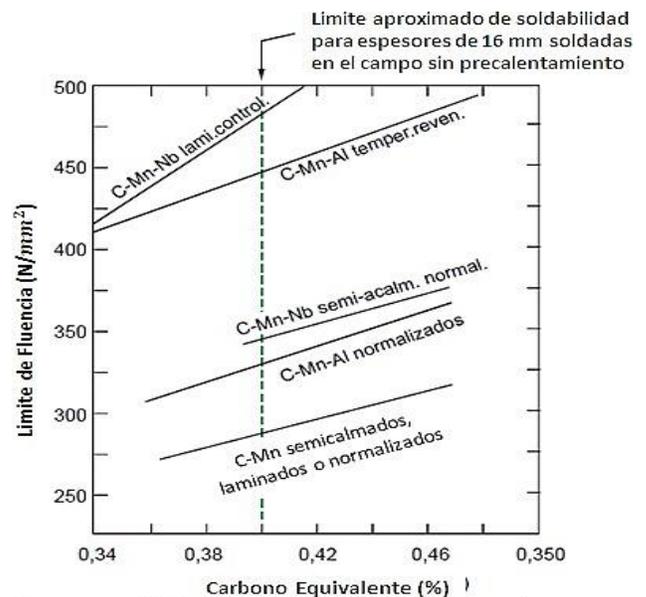


Fig.5 Relación entre el CE y el límite de fluencia para aceros estructurales, definiendo su Buena soldabilidad [10]

*Nivel de Tensión*, se deben a las variaciones de temperatura que sufre el metal aleado al realizarse una soldadura, el brusco incremento de la temperatura genera dilataciones y luego contracciones en el metal base al momento de enfriarse, originando desde luego tracciones internas por ende discontinuidades.

En el diagrama de Graville se visualiza tres zonas:  
I- Fácil; II- Mediano y III- Difícil soldabilidad de los aceros aleados.

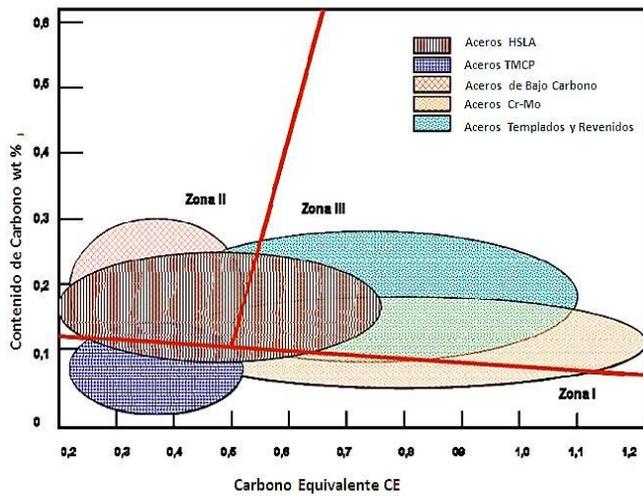


Fig. 6 Diagrama de Graville, soldabilidad de los aceros en función de su CE y del contenido de C. HSLA: Aceros de alta resistencia y Baja aleación. TMCP: Proceso Termo mecánico Controlado. (LIU,2002). [8].

### III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se ha propuesto todo un procedimiento a nivel global y específico, con la finalidad de establecer las partes críticas para solucionarlos con prevención, en la ejecución de la experimentación.

#### A. Reconocimiento De Los Materiales

Los aceros utilizados en la experimentación y cuyas composiciones químicas y propiedades mecánicas observadas en la tabla 3 y 4 se obtuvieron de la empresa Aceros Arequipa.

TABLA III

ENSAYOS MECÁNICOS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS A36 [23]

Propiedades		Composición Química													
Mecánicas															
L.F.	R.T.	%A	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V	Nb	N
35,9	50,8	26,5	0,20	0,43	0,23	0,06	0,013	0,04	0,04	0,01	0,08	0,17	0,003	0,00	37,3

TABLA IV

ENSAYOS MECÁNICOS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS A615 [23]

Propiedades		Composición Química													
Mecánicas															
L.F.	R.T.	%A	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V	Nb	N
44,4	71,	14,	0,4	0,9	0,2	0,01	0,03	0,1	0,0	0,0	0,2	0,3	0,00	0,00	107,
8	6	4	8	3	4	6	1	7	1	4	6	2	1	2	

#### B. Preparación del Procedimiento General

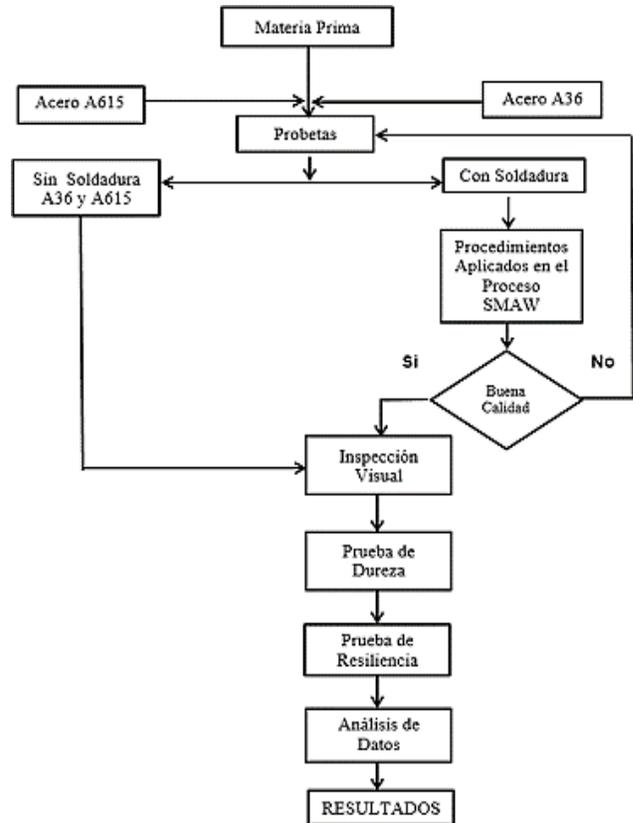


Fig.7: Preparación de las muestras y el análisis de resultados.[21]

Preparación específica de muestras, para formar las probetas y el soldeo experimental [15][17][18]:

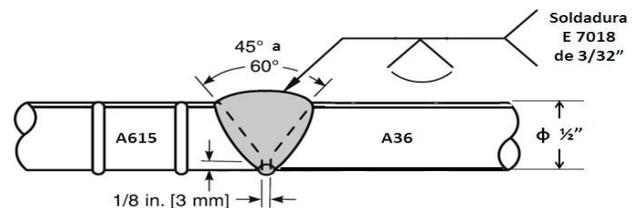


Fig.8 Parámetros en la preparación de las probetas

#### C. Procedimiento de Experimentación

Utilizando el proceso SMAW calibrado, materiales identificados, procedimientos optimizados, se realizan las uniones y depósitos de soldadura para luego en base a las inspecciones realizadas se somete a los ensayos de soldabilidad y luego realizar los acercamientos estadísticos, como indica la fig. 9.

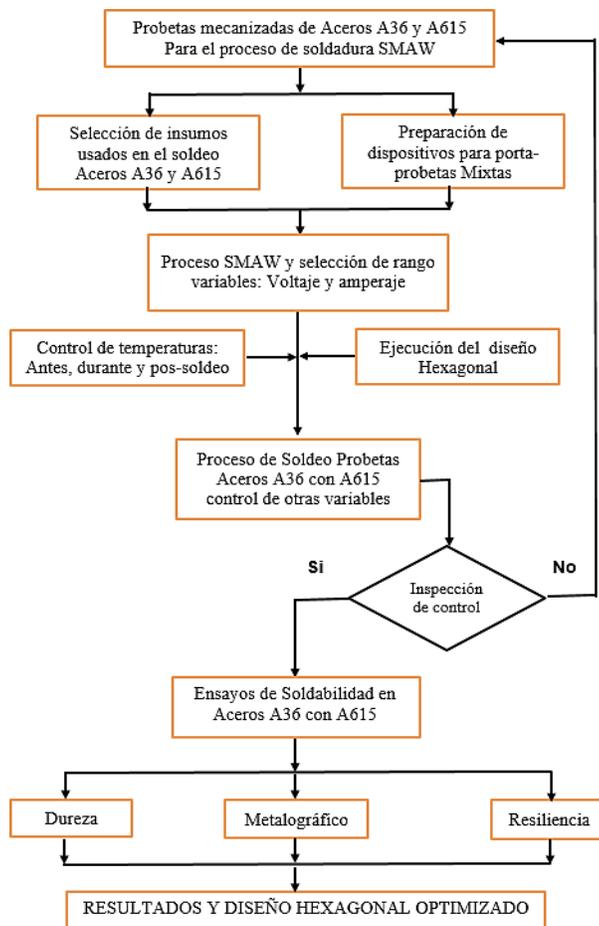


Fig. 9: Proceso de soldeo aplicado a probeta A36 - A615 [21]

TABLA V

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE MATERIALES EN LA FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS SOLDADAS [22]

Tipo	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	V
AST M A36	0,20	0,43	0,06	0,013	0,08	0,04	0,04	0,04	0,01	0,002
AWS E-7018	0,05	0,43	0,02	0,02						
ASTM A615	0,44	0,98	0,23	0,014	0,036	0,24	0,07	0,11	0,01	0,002

#### Equipos e Instrumentación en la experimentación

- Multímetro (calibre de amperaje y voltaje)
- Cronometro, tiempo de soldeo
- Maquina de soldar Miller multiproceso
- Equipo de desbaste, para la preparación de probetas
- Sierra sinfín para corte de metales
- Equipo de lijado y pulido,
- Durómetro IDENTEC
- Pirómetro infrarrojo
- Equipo LEIZIG de Ensayos Charpy
- Microscopio Óptico
- Software Statgraphics/Centurión licencia de 30 días.

#### D. Experimentación

De acuerdo con experiencias y procedimientos de las normas AWS código D1.1 se prepararon tres juegos de nueve probetas con varillas de  $\varnothing \frac{1}{2}$ " de 24 cm de longitud tanto del acero A36 y el A615, para luego mecanizarlos y seccionarlos en dos partes iguales con un chaflan de  $30^\circ$ . Presentación mixta de probetas con una abertura de la raíz en 3 mm. ver fig.10.



Fig. 10: Preparación de probetas para la experimentación.

#### Soldabilidad del acero A615

Mediante la utilización del Carbono equivalente del acero A615 y aplicando el diagrama de Graville se obtiene un acercamiento acerca de la dificultad en la soldabilidad de este acero.

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

Se obtiene el CE = 0,485

En el diagrama de Graville, este acero se ubica en la segunda zona por lo tanto tiene una mediana soldabilidad.[20]

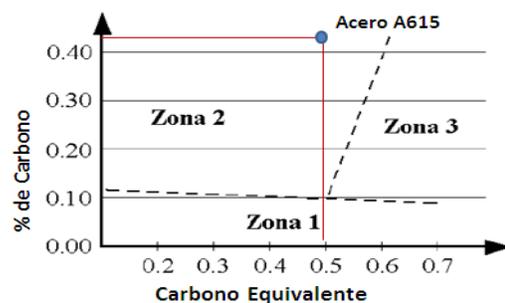


Fig. 11: Ubicación del acero A615 en diagrama de Graville

#### Temperatura de Pre calentamiento

Debe controlarse las temperaturas del metal base antes, durante y después de la soldadura. Pero de acuerdo a los

parámetros (amperaje, voltaje y velocidad de avance) dentro de la ejecución del proceso de soldadura y el material [25]. De ahí una de las formas de prevenir el endurecimiento del acero A615 es aplicar un precalentamiento, que permitirá un enfriamiento controlado; entonces, recurrimos al método Seferian, con las siguientes 4 fórmulas. Siendo:

$T_p$  = Temperatura de precalentamiento

$C_T$  = Carbono equivalente total

$C_q$  = Carbono equivalente químico y

$C_e$  = Carbono equivalente de espesor

$$T_p = 350 \sqrt{C_T - 0,25} \quad (2)$$

$$C_T = C_q + C_e \quad (3)$$

$$C_q = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \quad (4)$$

$$C_e = 0,005 e \quad (5)$$

La temperatura de precalentamiento ( $T_p$ ) encontrada es:

$$C_q = 0,566 \text{ y } C_e = 12,7 \text{ mm. es de } 206,5^\circ \text{C}$$

#### Secado de los Electrodo

Los electrodos E 7018 de 3/32" de diámetro, son secados a 120°C de acuerdo con las especificaciones indicadas por el fabricante para eliminar el exceso de humedad del revestimiento.

TABLA VI

RANGO DE PARÁMETROS APLICADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Pases en barra N°4 (Ø ½")	Diámetro Electrodo (Pulg.)	Corriente Continua (+) Proceso SMAW		Velocidad mm/s	Temperatura de Precalentamiento °C	Calor de Aporte J/mm
		Amperaje	Voltaje			
1 a 6	3/32	77.5 - 82.6	21 - 25	3,5	150 - 200	413,00

#### Precalentamiento de la probeta A615 y A36

La temperatura de 180°C se aplicó en el metal base, se controló como precalentamiento, en los interpasos y al finalizar la soldadura; luego se introdujo en un recipiente con cal viva, para lograr un enfriamiento lento y así prevenir el agrietamiento (ver fig.12).



Fig. 12: Soldeo de los aceros A615 con A36 [21]

#### Planeamiento para la Ejecución Experimental

Se consideró el Factorial Fraccionario (de tres puntos centrales), con la finalidad de encontrar la linealidad de los resultados. La realización de los ensayos fue dada por el estadístico, generando un ordenamiento patrón (solo se trabajará en la zona del cordón) [9][12].

TABLA VII  
PLANEAMIENTO DE EJECUCIÓN EXPERIMENTAL

Pruebas	Escala Codificada		Escala Decodificada		Variables Respuesta			
	X1	X2	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Durezas HRA			Resiliencia Cordón
					Zona A615	Zona Cordón	Zona A36	
1	1	0	24.9	80	59,5	53,7	48,7	14,1
2	0,5	0,8666	23.675	82.598	52,5	49,0	47,0	13,0
3	-0,5	0,8666	21,225	82.598	59,6	44,2	49,7	13,2
4	-1	0	20	80	58,0	45,0	48,2	14,6
5	-0,5	0,8666	21,225	77.402	58,2	53,7	49,4	14,5
6	0,5	0,8666	23.675	77.402	53,2	52,1	49,9	14,0
7	0	0	21	80	58,8	57,0	49,8	15,0
8	0	0	21	80	58,3	55,5	50,2	14,2
9	0	0	21	80	58,5	56,0	48,7	14,7



Fig.13 Probetas soldadas de A615 y A36 [21]

#### Evaluación Visual y de verificación

Después del enfriamiento en cal viva, se procedió a realizar una inspección visual, verificando especialmente la presencia de poros e inclusiones segregadas discontinuidad que genera rechazo de las probetas [7][19].

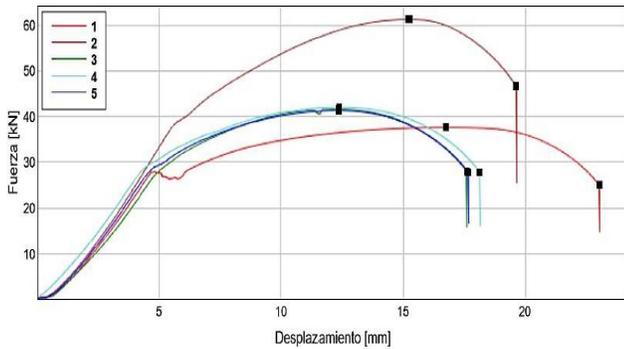
Luego se complementó con unos ensayos de tensión en probetas sin soldadura y con soldadura para conocer los rangos de resistencia de la soldadura comparados con las sin soldadura y finalmente someterlos a las pruebas respuesta (Dureza y Resiliencia).



Fig. 14: Macrográficas 10X donde el A36 es casi similar al metal base y el A615 es más oscura.

### Ensayo de Tensión

Se ensayó probetas sin soldadura de A615 (1: rojo oscuro) y el A36 (2: rojo claro) que relacionados con tres probetas soldadas (3,4,5), los ensayos de tensión de estas última determinaron rangos de resistencia superiores a lo mostrado por el acero estructural A36 sin soldadura, siendo por lo tanto aceptables. [3][24]. (ver figuras 15,16,17).



	Deformación por tracción (Desplazamiento) distancia inicial [mm]	Máximo Fuerza [kN]	Desplazamiento al Máximo Fuerza [mm]	Esfuerzo de tracción Máximo Fuerza [MPa]
1	100.01	37.64	16.76	479.19
2	100.01	61.25	15.22	779.89
3	100.02	41.62	12.37	529.93
4	100.02	42.03	12.37	535.18
5	100.02	41.34	12.37	526.34

Fig 15: Ensayo de Tensión, dos Probetas sin soldadura y con soldadura: 1) Acero A36 es de más baja resistencia; 2) Acero A615 de mejor resistencia; Tres Probetas con soldadura 3), 4) y 5) coinciden sus resistencias.



Fig. 16: Probetas de acuerdo a Norma ASTM E8.[15][16]



Fig. 17: Probetas preparadas y procesadas, con rotura fuera de la zona de soldadura y de la zona ZAC. [21]

### Prueba de Dureza

Estas pruebas se desarrollan con la Norma ASTM E18, en áreas desbastadas y pulidas, donde el indentador de punta de diamante de 120° bajo una carga de 60 kg. Penetra en el material diferenciando las diversas zonas de la soldadura.

### Prueba de Resiliencia

Prueba que cuantifica la tenacidad, ósea la capacidad que tiene el material para absorber la energía al deformarse plásticamente antes de fracturarse.



Fig. 18: Durómetro INDENTEC y equipo de Resiliencia LEIZIG

### Probeta sometida a la resiliencia [4]



Fig.19: Probeta fracturada A36-A615 dúctil y tenaz

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de soldadura, el calor desprendido por la fuente de caldeo debido al efecto de Joule-Lenz, no solamente sirve para fundir el metal del baño, sino que también diluyen a los fundentes, quienes cumplen funciones de limpieza y que posteriormente serán escorias, así mismo calientan, ionizan a los gases del mismo material que se suelda, esta elevada temperatura y gases presentes después de cumplir sus funciones, se disiparán en el medio ambiente.

Las consecuencias de un calentamiento irregular, permite que los elementos o probetas que están siendo soldados se distorsionen o deformen por efecto de la solidificación (cristalización) irregular generando tensiones internas, debido al comportamiento anisotrópico de los metales; todo esto modifica sus propiedades especialmente su resistencia mecánica, por causa de no tener un procedimiento adecuado de al ejecutar un proceso de soldadura; es así, se debe controlar la velocidad de enfriamiento porque es el causante del temple de los aceros, o quizás la retención de gases, o quedaron ocluidos residuos de escoria que no cumplieron sus funciones, posibilitando la formación de poros y/o microgrietas dentro de una unión soldada.

En esta experimentación se captura las experiencias realizadas en una factorial completa en un proceso SMAW; entonces, aquí estamos complementando los experimentos en la superficie de respuesta, realizando mayores acercamientos en los ensayos, con la aplicación de parámetros selectos e incidentes.

### A) Modelamiento y Optimización

Se aplicará el diseño hexagonal con el planeamiento 2<sup>2</sup>, ya que se cuenta con sus respectivos niveles para su modelamiento.

TABLA VIII  
VARIABLES DEL DISEÑO HEXAGONAL

Variables	Nivel Menor	Nivel Mayor
Voltaje	20	24.9
Amperaje	77.402	82.598

### B) Trabajando con la Dureza:

TABLA IX  
ANÁLISIS DE VARIANZA: ZONA CORDÓN POR SU DUREZA (HRA)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Voltaje	35.3633	1	35.3633	17.09	0.0257
B: Amperaje	39.69	1	39.69	19.18	0.0220
AA	55.7603	1	55.7603	26.94	0.0139
AB	10.24	1	10.24	4.95	0.1126
BB	47.3763	1	47.3763	22.89	0.0174
Error total	6.20833	3	2.06944		
Total (corr.)	177.52	8			

Donde se obtiene: R-cuadrada = 96.5027 por ciento (el error es bajo (100-96.50) = 4% por lo tanto se acepta el modelo y todo su análisis.

## EFFECTOS EN RELACIÓN CON LA DUREZA

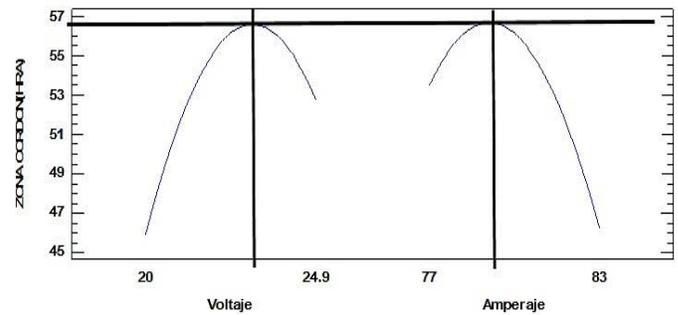


Fig. 20: Efectos principales en la zona del cordón con relación a su dureza 56,9 (HBA).

Los valores aproximados se pueden contrastar en estos contornos de la superficie de respuesta, donde nos presenta la línea vertical un voltaje de 23 y un amperaje de 80.

Por lo tanto: El Modelo Estadístico de la Zona del Cordón en base a su Dureza es:

$$\text{ZONA CORDON(HRA)} = -4016.15 + 12.1722 * \text{Voltaje} + 99.2112 * \text{Amperaje} - 1.13564 * \text{Voltaje}^2 + 0.502742 * \text{Voltaje} * \text{Amperaje} - 0.698189 * \text{Amperaje}^2$$

### Optimizando Respuesta

- Meta: maximizar ZONA CORDON su dureza (HRA)
- Valor óptimo = 56.9157

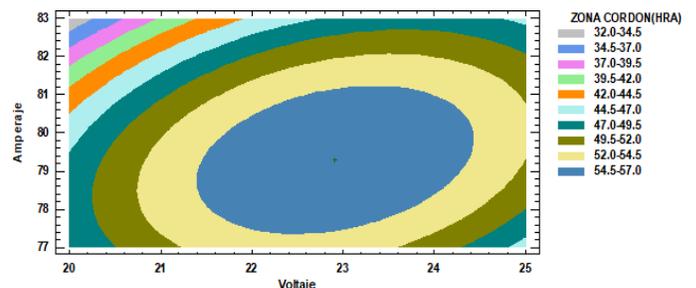


Fig.21: Contorno de Superficie de Respuesta es 22,9 v. y de 79,6 amp.

Para una dureza estimada en la zona del cordón.

TABLA X  
VALORES ÓPTIMOS DE ACUERDO CON LA DUREZA

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Voltios	20.0	24.9	22.9108
Amperaje	77.402	82.598	79.2972

Es para un Valor óptimo de dureza = 56.9157

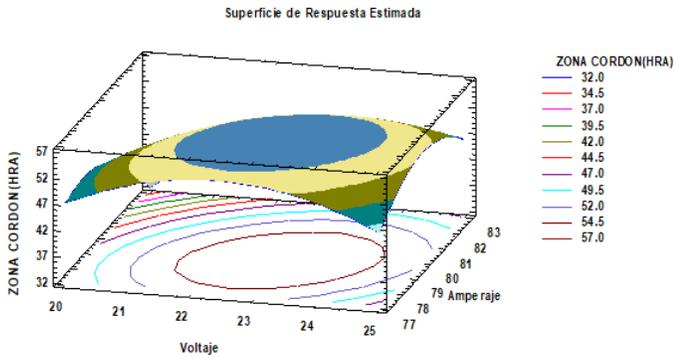


Fig. 22: Superficie de Respuesta Estimada de Dureza en la zona del cordón

Entonces se dispone de un rango de durezas obtenidas experimentalmente; es así, si se quiere tener una dureza de 56.91 se deberá trabajar con 23 de Voltaje y 80 de Amperaje.

### C) Trabajando con la Resiliencia

TABLA XI

ANÁLISIS DE VARIANZA: ZONA CORDÓN PARA LA RESILIENCIA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razon-F	Valor-P
A: Voltaje	0,240833	1	0,240833	2,17	0,2374
B: Amperaje	1,3225	1	1,3225	11,9	0,0409
AA	0,0963333	1	0,0963333	0,87	0,4205
AB	0,0225	1	0,0225	0,2	0,6832
BB	1,68033	1	1,68033	15,12	0,0301
Error total	0,333333	3	0,111111		
Total (Corr.)	3,60222	8			

Donde: R-cuadrada = 90.7465 por ciento (el error es bajo (100-90.70) =10% se acepta el modelo y todo su análisis.

### EFFECTO EN RELACIÓN CON LA RESILIENCIA

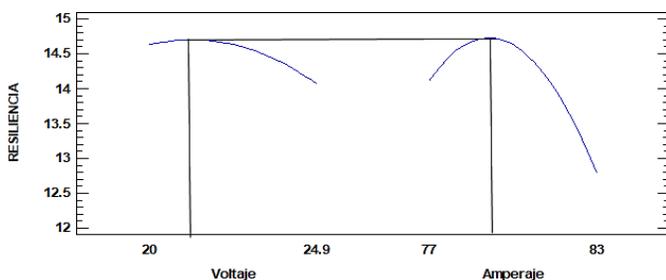


Fig. 23: Efectos principales en el cordón para la Resiliencia

En la gráfica de efectos se muestra claramente que no se debe variar el voltaje de: 21 y del amperaje de: 80, ya que no se obtendría una resiliencia de 14.5 como valor adecuado.

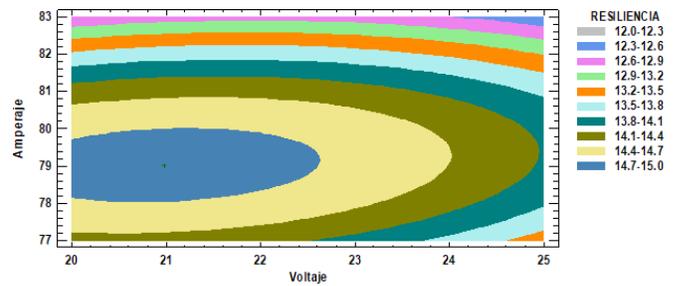


Fig. 24: Contorno de superficie de Respuesta Estimada para la Resiliencia

En la gráfica de contorno se refleja una región óptima que debe ser entre 20 a 22 voltios y un amperaje de 78 a 79,5 amperes. Para una región de Resiliencia de 14.7 a 15.00

El Modelo Estadístico de Resiliencia en el cordón es:

$$\text{RESILIENCIA} = - 788.061 + 0.118468 * \text{Voltaje} + 20.2879 * \text{Amperaje} - 0.0472026 * \text{Voltaje}^2 + 0.023566 * \text{Voltaje} * \text{Amperaje} - 0.131489 * \text{Amperaje}^2$$

Siendo el Valor óptimo de Resiliencia de = 14.8259

TABLA XII

VALORES ÓPTIMOS DE ACUERDO CON LA RESILIENCIA

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Voltaje	20.0	24.9	20.9807
Amperaje	77.402	82.598	79.0263

Por tanto, para una resiliencia de 14.8 se necesita un voltaje de 20.98 y un Amperaje de 79.02

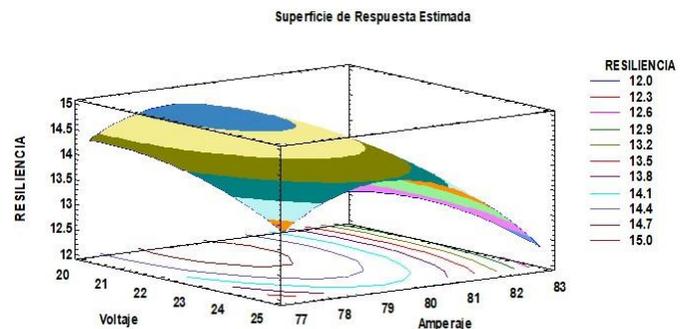


Fig. 25: Superficie de respuesta estimada de resiliencia en la zona del cordón. Voltaje: 21; Amperaje: 79.

Entonces, los valores optimizados para una resiliencia de 14.8 se debe regularse con un voltaje de 21 y 79 amperios.

## V. CONCLUSIONES

- a) Con la aplicación del Diseño hexagonal, se consigue un mayor acercamiento de los parámetros de soldabilidad, previniendo discontinuidades en la soldadura de los aceros ASTM A615 y A36 empleados en el proceso SMAW, y se obtiene productos de calidad, confiabilidad y se incrementa la productividad en la industria.
- b) Con un buen control de los parámetros operacionales y de procesos, se mejora los procedimientos en la soldabilidad de los aceros, logrando mejorar los estándares en los ensayos mecánicos de metales unidos por soldadura.
- c) Se determinó que las variables voltaje y amperaje son incidentes y se logró los mejores acercamientos, de estas variables en base a los resultados en sus propiedades mecánicas, como es la Dureza y Resiliencia.
- d) Se obtuvo modelos matemáticos o estadísticos optimizados, para poder desarrollar un procedimiento metodológico seguro, de acuerdo con los Códigos y Normas establecidas por la AWS y la Metalurgia.

## VI. TRABAJO FUTURO

Es necesario lograr la calibración y eficiencia de cada máquina de soldar por arco, para generar su real bondad productiva, se debe realizar acercamientos estadísticos en cada uno de los equipos con la finalidad de conseguir buenos resultados en la unión de los diversos tipos de metales.

## RECONOCIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú, por dar las facilidades en la obtención de datos a través de los Laboratorios de Soldadura y Conformado de Metales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

## REFERENCIAS

- [1] H. dos Santos, A. Gabriel Wiedenhof, e G. Fuhr Santiago, "Avaliação de Juntas Soldadas pelo Processo Gmaw", Siepe, vol. 9, nº 2, mar. 2020.
- [2] E. Sarni, M. Junqueira, Avaliação macro e microestrutural em metal de solda de juntas de aço estrutural temperado e revenido, soldadas pelo processo a arco elétrico com proteção gasosa (gmaw), em modo convencional e pulsado, utilizando eletrodo de alma metálica (metal cored)" *Academus*, Vol. 6 Nº1, 2018.
- [3] S. M. Rodrigues, Estudo do comportamento microestrutural e mecânico de juntas soldadas entre aços de alta resistência – Domex 700 MC. In: *Coloquium Internacional SAE Brasil de Suspensões e Implementos Rodoviários & Mostra de Engenharia*, 7., 2012, Caxias do Sul. Artigo. Caxias do Sul: SAE, 2012.
- [4] Z. Zhao, P. Xu, H. Cheng, J. Miao and F. Xiao, "Characterization of Microstructures and Fatigue Properties for Dual-Phase Pipeline Steels by Gleeble Simulation of Heat-Affected Zone", *Materials* 2019, *12*, 1989. <https://doi.org/10.3390/ma12121989>
- [5] M. Rodríguez, J. Rodríguez, "Se debe evitar la Soldadura de Barras de Refuerzo en Estructuras de Concreto Reforzado en Zonas Sísmicas de México", *Revista de Ingeniería Sísmica* Nº 75 69-94, UNAM, 2006.

- [6] J. Paulo Modenesi, "Soldabilidade Algumas Ligas Metálicas", Material de apoio do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Belo Horizonte; Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [7] S. Singh, "Analysis of various defects involved in welding metallurgy", *International Journal of Pure and Applied Mathematics* Vol. 120, Nº 6, 2018.
- [8] Zainul Huda, *Metalurgy for Physicists and Engineers. Fundamentals, Applications, and Calculations.* by Taylor & Francis Group, LLC. London-New York, © 2020.
- [9] D. Taguchi, *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize.* UNIPUB. Nueva York. 1987
- [10] *Welding Science and Technology Welding Handbook.* AWS Tomo I. U.S.A., 2001.
- [11] M. Eroglu, M. Askoy. Effect of Initial Grain size on Microstructure and Toughness of Intercritical HEAT-Affected Zone of a Low Carbon Steel *Materials Science and Engineering* p. 289-297, 2000.
- [12] C. Douglas, *Montgomery Diseño y Análisis de Experimentos.* Ed. Limusa pg. 170 – 301, Arizona.
- [13] ASTM A36 / 36M. Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.], 2008, 4p.
- [14] E. Silva, Z. Aguila and V. Lima, "Avaliação da suscetibilidade à sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos", *Proc. of LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 2018.
- [15] ASTM E8 / 8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2021.
- [16] ASTM A615/A615M-09b Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement, 2018.
- [17] ASME E23. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, 2007.
- [18] AWS D1.4/D1.4M, Structural Welding Code-reinforced Steel, 2011.
- [19] Y. A. Iparraguirre, *Metalografía y Propiedades de los Metales Industriales* CONCYTEC, Lima 1996.
- [20] C. Fosca, *Metalurgia de la Soldadura.* Pontificia Católica. Lima 2007.
- [21] E. Esquicha, Soldabilidad disímil de los Aceros A36 y A615 por el Proceso SMAW para Obtener Productos de Calidad. 2019. Univ. Nacional de San Agustín de Arequipa.
- [22] Soldexa una compañía ESAB, [www.soldexa.com.pe](http://www.soldexa.com.pe), 2018.
- [23] Corporación Aceros Arequipa S.A., – Perú. [www.acerosarequipa.com](http://www.acerosarequipa.com), 2017.
- [24] Rodrigo Carlesso, Estudo do Comportamento Mecânico de Juntas Soldadas de um Aço de Alta Resistência Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia. Porto Alegre 2017.
- [25] Wilder Ulloa Vásquez, Efecto de la Posición de Soldeo en la Soldabilidad de Barras Corrugadas de Acero ASTM A615. Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ingeniería. Trujillo 2018.