

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA SOLDADURA FLUX CORED ARC WELDING

Alcayaga Rojas, A.

Armada de Chile
aalcayagar@armada.cl

RESUMEN

El acero es uno de los principales materiales que se utiliza en la construcción naval; dentro sus tipos, el acero DH 36, es el utilizado por los Astilleros y Maestranzas de la Armada (ASMAR) para la construcción y reparación de buques que tienen misión de operar en el territorio antártico. Para la unión de este acero se utiliza la soldadura Flux Core Arc Welding (FCAW) 71T1C tubular MIG (Argón – CO₂) y como alternativa, soldadura FCAW 71T1C tubular MAG (CO₂), manteniendo los mismos principios, variando únicamente la protección. El objetivo del estudio es analizar comparativamente las propiedades mecánicas de la soldadura mencionada, utilizando un proceso combinado MIG o MAG en un acero DH 36, con aplicación en construcción naval. Lo anterior se responde sometiendo los materiales a ensayos mecánicos de tracción, impacto, doblado y dureza; luego de los cuales, al efectuar el análisis comparativo de los datos obtenidos, se logra determinar cuál de las dos protecciones tiene mejores propiedades mecánicas.

Palabras claves: Acero DH 36, Soldadura FCAW 71T1C Mig/Mag, Ensayos mecánicos.

1- INTRODUCCIÓN

El acero DH 36, es el tipo utilizado por la empresa ASMAR para la construcción y reparación de buques que operan en la Antártica, debido a sus características mecánicas que lo hacen más resistentes a temperaturas bajo cero (máximo -20 °C), impactos y deformaciones.

Para la unión del acero DH 36, ya sea con protección MIG o MAG, tiene como finalidad cuidar el metal líquido, evitando que el oxígeno y nitrógeno entren en contacto con el metal durante la unión de las planchas de acero, ya que pueden causar deficiencias, porosidades y pérdida de ductilidad de la soldadura.

De acuerdo a lo anterior, la pregunta de investigación que aborda el presente trabajo es la siguiente: ¿Qué ventajas representan las propiedades mecánicas de la soldadura FCAW 71T1C tubular con protección de MIG respecto a la protección MAG, en un acero DH 36?.

El objetivo de estudio es analizar comparativamente las propiedades mecánicas de la soldadura mencionada, utilizando un proceso combinado MIG o MAG en un acero DH 36, usado en construcción naval.

2- MATERIALES Y MÉTODO

El proyecto se desarrolla en base a ensayos mecánicos tal como ensayo de tracción, Charpy, doblado, dureza y ensayos no destructivos (E.N.D.). Para ejecutar lo anterior, se utilizan diversas probetas de acero DH 36 soldadas con material fundente 71T1C y dos tipos de protección, CO2 y Agamix.

La investigación aplicada desarrollada tiene por finalidad obtener el comportamiento mecánico del material analizado, el cual se representa en una probeta construida con el material mencionado, entregando una orientación del futuro comportamiento del material y parámetros de comportamiento del sólido.

Las probetas para los diferentes ensayos se confeccionan bajo normas “American Society for Testing and Materials” (ASTM) por la empresa ASMAR (V), cuyos soldadores se encuentran calificados por la empresa Lloyd’s Register (LR). Para la fabricación de las probetas se realiza la soldadura en posición 4G o de sobre cabeza, con el objeto de quedar certificado bajo todas las condiciones de soldadura. Además, las planchas de acero soldadas son enviadas a la empresa S-Intec para realizar una inspección radiográfica a los materiales, obteniendo resultados satisfactorios, quedando las planchas soldadas en condiciones de ser mecanizadas para realizar la confección de las probetas.

3- RESULTADOS

Posterior a la confección de las probetas, se continua con los diversos ensayos mencionados en los párrafos precedentes, objeto obtener data para efectuar el análisis mecánico.

Ensayo de tracción.

DESAMPARADOS No.201, MUELLE “JUAN MANUEL DÍAZ”,
HABANA VIEJA, LA HABANA, CUBA.
Telef: (53) 7861 0920
ipin@enet.cu

En el ensayo de tracción se utilizaron 24 probetas planas confeccionadas con acero DH 36, de las cuales 12 probetas fueron fabricadas con protección Agamix y 12 con protección CO2. Las probetas de subdimensión fueron diseñadas bajo la norma ASTM E 8. Previo a realizar el ensayo de tracción es necesario marcar la probeta en el centro para distinguir el largo inicial l_0 [mm], y el área transversal inicial A_0 [mm²].

Los datos obtenidos tras el ensayo de tracción por cada probeta son:

Tabla 1. Datos obtenidos del ensayo de tracción

Medición	Protección CO2 N°1	Protección CO2 N°2	Protección Agamix N°1	Protección Agamix N°2
A0	60 mm ²	60 mm ²	60 mm ²	60 mm ²
AF	27,47 mm ²	27,30 mm ²	20,40 mm ²	23,90 mm ²
ΔL	11,0384 mm	9,9411 mm	8,7961 mm	10,5111 mm
Esfuerzo fluencia	400 MPa	385 MPa	440 MPa	418 MPa
Carga máx.	562 MPa	501,33 MPa	571,67 MPa	554.67 MPa
% Reducción de área	54,22 %	54,5 %	66 %	60,17 %
% Elongación	11,04 %	9,94 %	8,80 %	10,51 %
Velocidad	2 mm/min	2 mm/min	2 mm/min	2 mm/min

Tras el ensayo de tracción se obtuvieron cortes planos en las probetas, lo que se puede interpretar como una fractura dúctil.

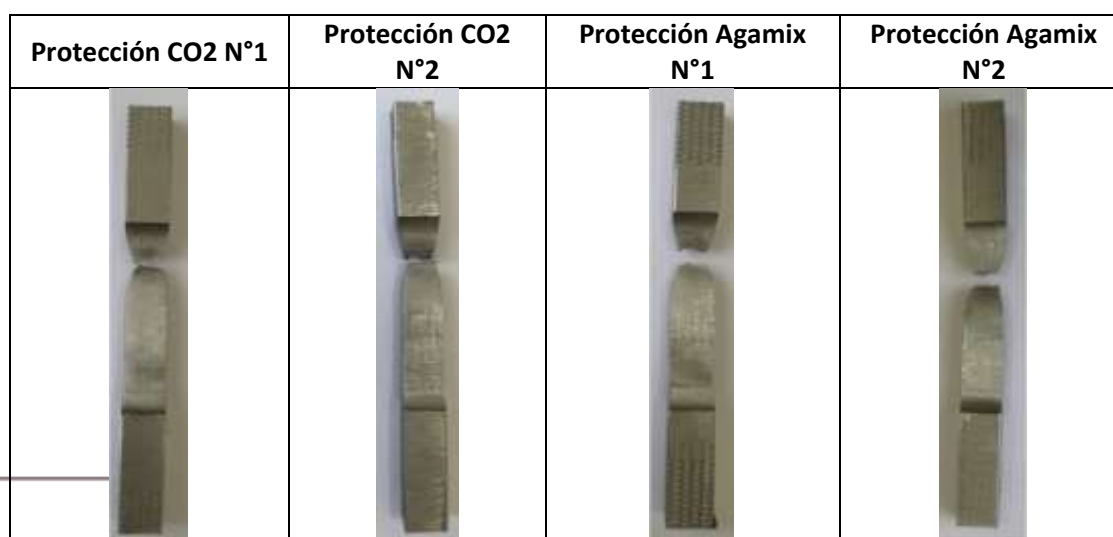


Figura 2. Resultado de las probetas tras ensayo de tracción.

Con el análisis de los datos obtenidos en el ensayo de tracción se graficaron las siguientes curvas, pertenecientes a las probetas con protección de CO₂.

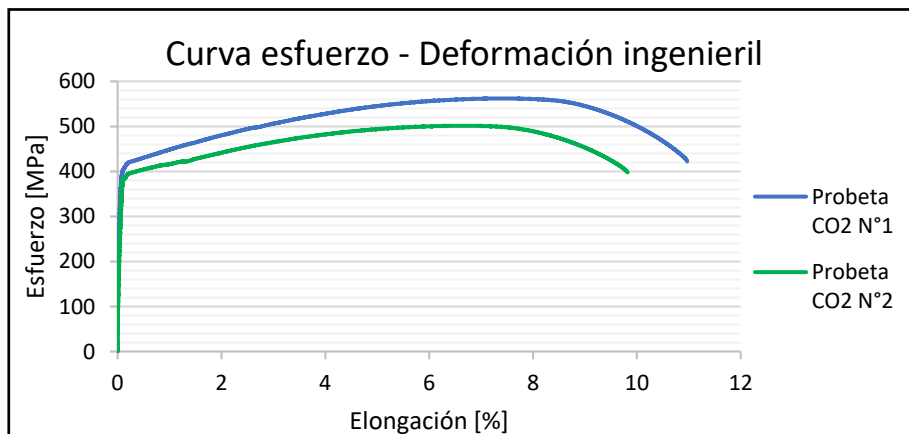


Figura 3. Curva Esfuerzo – Deformación ingenieril probeta de acero DH 36 con protección CO₂.

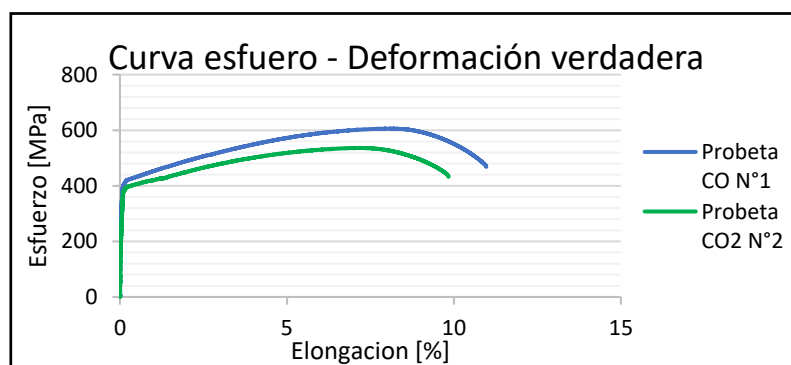


Figura 4. Curva Esfuerzo – Deformación verdadera probeta de acero DH 36 con protección CO₂.

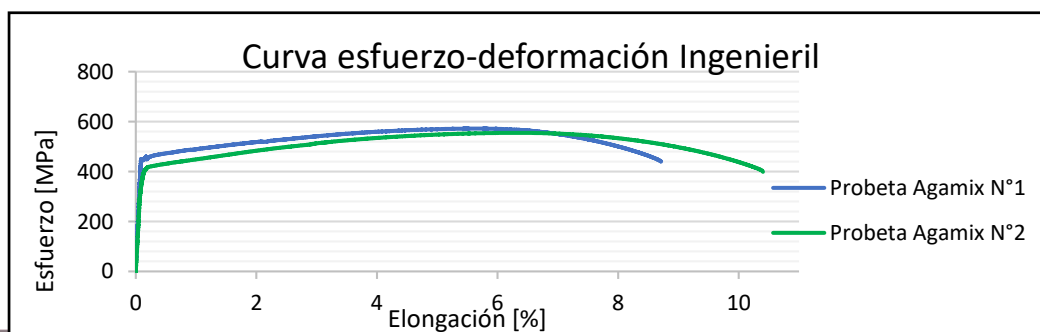


Figura 5. Gráfico esfuerzo deformación ingenieril probeta de acero DH 36 con protección Agamix.

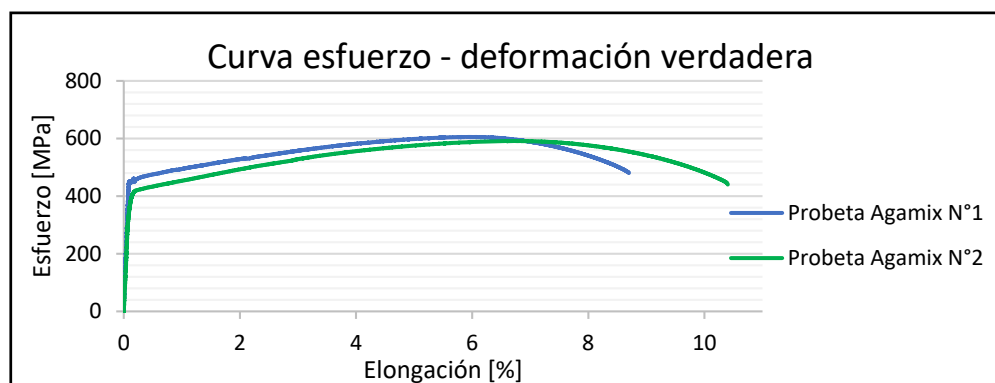


Figura 6. Gráfico esfuerzo deformación verdadera probeta de acero DH 36 con protección Agamix.

Ensayo de Charpy

En el ensayo de Charpy se utilizaron 12 probetas con protección de CO₂ y 12 probetas con protección de Agamix (20% Argón y 80% CO₂). Las probetas fueron diseñadas bajo la Norma ASTM E-23, de 10 mm de ancho, 10 mm de alto y 55 mm de largo, con una muesca en V en el centro de la probeta.

Tabla 2. Resultados obtenidos tras ensayo de Charpy

Temperatura [°C]	Protección			
	CO ₂		Agamix	
	Probeta N° 1 Energía [J]	Probeta N° 2 Energía [J]	Probeta N° 1 Energía [J]	Probeta N° 2 Energía [J]
- 20	30	32	67	69
- 10	82	95	84	86
- 0	141	138	150	132
10	150	150	150	150
20	150	150	150	150

-20°C	-10°C	0° C	10° C
-------	-------	------	-------



Figura 7. Resultados ensayo de Charpy entre -20 [°C] y 10 [°C].

Con los resultados de la tabla precedentes, se obtienen los siguientes gráficos:

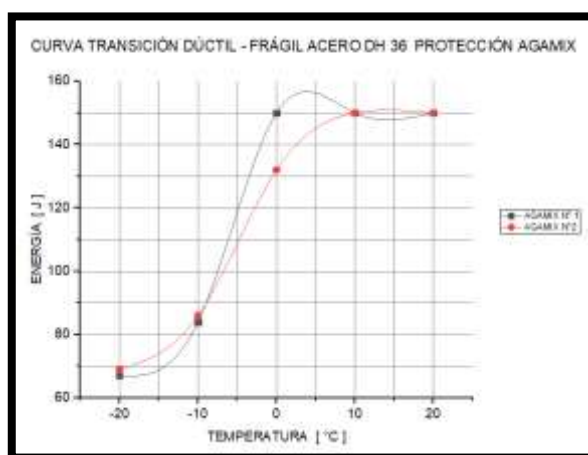


Figura 8. Curva transición dúctil-frágil probeta de acero DH 36 con protección Agamix.

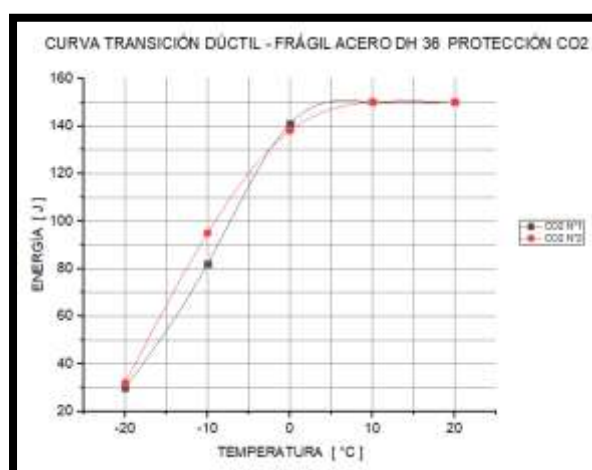


Figura 9. Curva transición dúctil-frágil probeta de acero DH 36 con protección CO₂.

Ensayo de doblado

En el ensayo de doblado se utilizaron 24 probetas, de las cuales 12 probetas son de acero DH 36 con protección de CO₂ y 12 probetas de acero DH 36 con protección de Agamix.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Ensayo de doblado probetas con protección
CO₂.



Ensayo de doblado probetas con protección
Agamix.



Figura 10. Resultado ensayo de doblado.

Ensayo de dureza

En el ensayo de dureza se utilizaron 4 probetas, de las cuales 2 pertenecen a la protección Agamix y 2 a protección CO₂. Se utilizó un cabezal de medición Rockwell B, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. Datos obtenidos ensayo de dureza

Probeta N°1 Agamix		Probeta N°2 Agamix		Probeta N°1 CO ₂		Probeta N°1 CO ₂	
Distancia [mm]	HRB	Distancia [mm]	HRB	Distancia [mm]	HRB	Distancia [mm]	HRB
0	85	0	84	0	82,2	0	81,1
20	84	20	84,5	20	82,3	20	81,1
40	82,7	40	82,2	40	83,4	40	85
50	90	50	87,7	50	88	50	89
60	81,9	60	84,3	60	83	60	84,1
80	83,1	80	80,5	80	80	80	82
100	81,9	100	80,5	100	80	100	82,4

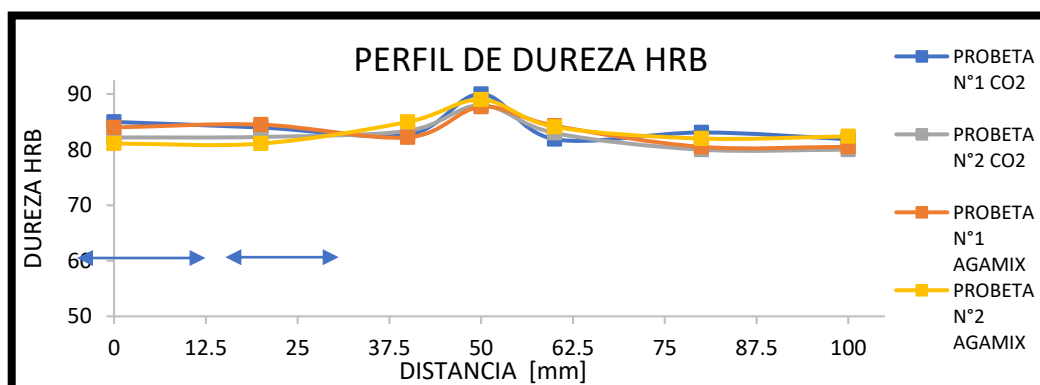


Figura 11. Gráfico de los datos obtenidos en ensayo de dureza.

4- DISCUSIÓN

Tras el ensayo de tracción se obtuvo un comportamiento dentro de los valores esperados de acuerdo con las especificaciones de Lloyd's Register, especialmente en los valores de fluencia, UTS y porcentaje de elongación. Los parámetros obtenidos se representan en la Tabla.

Tabla 4. Resultado general ensayo de tracción

Probetas	Propiedades			
	% ϵ	% A		
CO ₂ N° 1	27,59	52,22	400 MPa	562 MPa
CO ₂ N° 2	24,85	54,50	385 MPa	501,34 MPa
AGAMIX N°1	21,98	66,00	440 MPa	572 MPa
AGAMIX N°2	26,26	60,17	418 MPa	554,67 MPa

Los datos obtenidos en el ensayo de tracción se analizarán de forma promediada entre las probetas de igual protección, comenzando por el análisis del UTS.

Tabla 5. Valor promedio UTS por protección

Protección		
CO ₂	531,67 MPa	490 MPa

DESAMPARADOS No.201, MUELLE "JUAN MANUEL DÍAZ",
HABANA VIEJA, LA HABANA, CUBA.
Telef: (53) 7861 0920
ipin@enet.cu

AGAMIX	563,34 MPa	490 MPa
--------	------------	---------

El esfuerzo de fluencia desarrollado por la soldadura con ambas-protecciones está dentro de los parámetros establecidos por LR, presentando mejor comportamiento mecánico de la soldadura con protección Agamix.

Tabla 6. Valor promedio de por protección

Protección	
CO ₂	392,5 MPa
AGAMIX	429,0 MPa

Al analizar los datos obtenidos, los parámetros están dentro de los valores mínimos exigidos por LR. Al comparar las protecciones, la soldadura con protección Agamix tuvo mayor valor UTS, presentó un valor promedio de 563,34 MPa, que representa la máxima tensión alcanzada por el material antes de iniciar la deformación heterogénea y terminar con la estricción del material, debido a la carga monoaxial a la que fue sometido.

Tabla 7. Valor promedio de porcentaje de reducción de área por protección.

Protección	% A
CO ₂	53,36
AGAMIX	63,09

De acuerdo con los valores promedios obtenidos, la probeta con protección de CO₂ tiene menor reducción de área en comparación con la protección Agamix, por lo que representa tener mejor comportamiento posterior al UTS.

Tabla 8. Valor promedio de porcentaje de elongación por protección.

Protección	% ε
CO ₂	26,22
AGAMIX	24.11

El porcentaje de elongación del material es la diferencia entre el largo inicial respecto del final. El acero DH 36 permite un rango elástico mínimo del 21 %, tras lo cual, las probetas soldadas con ambas protecciones entregaron resultados sobre el mínimo en el porcentaje de elongación, siendo la probeta

con protección CO₂ la que tuvo mejor elongación, además los valores obtenidos se pueden analizar como una buena ductilidad.

Además, de los valores obtenidos por la máquina de tracción se logró determinar la tenacidad del material al obtener el área que se forma bajo la curva dúctil-frágil.

Tabla 9. Valores de tenacidad de las diferentes probetas

Tipo de probeta	T [J/m ³]
CO ₂ N°1	58,92
CO ₂ N°2	47,23
Agamix N°1	47,17
Agamix N°2	54,45

Para analizar los parámetros se deben tomar todos los datos obtenidos y estudiar en conjunto, ya que un parámetro por sí solo puede ser bueno en un aspecto y fallar en otros, considerando que todos los parámetros funcionan de manera sinérgica en el material.

Tabla 10. Resultados finales del ensayo de tracción

Probetas	Propiedades				
	% ϵ	% A			T [J/m ³]
CO ₂ N° 1	27,59	52,22	400 MPa	562 MPa	58,92
CO ₂ N° 2	24,85	54,50	385 MPa	501,34 MPa	47,23
AGAMIX N°1	21,98	66,00	440 MPa	572 MPa	47,17
AGAMIX N°2	26,26	60,17	418 MPa	554,67 MPa	54,45

Tras analizar todos los datos obtenidos y graficados, la soldadura con Agamix probeta N°1 presenta mejor desempeño en cuanto a ductilidad, esfuerzo de fluencia y UST.

Al analizar los resultados del ensayo de Charpy, de acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 4.2, del ensayo realizado a – 20 [°C], se puede determinar que el acero DH 36 soldado con la protección Agamix fue capaz de absorber 67 [J] en la probeta N°1 y 69 [J] en la probeta 2, lo cual es superior a lo absorbido, en las mismas condiciones, por las probetas con protección de CO₂, ya que la probeta N° 1 absorbió 30 [J] y la probeta N°2 32 [J].

Se puede concluir que el acero DH 36 soldado con protección Agamix es menos frágil que el acero soldado con protección CO2.



Figura 12. Resulta de ensayo de Charpy a -20 [°C].

En el ensayo realizado a -10 [°C], el comportamiento fue similar entre ambas protecciones, absorbiendo la misma cantidad de energía, teniendo ambos tipos de protecciones un comportamiento frágil.



Figura 13. Resulta de ensayo de Charpy a - 10 [°C].

En el caso de los ensayos realizados a partir de los 0 [°C] hasta 20 [°C], ambos grupos de estudio tuvieron un comportamiento similar, presentando pequeñas variaciones de energía absorbida, llegando en todos casos a absorber el máximo de energía disponible por la máquina de Charpy.



Figura 14. Resulta de ensayo de Charpy a 0 [°C].



Figura 15. Resulta de ensayo de Charpy a 10 [°C].

Se concluye que la soldadura del acero DH 36 con ambas protecciones, Agamix y CO₂, cumplen con lo mínimo requerido por Lloyd's Register.

Tabla 11. Resultados finales ensayo de Charpy

Temperatura [°C]	Protección			
	CO ₂		Agamix	
	Probeta N° 1 Energía [J]	Probeta N° 2 Energía [J]	Probeta N° 1 Energía [J]	Probeta N° 2 Energía [J]
- 20	30	32	67	69
- 10	82	95	84	86
- 0	141	138	150	132
10	150	150	150	150
20	150	150	150	150

La soldadura con protección Agamix tuvo mejor comportamiento a -20 [°C], siendo capaz de absorber mayor cantidad de energía a esa temperatura, con lo que demuestra tener un comportamiento menos frágil que la soldadura con protección de CO₂.

Análisis ensayo de doblado

Al analizar los resultados tras el ensayo de doblado, todas las probetas de acero DH 36 con protección CO₂ y Agamix cumplieron con lo esperado, **al no presentar fisuras**.



Figura 16. Resultado ensayo de doblado pieza soldada con protección Agamix.



Figura 17. Resultado ensayo de doblado pieza soldada con protección CO₂.

Análisis ensayo dureza

Al analizar los resultados obtenidos tras el ensayo de dureza, se obtuvo que los mayores índices de dureza HRB se encontraron en el cordón de soldadura, siendo la soldadura con protección de Agamix con el mayor índice.

Tabla 11. Resultado ensayo de dureza

Probeta N°1 Agamix		Probeta N°2 Agamix		Probeta N°1 CO2		Probeta N°1 CO2	
Distancia [mm]	HRB	Distancia [mm]	HRB	Distancia [mm]	HRB	Distancia [mm]	HRB
0	85	0	84	0	82,2	0	81,1
20	84	20	84,5	20	82,3	20	81,1
40	82,7	40	82,2	40	83,4	40	85
50	90	50	87,7	50	88	50	89
60	81,9	60	84,3	60	83	60	84,1
80	83,1	80	80,5	80	80	80	82
100	81,9	100	80,5	100	80	100	82,4

Tras realizar el ensayo de dureza, se logró obtener el mayor índice de dureza en el cordón de soldadura desde 87,7 HRB hasta 90 HRB, donde las probetas de Agamix tuvieron mayor índice de dureza y por el contrario las probetas de CO₂ tuvieron el menor índice de dureza.

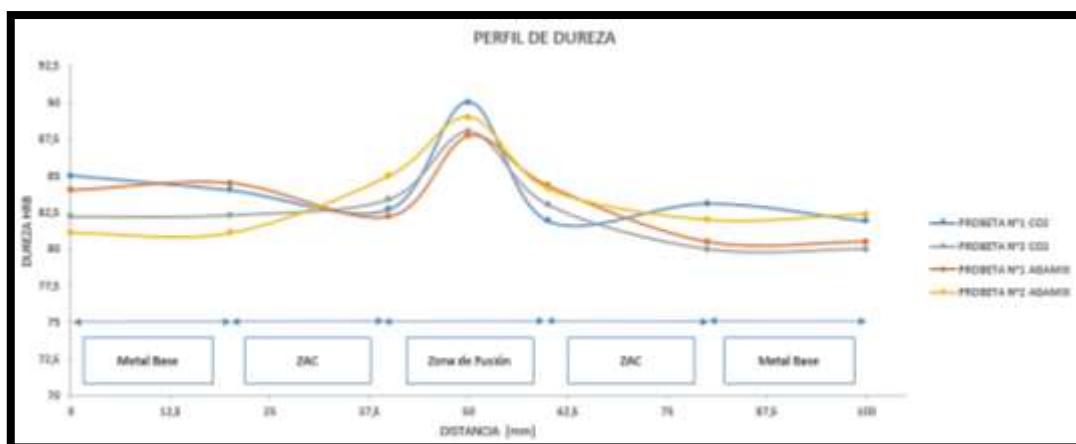


Figura 18. Gráfico de dureza.

5- CONCLUSIONES

Tras realizar los diferentes ensayos descritos en el presente estudio se puede determinar lo siguiente:

En el ensayo de tracción se determinó el comportamiento mecánico que tuvieron las probetas normalizadas al ser expuestas a una carga monoaxial, obteniéndose datos como el esfuerzo de fluencia máximo, UTS, porcentaje de reducción de área y elongación. Todas las probetas sometidas al ensayo de tracción tuvieron una fractura dúctil, siendo las probetas con protección de Agamix las que tuvieron mejores resultados en comparación con la protección CO₂, teniendo mejor UTS (563,34 MPa), límite de fluencia (429 MPa) y reducción de área (63,09 %). Por otra parte, las probetas con protección de CO₂, tuvieron mejores resultados en el porcentaje de elongación con un 26,22 %. Las probetas con ambos tipos de protecciones se encontraron sobre los valores mínimos aceptados por la norma ASTM y LR.

El comportamiento que tuvieron las probetas, ya sea con protección de Agamix o CO₂, tuvieron un comportamiento esperado para los aceros de alta resistencia, alcanzando y sobrepasando los valores mínimos impuestos por LR y ASTM.

En el ensayo de impacto se puede determinar la curva dúctil-frágil de las probetas entre -20 [°C] y 20 [°C] con ambas protecciones, obteniendo grandes diferencias en el ensayo realizado a - 20 [°C], donde la probeta

soldada con protección de Agamix tuvo mejor comportamiento al absorber el doble de energía que con protección de CO₂. Al realizar el ensayo en las otras temperaturas mencionadas las probetas con ambas protecciones presentaron un comportamiento similar, absorbiendo cantidades de energía concordantes.

Todas las probetas, independiente del tipo de protección, cumplieron absorbiendo la energía mínima requerida por LR para el uso de aceros de alta resistencia y con los estándares exigidos para la construcción de buques.

En el ensayo de doblado se logró determinar el comportamiento de la soldadura con ambas protecciones ante el doblado de la probeta, obteniendo en todo un comportamiento similar, no se encontraron fisuras ni fracturas en la unión soldada tras la comprobación visual y en el ensayo con tintas penetrantes.

Tras realizar los ensayos mecánicos de tracción, impacto y doblado, y analizar el comportamiento del material soldado, se puede dar respuesta a la pregunta de investigación: ¿Qué ventajas representan las propiedades mecánicas de la soldadura FCAW 71T1C tubular con protección de MIG respecto a la protección MAG, en un acero DH 36? Se concluye que la protección MIG tiene mejores propiedades mecánicas basado en los ensayos realizados en el presente trabajo, y que la protección MAG es una alternativa viable y con menor costo para efectuar el proceso de soldadura debido a que cumple con los requisitos establecidos por la casa clasificadora Lloyd's Register para la construcción de buques.

6- REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. Askeland, D., Ciencia e ingeniería de materiales, 7a Edición, Cengage Learning, USA., 2016, pp 117-187-188-196-198-271.
2. Horwitz, H., Soldadura aplicaciones y práctica, 7a edición, Alfaomega, México, 2002, pp 515.
3. Norma ASTM E-8, Standard test methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM Standards.
4. Norma ASTM E-23, Standard Test Methods for Notches Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM Standards.
5. ASTM E-290.
6. Norma ASTM E-131, Standard specification for structural Steel for ships, ASTM Standards.
7. Rules for the Manufacture Testing and Certification of Materials, Lloyd's Register, 2018.
8. Centro de conocimiento ESAB, Proceso de soldadura FCAW – alambre tubular relleno de fundente. Obtenido de: <http://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/>
9. Proceso soldadura fcaw alambre tubular relleno de fundente definiciones del proceso.cfm