

Efecto de la profundidad, la polaridad y la corriente de soldadura sobre el contenido de hidrógeno difusible con electrodos de acero inoxidable en la soldadura submarina húmeda

Depth, Polarity and Welding Current Effect on Diffusible Hydrogen Content With Stainless Steel Electrodes in Underwater Wet Welding

Alphonsus Henrique Clemente Cardoso¹, José Leonardo Jácome Carrascal², Danna Lizbeth Contreras Meza³
y Ariel Rodriguez Arias⁴

Resumen

El análisis del hidrógeno difusible es índice fundamental para determinar la calidad y integridad de las uniones soldadas fabricadas mediante el proceso de soldadura submarina húmeda. El objetivo de este estudio fue evaluar individualmente la influencia de cuatro variables fundamentales sobre la cantidad de hidrógeno difusible en la soldadura submarina mojada: profundidad de operación, polaridad, corriente y tipo de electrodo. Fue aplicado un diseño factorial completo de dos niveles a estos cuatro factores. El análisis estadístico permitió establecer la efectividad de la variación de cada factor y determinar el orden de su importancia sobre el valor del hidrógeno difusible. La soldadura submarina húmeda se realizó con electrodos de acero inoxidable austenítico. Los valores más bajos de hidrógeno difusible se obtuvieron a mayores niveles de profundidad y corriente de soldadura, con polaridad positiva, y electrodo E312. En este estudio, el factor con mayor impacto en el valor del Hidrógeno Difusible es la Profundidad.

Palabras clave: Soldadura submarina mojada, Hidrógeno difusible, Profundidad

Abstract

The evaluation of diffusible hydrogen is critical in determining the quality and strength of UnderWater Wet Welding joints. The objective of this study was to separately evaluate the influence of four fundamental variables on the amount of diffusible hydrogen in underwater welding: welding depth, polarity, current and electrode specification. Applying a full two-level factorial design to these four factors. Statistical analysis allowed us to establish the relevance of the variation of each factor on the diffusible hydrogen content of the welds. Austenitic stainless steel electrodes were used. The lowest Diffusible Hydrogen values were obtained at higher depth and welding current levels, with positive polarity, and electrode E312 in detriment to E309. In this study, the factor with the greatest impact on Diffusible Hydrogen was the Welding Depth.

Keywords: Underwater welding, Diffusible hydrogen, Depth

Recepción: 11-nov-2021

Aceptación: 22-feb-2022

¹PPGMEC, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Dirección electrónica: alphonsushcardoso@gmail.com

^{2,3}Universidad Francisco de Paula Santander.

⁴DEMEC, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais

1 Introducción

La creciente necesidad de utilizar soldadura subacuática mojada para el mantenimiento y montaje de equipos en la industria marina y offshore, indica la necesidad de estudiar y optimizar este proceso. El proceso de soldadura *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) es el proceso de soldadura más relevante para este tipo de aplicaciones por su versatilidad, y la demanda de equipos de fácil disponibilidad y adaptables a zonas de difícil acceso y grandes profundidades.

El principal factor limitante para la soldadura realizada en un ambiente sumergido es el deterioro de las propiedades mecánicas, debido a las mayores tasas de inclusión de átomos de hidrógeno por la descomposición del agua. La evaluación del hidrógeno difusible es fundamental para analizar la calidad y resistencia de las uniones soldadas realizadas con el proceso *Underwater Wet Welding* (UWW).

El uso de electrodos de acero inoxidable es muy útil en la soldadura húmeda bajo el agua, especialmente en la composición de juntas disímiles. Debido a que el acero inoxidable es menos susceptible a la fragilización por hidrógeno que los aceros ferríticos, elimina la necesidad de un tratamiento térmico posterior a la soldadura en uniones de acero de alta resistencia.

La soldadura subacuática mojada presenta varios desafíos, incluida la alta tasa de enfriamiento, que puede conducir a un aumento de las tensiones residuales en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT), aumentando la probabilidad de aparición de grietas en esta área. También hay un aumento en la cantidad de hidrógeno en el proceso, debido a su disociación de la molécula de agua durante el proceso. El aumento de la cantidad de hidrógeno puede provocar la aparición de grietas en el ZTA y un aumento de la porosidad. Además, las condiciones adversas en el medio acuático traen inestabilidad al arco eléctrico y el principal efecto de esta inestabilidad es un aumento de la porosidad en el metal de soldadura [1].

El hidrógeno contenido en el metal de soldadura puede ser difusible o residual. Las dimensiones del átomo de hidrógeno facilitan el movimiento

en soluciones de metales sólidos. La presencia de los mismos entre los intersticios de los metales provoca cambios no deseados que pueden conducir a la fractura. Según Chan [2], el transporte de hidrógeno a través de la red cristalina se ve afectado por límites de grano, desniveles y carburos. La estructura y en consecuencia, el microconstituyente es fundamental para evaluar la difusibilidad y solubilidad del hidrógeno. La austenita, por ejemplo, tiene mayor solubilidad en hidrógeno que la ferrita. Por lo tanto, como regla, el metal con una estructura austenítica posiblemente tendrá niveles más bajos de hidrógeno difusible en la soldadura subacuática mojada.

Los factores operativos cambian la cantidad de hidrógeno difusible en el metal de soldadura. Frydych [3], utilizando electrodos de rutilo, observó que el aumento en el voltaje del arco provocó un aumento en el resultado de hidrógeno difusible y el aumento en la salinidad y la corriente de soldadura condujo a resultados comparativamente más bajos. Se ha observado que la profundidad de la soldadura también cambia la cantidad de hidrógeno difusible.

Silva [4], al estudiar la relación de la profundidad con el hidrógeno difusible y residual, utilizando un electrodo de rutilo AWS E6013, encontró una disminución en el valor de hidrógeno difusible con un aumento en la profundidad. El índice de hidrógeno residual se mantuvo constante. Se probaron profundidades de 0,3 m (profundidad del agua), 10m, 20m y 30 m. El autor también observó estabilidad en el valor de hidrógeno difusible a partir de 20 m en adelante, un aumento de la porosidad con la profundidad y la aparición de cortocircuitos a partir de 30 m en adelante. Según Omajene [1], cuando el hidrógeno está presente en mayor cantidad en la región de soldadura, con un aumento de la profundidad de soldadura, por ejemplo, hay una disminución de la estabilidad del arco. En esta situación, el hidrógeno predomina en la composición química de los gases en el interior de los poros, debido a su alto potencial de ionización, lo que dificulta el mantenimiento del arco eléctrico por la alta pérdida de energía provocada por este gas.

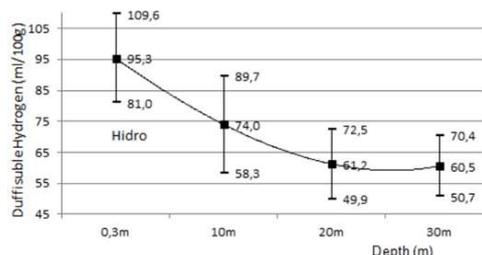


Figura 1. Evolución del contenido de hidrógeno en relación con la variación de profundidad [4].

La mayor longitud de arco proporcionada por la polaridad positiva, y reduciendo así la posibilidad de un cortocircuito, aumenta el atrapamiento de hidrógeno en las gotas de transferencia dentro del arco eléctrico, [5]. Medeiros [6] sugiere que la cantidad de hidrógeno difusible que se encuentra en el metal de soldadura resultante de la soldadura con polaridad negativa es menor que la que se encuentra en polaridad positiva. La composición del revestimiento del electrodo modifica las características del arco eléctrico y afecta la absorción de hidrógeno. Al probar algunos tipos de electrodos comerciales, Gooch [7] concluyó que los electrodos de rutilo y oxi-rutilo tienen mejores niveles de estabilidad del arco y mejores aspectos visuales de los cordones de soldadura. En el experimento del autor, los electrodos oxidantes (óxido de hierro) generaron metal de soldadura con valores más bajos de hidrógeno difusible, consecuentemente menos ocurrencias de agrietamiento por hidrógeno, así como electrodos a base de níquel. Los electrodos de acero inoxidable martensítico generaron metales de soldadura con presencia de martensita, por esta razón, alta dureza y agrietamiento por hidrógeno, además de porciones austeníticas con grietas de solidificación. La figura 2 muestra los valores de hidrógeno difusible obtenidos para cada recubrimiento.

2 Materiales y métodos

Para realizar las soldaduras se utilizaron como metal base chapas de acero ASTM A-36 de 3/8 de pulgada (9,35 mm) de espesor. Las soldaduras para el análisis de hidrógeno difusible se realizaron sobre probetas, también de 9,35 mm de espesor, 15 mm de ancho, segmentadas en tres elementos: dos tramos con 30 mm en el extremo y uno con 15 mm punteado,

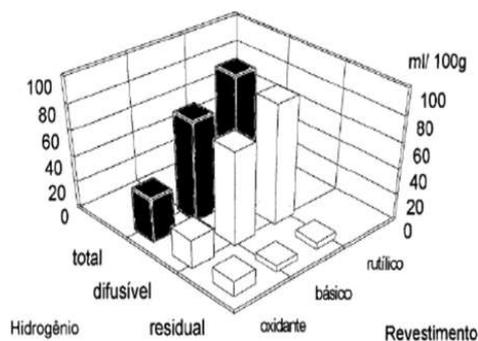


Figura 2. Concentración de hidrógeno según el revestimiento de cada electrodo. [7]

para facilitar el contacto eléctrico en soldadura y montaje, cumpliendo con la norma ISO 3690 (2018) [8]. Los consumibles utilizados fueron los electrodos de acero inoxidable ASME SFA-5.4 E309L-17 y E312L-17. La diferencia fundamental entre ellos está en el contenido de cromo: mientras que E309 tiene un 23,66% de cromo, E312 tiene un 28,20%.

Los electrodos se montaron en un dispositivo de soldadura por gravedad, dentro de un recipiente a presión con una capacidad de 0.51 m³, como se muestra en la figura 3. El ángulo entre el electrodo y el metal base se mantuvo en 60 ° en todos los experimentos.



Figura 3. Dispositivo para simular a soldadura subacuática mojada LRSS-UFGM.

Las soldaduras se realizaron a profundidades simuladas de 0,3 m y 30 m (3 kgf cm²) utilizando polaridad inversa (positiva) y polaridad directa (negativa), con corrientes establecidas en 150 A y 180 A. Para cada combinación de parámetros: electrodo, profundidad, polaridad y corriente, se realizaron tres soldaduras. Los parámetros eléctricos y de hidrógeno difusible se obtuvieron utilizando la media de los valores, con su respectivo error

estadístico (desviación estándar). Para el análisis de las señales eléctricas se utilizaron 10,0 s del tiempo total de soldadura, y se descartó el inicio y el final del proceso de soldadura para optimizar la evaluación de las señales. La frecuencia de adquisición fue de 5000 Hz. El equipo utilizado para la adquisición de señales es de la marca IMC Soldagem, modelo SAP V4 (rango de medida: corriente -600 a 600A; voltaje -100 a 100V). El software para adquirir las señales fue SapTiV4.37s de la misma IMC Welding. La evaluación de las señales eléctricas resultantes del proceso de soldadura, los archivos de datos recolectados fueron tratados utilizando el software Sinal desarrollado en el LRSS de la UFMG.

Todas las pruebas se realizaron utilizando la máquina de soldar Hiper 1, aplicable especialmente para soldar electrodos revestidos con o proceso UWW. El Equipo suministra una corriente de soldadura máxima de 450A y 80V de voltaje sin carga. El equipo cuenta con control de extinción de arco: una vez que reconoce un cortocircuito por un tiempo establecido, se aplica una corriente para restablecer el arco. Este control del sistema se ha desactivado para que no influya en los resultados.

Para la obtención del Hidrógeno Difusible se mantuvo un tiempo máximo de 2 minutos entre el final de la soldadura y la colocación de la probeta en el dispositivo de recogida de hidrógeno. La cromatografía de gases fue el método utilizado para medir el hidrógeno difusible, utilizando como referencia ASTM E260-96 (2019) [9]. El principio de análisis es la cromatografía de gases. Esta técnica compara un gas mixto con un gas de referencia puro por conductividad térmica. El cambio en las temperaturas de los conductores calentados se interpreta como cambios en la conductividad térmica, que generan diferentes señales de resistencia susceptibles de ser medidas. El rango de valores medidos por el equipo para H₂ y N₂ es de 0 mL a 19,99 mL.

El análisis estadístico se realizó con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Como primer paso se realizó el análisis estadístico para el modelo I, lineal con interacciones de dependencia $Hdif = f(d, p, I, e)$. La figura 4 muestra los efectos de Pareto estandarizados para el primer modelo propuesto. El

gráfico proporciona información sobre la naturaleza cualitativa y la significancia del efecto de las variables estudiadas. La línea vertical en rojo representa el nivel de significancia crítico $p = 0,05$. Las variables que superan este valor se consideran estadísticamente significativas. Se realizaron un total de dieciséis series, para un diseño factorial 2⁴, y cada línea indica niveles altos y bajos de profundidad, corriente, polaridad y valores de electrodo. La planificación también permitió estimar interacciones de segundo orden (AB, AC, AD, BC, BD, CD), tercer orden (ABC, ABD, ACD, BCD) y cuarto orden (ABCD). Se utilizó el software Minitab para analizar el experimento factorial con 3 repeticiones, con un total de 48 líneas, como se muestra en la tabla 1. La respuesta es el contenido de hidrógeno difusible.

Tabla 1. Carreras realizadas para Planificación Factorial.

N	AWS	Prof. (m)	Cor. (A)	Pol.	Hdif (g/100ml)
1	E309	30	150	DCEN	57,06
2	E309	30	150	DCEN	43,44
3	E309	30	150	DCEN	56,46
4	E309	30	150	DCEP	30,37
5	E309	30	150	DCEP	33,33
6	E309	30	150	DCEP	33,57
7	E309	30	180	DCEN	52,76
8	E309	30	180	DCEN	50,03
9	E309	30	180	DCEN	69,88
10	E309	30	180	DCEP	48,66
11	E309	30	180	DCEP	42,32
12	E309	30	180	DCEP	45,13
13	E309	0,3	150	DCEN	76,93
14	E309	0,3	150	DCEN	74,3
15	E309	0,3	150	DCEN	74,01
16	E309	0,3	150	DCEP	73,53
17	E309	0,3	150	DCEP	73,38
18	E309	0,3	150	DCEP	71,75
19	E309	0,3	180	DCEN	75,07
20	E309	0,3	180	DCEN	76,35
21	E309	0,3	180	DCEN	74,01
22	E309	0,3	180	DCEP	50,17
23	E309	0,3	180	DCEP	64,47
24	E309	0,3	180	DCEP	54,16
25	E312	30	150	DCEN	27,24
26	E312	30	150	DCEN	61,99
27	E312	30	150	DCEN	10,43
28	E312	30	150	DCEP	7,63
29	E312	30	150	DCEP	5,88
30	E312	30	150	DCEP	6,2
31	E312	30	180	DCEN	43,85
32	E312	30	180	DCEN	39,92
33	E312	30	180	DCEN	58,75
34	E312	30	180	DCEP	26,78
35	E312	30	180	DCEP	32,86
36	E312	30	180	DCEP	35,81

N	AWS	Prof. (m)	Cor. (A)	Pol.	Hdif (g/100ml)
37	E312	0,3	150	DCEN	40,51
38	E312	0,3	150	DCEN	64,69
39	E312	0,3	150	DCEN	-
40	E312	0,3	150	DCEP	36,94
41	E312	0,3	150	DCEP	46,85
42	E312	0,3	150	DCEP	35,78
43	E312	0,3	180	DCEN	100,85
44	E312	0,3	180	DCEN	68,22
45	E312	0,3	180	DCEN	-
46	E312	0,3	180	DCEP	60,71
47	E312	0,3	180	DCEP	68,58
48	E312	0,3	180	DCEP	-

3 Resultados y discusión

El análisis estadístico inicial se realizó teniendo en cuenta el análisis del experimento factorial 2^4 con predictores iniciales (Profundidad, Polaridad, Corriente, Electrodo) e interacciones de dependencia. La figura 4 muestra un gráfico de efectos de Pareto estandarizado para Hdif, que indica los módulos t-student para cada variable o interacción, para el modelo adoptado. El gráfico de Pareto proporciona la importancia de los efectos, y todas las barras que cruzan la línea de referencia constituyen factores que son estadísticamente significativos. Tenga en cuenta que, para la respuesta de hidrógeno difusible, la profundidad de soldadura es el principal factor que contribuye a cambiar el valor de hidrógeno, seguido de la polaridad, la especificación del electrodo y por último la corriente de soldadura.

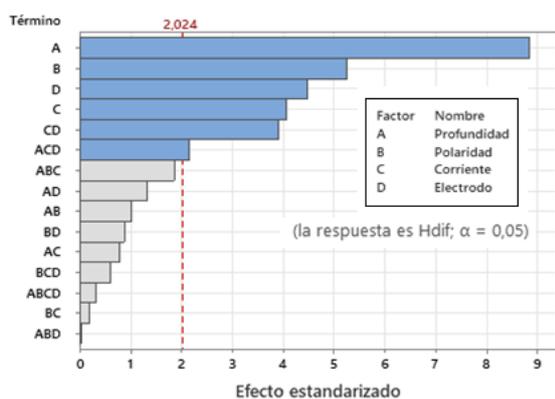


Figura 4. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados del hidrógeno difusible.

La línea de referencia roja delimita los efectos que tienen significación estadística (valor $p < 0,05$). Los otros factores y interacciones que aparecen en el gráfico, pero no forman parte del modelo propuesto. También se observa que los efectos del tipo de

electrodo y la corriente son muy similares al cambiar el valor de Hdif.

En la tabla 2 se resumen los efectos y coeficientes para cada respuesta del estudio, los cuales pueden ser calculados mediante ecuaciones estadísticas indicando los valores respectivos para los efectos principales y las interacciones entre ellos. De esta forma, podremos definir cuál de los efectos es obligatorio en cada respuesta estudiada, el peso de cada efecto e interacción, incluso aquellos que son estadísticamente insignificantes, ordenándolos con la ayuda del diagrama de Pareto.

El coeficiente de regresión representa el tamaño y la dirección del efecto predictivo sobre la variable de respuesta. El tamaño de este coeficiente puede ser una buena forma de evaluar la importancia del efecto sobre la variable de respuesta, siempre que su valor p sugiera una respuesta estadísticamente válida.

El error estándar del coeficiente conduce a la estimación de la variabilidad del coeficiente, es decir, si se extraen muestras repetidas de una población dada, cuál sería la probabilidad de que se repitan. La relación del coeficiente sobre el error estándar toma el valor de t que se utiliza para el cálculo de p [10].

El valor de p prueba la hipótesis de que el valor de cada coeficiente es nulo. El valor de $p < 0,05$ hace que la hipótesis se rechace. Cuando el valor p es menor que 0,05, existe credibilidad estadística de que los cambios en el predictor conducen a cambios en la respuesta.

El análisis de residuales es fundamental para calificar el experimento, con el objetivo de determinar si los datos son asimétricos o si incluyen valores atípicos (puntos muy discrepantes en el modelo). Se presentaron varios gráficos para verificar la distancia de los datos del gráfico de regresión. La estadística de Anderson-Darling aplicada a la gráfica de distribución normal se utiliza para verificar el valor p y medir la bondad del ajuste. Una distribución que presente un valor p mayor que la significancia determinada para el análisis se considera normal, aceptando la hipótesis nula.

Tabla 2. Coeficientes Codificados para o Hidrógeno Difusible.

Termino	Efeito	Coef.	EP de Coef.	Valor-t	Valor-p	VIF
Constante		51,66	1,50	34,33	0,000	
Profundidad	-26,61	-13,31	1,50	-8,84	0,000	1,01
Polaridad	-15,77	-7,89	1,50	-5,27	0,000	1,00
Corriente	12,21	6,11	1,50	4,06	0,000	1,01
Electrodo	-13,45	-6,73	1,50	-4,47	0,000	1,01
Corriente*Electrodo	11,81	5,90	1,50	3,92	0,000	1,01
Profundidad*Corriente*Electrodo	-6,47	-3,24	1,50	-2,15	0,038	1,01

Tabla 3. Resumen del Modelo para o Hidrógeno Difusible

S	R ₂	R ₂ (aj)	R ₂ (pred)
10,0321	81,19%	78,22%	73,41%

Nótese, en la figura 5, para este estudio de hidrógeno difusible, un valor *p* para la gráfica de distribución normal de errores igual a $0,166 > 0,05$. Por tanto, se puede decir que el modelo estadístico que utiliza únicamente las variables manipuladas en la creación del experimento es válido.

El modelo adoptado, como se muestra en la tabla 3, utilizando solo 4 variables operativas como predictores, explica el 81,19% del comportamiento del hidrógeno difusible.

Tabla 4. Análisis de varianza para o Hidrógeno Difusible.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p
Modelo	6	16504,5	2750,74	27,33	0,000
Linear	4	14890,7	3722,66	36,99	0,000
Profundidad	1	7870,7	7870,74	78,21	0,000
Polaridad	1	2790,3	2790,30	27,72	0,000
Corriente	1	1657,6	1657,56	16,47	0,000
Electrodo	1	2010,5	2010,45	19,98	0,000
Interacciones de 2 factores	1	1549,5	1549,55	15,40	0,000
Corriente*Electrodo	1	1549,5	1549,55	15,40	0,000
Interacciones de 3 factores	1	465,3	465,32	4,62	0,038
Profundidad*Corriente*Electrodo	1	465,3	465,32	4,62	0,038
Erro	38	3824,4	100,64		
Falta de ajuste	9	775,4	86,15	0,82	0,603
Erro Puro	29	3049,0	105,14		
Total	44	20328,9			

El análisis de residuales es fundamental para calificar el experimento, con el objetivo de determinar si los datos son asimétricos o si incluyen valores atípicos (puntos muy discrepantes en el modelo). Se presentaron varios gráficos para verificar la distancia de los datos del gráfico de regresión. La estadística de Anderson-Darling aplicada a la gráfica de distribución normal se utiliza para verificar el valor *p* y medir la bondad del ajuste. Una distribución que presente un valor *p* mayor que la significancia determinada para el análisis se considera normal, aceptando la hipótesis nula.

Nótese, en la figura 5, para este estudio de hidrógeno difusible, un valor *p* para la gráfica de distribución normal de errores igual a $0,166 > 0,05$. Por tanto, se puede decir que el modelo estadístico que utiliza únicamente las variables manipuladas en la creación del experimento es válido.

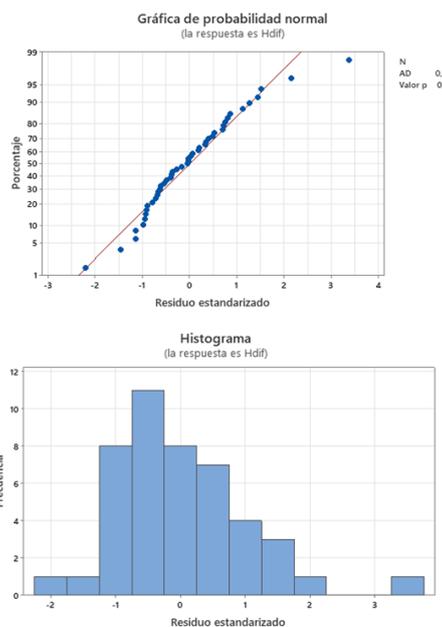


Figura 5. Gráficos de residuos de Hdif para hidrógeno difusible.

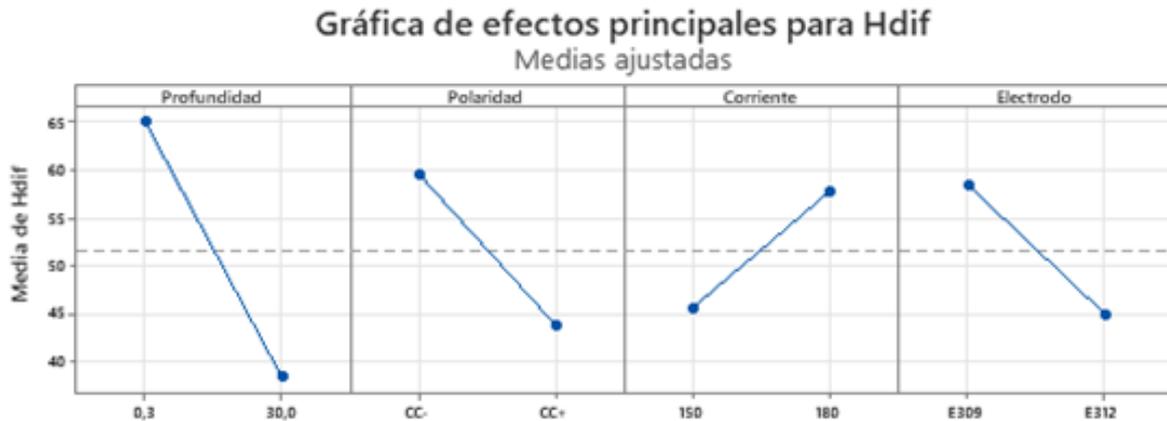


Figura 6. Cuadro de predictores principales del modelo I para Hdif. $R_2 = 81,19\%$ ($\alpha = 0,05$).

Usando el diseño experimental, fue posible enumerar la importancia de la influencia de cuatro variables en el contenido de hidrógeno difusible en el metal de soldadura producido en la soldadura subacuática húmeda: polaridad de soldadura, profundidad de soldadura, corriente de soldadura y composición del electrodo. Estas variables se definieron como predictoras en base a estudios previos realizados en el Laboratorio de Simulación y Soldadura de la UFMG. El análisis estadístico nos permite comprobar que el aumento de la profundidad de soldadura es el principal responsable de la disminución del contenido de hidrógeno difusible, seguido de la alternancia de polaridad directa a inversa, que también produce una disminución de hidrógeno.

Manteniendo inalteradas las demás condiciones de soldadura (tipo de electrodo), polaridad y corriente, es evidente que el aumento de profundidad de 0,3 a 30 m provoca una disminución de los valores de hidrógeno difusible, como se muestra en la figura 6, en orden de algo más de 25g/100 ml.

En segundo lugar, el uso de polaridad inversa CC+ podría reducir, manteniendo el resto de condiciones los valores de Hidrógeno Difusible (Hdif) en unos 15 g/100ml en relación a la polaridad directa CC-, aproximadamente. El efecto de aumentar la corriente y cambiar el electrodo de E309 a E312 tiene efectos similares sobre el valor de Hdif (aproximadamente 13 g/100ml), pero contrarios: el aumento de corriente provoca un aumento de Hdif y el

intercambio del electrodo E309 por el E312 provoca disminución de Hdif.

4 Conclusiones

A partir de la aplicación del diseño experimental DOE, fue posible determinar la influencia de la profundidad de soldadura, polaridad, corriente y variables de especificación del electrodo sobre los valores de hidrógeno difusible, en la soldadura subacuática de dos electrodos de acero inoxidable austenítico. El diseño del experimento proporcionó un coeficiente de determinación considerable $R_2 = 81,19\%$ y una calificación residual que valida las respuestas con una significancia $de = 0,05$. Las influencias lineales de las cuatro propiedades de soldadura estudiadas (profundidad, polaridad, corriente y electrodo) fueron estadísticamente significativas al nivel propuesto de 0,05, y entre las interacciones, corriente*electrodo y profundidad*corriente*electrodo también fueron significativas.

La soldadura subacuática realizada con electrodos de Acero Inoxidable Auténtico E309 y E312 presentó valores de Hdif entre 5,88 y 100,85 g/100 ml. El aumento de la profundidad, la disminución de la corriente, el cambio de polaridad negativa a positiva y el cambio de electrodo E309 a E312 provocan una disminución en el contenido de hidrógeno difusible en las soldaduras.

Referencias

- [1] Omajene, Joshua E. et al. "Fundamental difficulties associated with underwater wet welding", *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, no. 6, pp. 26-31, 2014.
- [2] Chan, S. L. I. "Hydrogen trapping ability of steels with different microstructures", *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Taylor & Francis*, vol. 22, no. 1, pp. 43-53, 1999.
- [3] Fydrych, Dariusz, ROGALSKI, Grzegorz. "Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal", *Welding International*, vol. 25, no. 03, pp. 166-171, 2011.
- [4] Da Silva, Wesley Carlos Dias et al. "Effect of the hydrostatic pressure in the diffusible hydrogen at the underwater wet welding. In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering", *American Society of Mechanical Engineers*, 2012. pp. 1-8.
- [5] Pope, A. M. "Oxygen and Hydrogen Control in Shielded Metal Underwater Welding. 1995", *Tese de Doutorado. PhD Thesis, Colorado School of Mines*, 1995.
- [6] De Medeiros, Raimundo Cabral. "Effect of oxidizing electrodes and polarity on hydrogen mitigation in underwater wet welding.", *Tese de Doutorado. Colorado School of Mines*, 1997.
- [7] Gooch, T. G. "Properties of underwater welds. part 1: Procedural trials. part 2: Mechanical properties.", 1983.
- [8] ISO - International Organization for Standardization. ISO 3690:2018-07: "Welding and Allied Processes - Determination of Hydrogen Content in Arc Weld Metal", *Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany*, 2018.
- [9] ASTM E260-96. Standard Practice For Packed Column Gas Chromatography. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2019. www.astm.org
- [10] MontGomery, Douglas C., Runger, George C., Calado, Verônica. "Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros." 6ª. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2018.
- [11] Bailey, N. et al. "Welding ste without hydrogen cracking", *[S.l.]: Woodhead Publishing*, 1993.
- [12] Fydrych, Dariusz et al. "Weldability of S500MC steel in underwater conditions", *Advances in Materials Science*, vol. 14, no. 2, pp. 37-45, 2014.
- [13] Nakpradit, T., POOPAT, B. "Investigation of diffusible hydrogen content and microstructure examination of underwater welding.", *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 3, no. 3, pp. 45-51, 2010.
- [14] Pessoa, Ezequiel Caires Pereira. "Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas", *Universidade Federal de Minas Gerais*, 2007.
- [15] American Welding Society, OATES, William R. "Welding handbook: materials and applications.", *American Welding Society*, 1996.