RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Darluin Santiago Pérez Pérez
FACULTAD	De Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Mecánica
DIRECTOR	Msc. Edwin Edgardo Espinel Blanco
TÍTULO DE LA TESIS	Estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda
TITULO EN INGLES	Study of diffusible hydrogen in wet underwater welding

RESUMEN

La soldadura submarina húmeda (UWW) es una solución de reparación para estructuras semisumergibles y astilleros, ambientes en los cuales hay exposición directa al agua de las juntas soldadas, inclusive, es utilizada en reactores nucleares, pues pueden presentarse condiciones que degradan las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las piezas a ser soldadas. Específicamente, la aplicación de esta tecnología con electrodos revestidos garantiza menores costos y reduce los tiempos de mantenimiento en comparación con otros procesos de soldadura utilizados en el área off-shore, sin embargo, en los últimos años se ha presentado el interés por utilizar alambre tubular, debido a la posibilidad de automatización. Por tanto, el conocimiento de los fenómenos implicados en este proceso es de gran importancia tecnológica. Una de las preocupaciones para los investigadores y la industria en general, es la disociación de la molécula de agua en iones H+ y OH- debido a la quema del arco eléctrico y la interacción de estos iones en el proceso. Por este motivo, el actual proyecto tiene como finalidad presentar un estudio acerca de la evaluación de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda y, como su análisis es importante para entender el surgimiento de grietas a frio y porosidad. Para esto, fueron recopilados distintos documentos, entre los cuales se encuentran artículos científicos, apostillas técnicas, libros, tesis de doctorado, disertaciones de maestría, trabajos de conclusión de grado, entre otros; con el objetivo de ampliar el conocimiento y entendimiento a la temática expuesta.

RESUMEN EN INGLES

Underwater wet welding (UWW) is a repair solution for semi-submersible structures and shipyards, environments in which there is direct exposure to water of the welded joints, and is even used in nuclear reactors, as conditions can occur that degrade the mechanical and metallurgical properties of the parts to be welded. Specifically, the application of this technology with coated electrodes ensures lower costs and reduces maintenance times compared to other welding processes used in the off-shore area, however, in recent years there has been interest in using flux-cored wire, due to the possibility of automation. Therefore, knowledge of the phenomena involved in this process is of great technological importance. One of the concerns for researchers and the industry in general is the dissociation of the water molecule into H+ and OH- ions due to the electric arc burning and the interaction of these ions in the process. For this reason, the current project aims to present a study on the evaluation of diffusible hydrogen content in underwater welding and how its analysis is important to understand the occurrence of cold cracks and porosity. For this purpose, different documents were compiled, including scientific articles, technical apostilles, books, doctoral theses, master's dissertations, graduate theses, among others, in order to broaden knowledge and understanding of the subject matter presented.

PALABRAS CLAVES	Soldadura submarina húmeda, Disociación molécula de agua, Hidrogeno difusible, Grietas a frio, Porosidad.
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Underwater welding, Water molecule dissociation, Diffusible hydrogen, Cold cracks, Porosity.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 74	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 32	CD-ROM:

Estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda

Darluin Santiago Pérez Pérez

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Mecánica

Msc. Edwin Edgardo Espinel Blanco

14 de enero de 2023

Índice

Capítulo 1. Estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda 12

1.1 Descripción breve de la empresa 12

1.1.1 Misión 13

1.1.2 Visión 13

1.1.3 Objetivos de la empresa 13

1.1.4 Descripción de la estructura organizacional 14

1.1.5 Descripción de la dependencia 15

1.2 Diagnostico inicial de la dependencia asignada 15

1.2.1 Planteamiento del problema 16

1.2.2 Justificación 17

1.3 Objetivos de la pasantía 18

1.3.1 Objetivo general 18

1.3.2 Objetivos específicos 18

1.4 Alcances y Limitaciones 18

1.4.1 Alcances 18

1.4.2 Limitaciones 19

1.5 Descripción de las actividades a desarrollar en la misma 19

Capítulo 2. Enfoques referenciales 21

2.1 Enfoque conceptual 21

2.2 Enfoque legal 29

2.3 Marco Contextual..... 33

2.3.1 Universidad Federal de Minas Gerais..... 33

2.3.2 Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación LRSS. 35

Capítulo 3. Desarrollo de la Investigación..... 36

3.1 Identificar las investigaciones más relevantes relacionadas al análisis de contenido de hidrógeno difusible en soldadura submarina húmeda..... 36

3.1.1 Buscar información sobre el estudio del hidrógeno difusible en soldadura submarina..... 36

3.1.2 Revisar referencias bibliográficas de los documentos seleccionados..... 37

3.2 Categorizar los efectos de las diferentes condiciones del proceso en el contenido de hidrogeno difusible, y sus implicaciones mecánicas y metalúrgicas..... 38

3.2.1 Elaborar el estudio bibliográfico mediante gráficos que ayuden a exponer con mayor facilidad la información..... 38

3.2.2 Seleccionar la muestra 44

3.3 Analizar el estado del arte y los aspectos más importantes de la evaluación del contenido de hidrógeno difusible en soldadura submarina húmeda 51

3.3.1 Porosidad y fisura inducidas por hidrógeno..... 51

3.3.2 Susceptibilidad y efectos de la composición química y microestructura en el hidrógeno difusible 57

3.3.3 Efecto de la profundidad, ambiente y otras variables relacionadas en el contenido de hidrogeno difusible..... 66

3.3.4 Ejecución del análisis de hidrogeno difusible..... 76

Referencias..... 84

Lista de tablas

Tabla 1 *Actividades* 20

Tabla 2 *Documentos obtenidos de Scopus para abordar el estudio de hidrógeno difusible en soldadura submarina húmeda.* 44

Tabla 3 *Medición del hidrógeno difusible y residual para distintos electrodos* 60

Tabla 4 *Valores obtenidos en el análisis de contenido de Hidrogeno difusible para diferentes familias de electrodos revestidos en soldadura submarina* 62

Lista de Figuras

Figura 1 *Organigrama LRSS* 14

Figura 2 *Tipos de soldadura submarina* 22

Figura 3 *Representación básica de soldadura submarina húmeda* 23

Figura 4 *Esquema representativo de un montaje de soldadura submarina húmeda usando alambre tubular* 25

Figura 5 *Esquema de soldadura submarina húmeda con electrodo revestido* 26

Figura 6 *Tipos de juntas posibles en soldadura* 27

Figura 7 *Logo UFMG* 33

Figura 8 *Investigación de hidrógeno difusible a través de los años* 38

Figura 9 *Principales investigadores en el estudio del hidrógeno difusible en soldadura submarina* 40

Figura 10 *Principales países en los cuales se investiga sobre hidrógeno difusible en soldadura submarina* 41

Figura 11 *Instituciones que investigan sobre hidrógeno difusible en soldadura submarina* 41

Figura 12 *Tipos de documentos en los cuales se registran los estudios de hidrógeno difusible en soldadura submarina* 42

Figura 13 *Principales patrocinadores de estudios de hidrógeno difusible en soldadura submarina* 43

Figura 14 Cantidad de hidrógeno absorbido en la poza de fusión en función de su concentración en la atmósfera de arco (solubilidad a 1900 ° C)..... 52

Figura 15 *Tasa de difusión de hidrógeno en acero ferrítico* 54

Figura 16 *Efecto del medio subacuático en las propiedades mecánicas en soldadura submarina* 55

Figura 17 *Efecto de la profundidad en la porosidad* 56

Figura 18 *Efecto de la profundidad en la porosidad en soldadura submarina con un consumible E6013* 57

Figura 19 *Fisuras evidenciadas en las secciones transversales. (a) S500M (b) S355J2G3* 59

Figura 20 *Contenido de Hidrogeno difusible para electrodos de polímero y convencionales en las dos polaridades* 63

Figura 21 *Contenido de hidrogeno difusible para distintos electrodos con metal de soldadura de matriz austenítica y ferrítica en diferentes profundidades* 64

Figura 22 *Hidrogeno difusible para diferentes contenidos de PTFE en el fundente del alambre tubular, evaluado en las dos polaridades.* 65

Figura 23 *Influencia de algunos parámetros en soldadura submarina* 67

Figura 24 *Influencia de algunos parámetros de corriente pulsada en soldadura submarina* 68

Figura 25 *Efecto de la profundidad en el hidrogeno difusible en soldadura submarina con electrodo E6013* 69

Figura 26 *Efecto de la profundidad en la porosidad y contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina* 71

Figura 27 *Análisis de hidrogeno difusible para 4 tipos de electrodos revestidos, en 4 profundidades simuladas (5m, 20m, 40m y 60m)* 72

Figura 28 *Efecto de la velocidad de soldadura en el contenido de hidrogeno difusible*. 73

Figura 29 *Esquema de cavidad local seca utilizada en soldadura submarina*..... 74

Figura 30 *Diagrama de Pareto de los efectos del modelo aplicado para análisis de hidrogeno difusible* 75

Figura 31 *Piezas de prueba con dimensiones ilustradas para soldaduras (SMAW) y (MIG/MAG).*..... 78

Figura 32 *Piezas de prueba con dimensiones ilustradas para soldadura (SAW).*..... 79

Figura 33 ***Montaje para determinar el hidrogeno difusible por el método de glicerina.*** 82

Figura 34 *Tolerancia aceptable entre los resultados de hidrogeno difusible en las pruebas.*..... 83

Resumen

La soldadura submarina húmeda (UWW) es una solución de reparación para estructuras semisumergibles y astilleros, ambientes en los cuales hay exposición directa al agua de las juntas soldadas, inclusive, es utilizada en reactores nucleares, pues pueden presentarse condiciones que degradan las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las piezas a ser soldadas. Específicamente, la aplicación de esta tecnología con electrodos revestidos garantiza menores costos y reduce los tiempos de mantenimiento en comparación con otros procesos de soldadura utilizados en el área off-shore, sin embargo, en los últimos años se ha presentado el interés por utilizar alambre tubular, debido a la posibilidad de automatización. Por tanto, el conocimiento de los fenómenos implicados en este proceso es de gran importancia tecnológica. Una de las preocupaciones para los investigadores y la industria en general, es la disociación de la molécula de agua en iones H+ y OH- debido a la quema del arco eléctrico y la interacción de estos iones en el proceso. Por este motivo, el actual proyecto tiene como finalidad presentar un estudio acerca de la evaluación de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda y, como su análisis es importante para entender el surgimiento de grietas a frio y porosidad. Para esto, fueron recopilados distintos documentos, entre los cuales se encuentran artículos científicos, apostillas técnicas, libros, tesis de doctorado, disertaciones de maestría, trabajos de conclusión de grado, entre otros; con el objetivo de ampliar el conocimiento y entendimiento a la temática expuesta.

Palabras clave: Soldadura submarina húmeda, Disociación molécula de agua, Hidrogeno difusible, Grietas a frio, Porosidad.

Abstract

Underwater wet welding (UWW) is a repair solution for semi-submersible structures and shipyards, environments in which there is direct exposure to water of the welded joints, and is even used in nuclear reactors, as conditions can occur that degrade the mechanical and metallurgical properties of the parts to be welded. Specifically, the application of this technology with coated electrodes ensures lower costs and reduces maintenance times compared to other welding processes used in the off-shore area, however, in recent years there has been interest in using flux-cored wire, due to the possibility of automation. Therefore, knowledge of the phenomena involved in this process is of great technological importance. One of the concerns for researchers and the industry in general is the dissociation of the water molecule into H+ and OH- ions due to the electric arc burning and the interaction of these ions in the process. For this reason, the current project aims to present a study on the evaluation of diffusible hydrogen content in underwater welding and how its analysis is important to understand the occurrence of cold cracks and porosity. For this purpose, different documents were compiled, including scientific articles, technical apostilles, books, doctoral theses, master's dissertations, graduate theses, among others, in order to broaden knowledge and understanding of the subject matter presented.

Keyword: Underwater welding, Water molecule dissociation, Diffusible hydrogen, Cold cracks, Porosity.

Introducción

La soldadura submarina húmeda difiere de la soldadura a seco, en que el soldador (conocido como buzo-soldador), el arco eléctrico, las piezas a ser soldadas, se encuentran en contacto directo con el agua, siendo ventajoso en términos de costo y tiempo, pero en detrimento de las propiedades mecánicas y metalúrgicas del metal de soldadura, inclusive, presentado riesgo de salud para el operario, debido a que los humos emanados pueden generar una explosión y la exposición a el ambiente subacuático puede derivar en enfermedades relacionadas a la descompresión.

Es conocido que la disociación de la molécula de agua en iones H+ y OH- debido a la quema del arco eléctrico puede generar porosidad, que junto al enfriamiento rápido aumenta la probabilidad de surgimiento de grietas a frio, el defecto metalúrgico más recurrente en la soldadura de aceros ferríticos. Por esto, el estudio del hidrogeno difusible ha sido importante a lo largo de los años, puesto que, un mejor entendimiento de este fenómeno permite aumentar el nivel de calidad de las juntas soldadas en soldadura submarina húmeda.

El presente trabajo muestra recopilación de los documentos relacionados con la temática abordada (libros, tesis, apostillas, entre otros), con el objetivo de ejecutar un análisis bibliográfico con el auxilio de SCOPUS del efecto de parámetros, ambiente, composición química, y las distintas maneras de evaluar el contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda, para así aportar una instrumento literario que permita ampliar el

conocimiento a los estudiantes de pregrado y posgrados de las distintas instituciones que estén interesados en investigar sobre este fenómeno.

Capítulo 1. Estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda

1.1 Descripción breve de la empresa

El Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación (LRSS) es una infraestructura adscrita al Departamento de Ingeniería Mecánica, ubicado en el Galpón de mecánica del campus Pampulha de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), en la ciudad de Belo Horizonte, Brasil. Este ambiente científico les brinda equipos, herramientas y recurso humano e intelectual a los estudiantes de pregrado y posgrado de ingeniería y a la comunidad en general, además de actuar en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías y proporcionar servicios en las áreas de robótica, soldadura y simulación.

Este laboratorio fue fundado en 1995, bajo la supervisión del Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD., comenzando con la implementación del Grupo de Robótica, Soldadura y Simulación, GRSS con la filosofía de "Estudiar fenómenos físicos, químicos, mecánicos y metalúrgicos con el objetivo de automatizar procesos de soldadura". Actualmente las instalaciones cuentan con un área de 250 metros cuadrados y con la participación del Prof. Dr. Ariel Rodríguez Arias, coordinador del LRSS, teniendo como objetivo contribuir a la mejora técnica y científica de los profesionales en el área de automatización de procesos de soldadura, en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías, además de proporcionar servicios en robótica, soldadura y simulación.

1.1.1 Misión

Estudiar fenómenos físicos, químicos, mecánicos y metalúrgicos para automatizar procesos de soldadura.

1.1.2 Visión

Ayudar técnica y científicamente a profesionales y empresas en el campo de automatización de soldaduras, desarrollar e implementar nuevas tecnologías además de realizar consultoría en robótica, soldadura y simulación.

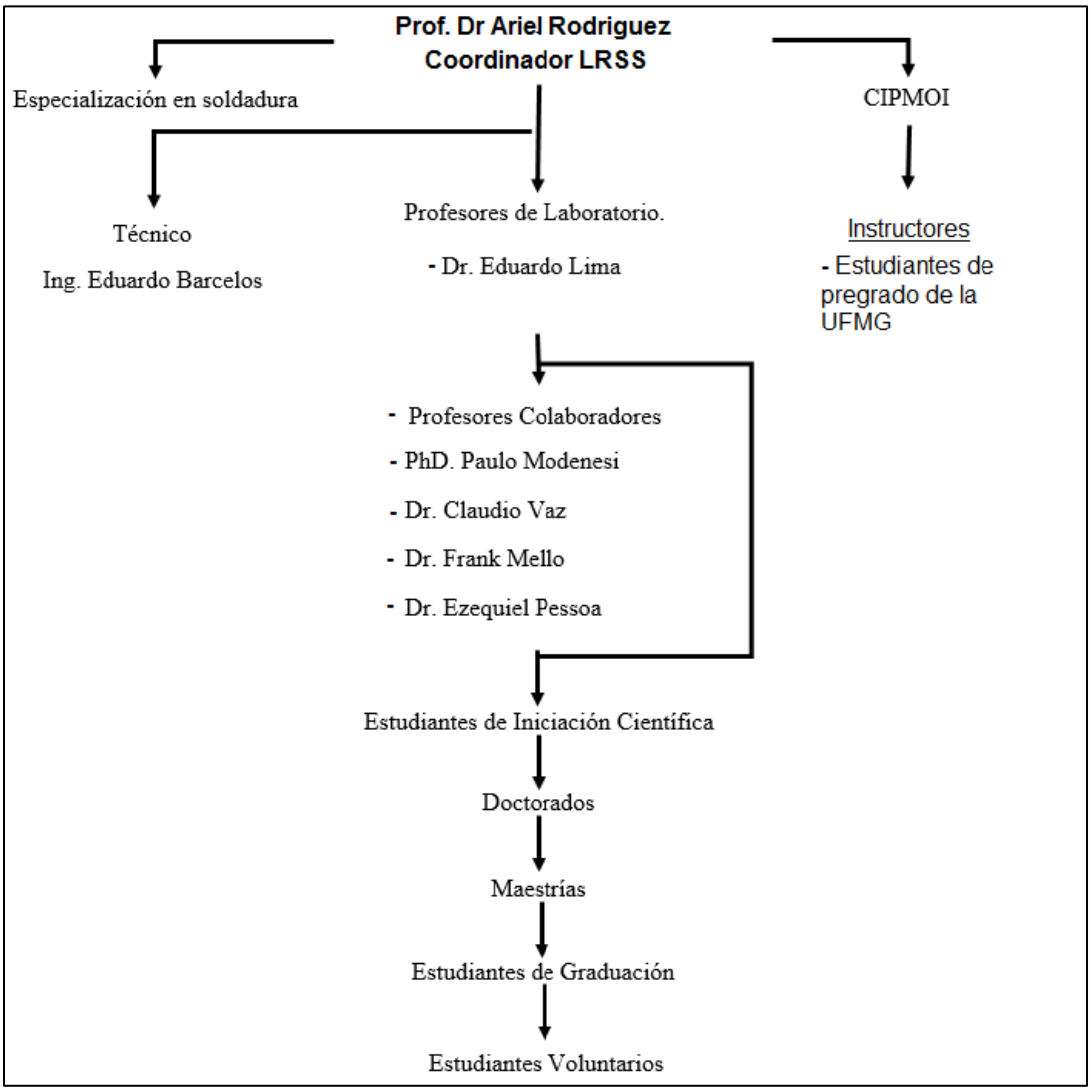
1.1.3 Objetivos de la empresa

Estudiar fenómenos físicos, químicos, mecánicos y metalúrgicos para automatizar procesos de soldadura.

1.1.4 Descripción de la estructura organizacional

Figura 1

Organigrama LRSS



Nota. Elaboración propia (2023).

1.1.5 Descripción de la dependencia

El proyecto asignado por el Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación (LRSS), de la Universidad Federal de Minas Gerais para la modalidad de pasantía internacional es el estudio de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda, el cual consta de tres etapas las cuales son la investigación, análisis y construcción de un artículo de revisión, donde se busca evaluar el efecto de parámetros del proceso, entrada de calor, velocidad de soldadura, composición química, ambiente, entre otros; en el contenido de hidrogeno difusible. El proyecto se ejecutó bajo la supervisión del Prof. Dr. Ariel Rodríguez Arias, quien es el director durante la pasantía teniendo acompañamiento de los docentes encargados del laboratorio.

1.2 Diagnostico inicial de la dependencia asignada

Actualmente en el Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación (LRSS) de la UFMG se han desarrollado investigaciones basadas en la formulación de electrodos tubulares y revestidos que permitan contribuir al mejoramiento del nivel de calidad de las juntas soldadas en ambiente submarino. El enfoque de este proyecto de investigación se encuentra en el estudio del contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda con el fin de disminuir la probabilidad de ocurrencia de agrietamiento en frio o porosidad debido a hidrogeno difusible. Este documento fue elaborado bajo la supervisión del docente encargado de las pasantías, Prof. Dr. Ariel Rodríguez Arias, con auxilio de todo el recurso humano e intelectual encargado del LRSS del departamento de ingeniería mecánica, de manera virtual.

1.2.1 Planteamiento del problema

En el mundo en las últimas décadas ha habido un creciente interés por el desarrollo de tecnologías en los procesos de soldadura submarina, motivados por la necesidad de construir y reparar estructuras en alta mar, debido a que allí se concentra la mayor parte de reservas de petróleo no exploradas (Payão, Mello, Medeiros & Paranhos, 2004). Hugo y Santos, citados por Campos (2019, p. 10), exponen que una de estas técnicas es la soldadura submarina húmeda, debido a la facilidad con la cual esta puede ser empleada, puesto que no hay necesidad de encapsular la región a ser soldada, reduciendo costos y tornando la ejecución de la reparación, en muchos casos, más rápida.

Dutra, Andrade, Alves, Santos y Teixeira (1993) explican que el electrodo revestido ha sido el proceso más utilizado en soldadura submarina. Sin embargo, el alambre tubular surge como una promisoria alternativa para sustituir este tipo de tecnología (Castellanos, 2020). Esto es, porque a profundidades superiores a 20 metros, el electrodo revestido presenta altos niveles de porosidad, además de una baja productividad. Por otro lado, pruebas preliminares con electrodo tubular registran menores niveles de porosidad y que por tener una mayor densidad de corriente, su productividad es mayor. Cabe resaltar que la composición química del revestimiento o del fundente está estrechamente relacionado con la transferencia de las gotas de metal, la estabilización del arco y, por consiguiente, la metalúrgica y mecánica (Li, Liu, Yan, Guo & Feng, 2016). Inclusive, estudios indican la importancia de investigar nuevas formulaciones que permitan la disminución del hidrogeno difusible debido a la absorción del mismo durante la quema del arco eléctrico (Liu, Olson, & Ibarra, 1994).

Este trabajo tiene la finalidad de presentar una recopilación bibliográfica, en la cual se enuncian resultados de investigaciones en las cuales el foco de estudio fue la evaluación del contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda y los principales aportes que han realizado los científicos especializados en esta temática.

1.2.2 Justificación

A nivel de la empresa. El presente trabajo se realizó con el fin de estudiar, analizar y clasificar la bibliografía referente a la evaluación de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda, y sus implicaciones mecánicas y metalúrgicas; de acuerdo a lo investigado en el LRSS de la Universidad Federal de Minas Gerais, de la ciudad de Belo Horizonte Brasil.

Nivel del estudiante. El presente trabajo tuvo como finalidad, la aplicación de conocimiento obtenidos a través de la formación académica en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Además, esta reseña bibliográfica permitirá la elaboración de un artículo de revisión, a partir de diversas investigaciones referentes a la evaluación de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda, y sus implicaciones mecánicas y metalúrgicas.

1.3 Objetivos de la pasantía

1.3.1 Objetivo general

Ejecutar el estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.

1.3.2 Objetivos específicos

Identificar las investigaciones más relevantes relacionadas al análisis de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.

Categorizar los efectos de las diferentes condiciones del proceso en el contenido de hidrogeno difusible, y sus implicaciones mecánicas y metalúrgicas.

Analizar el estado del arte y los aspectos más importantes de la evaluación del contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.

1.4 Alcances y Limitaciones

1.4.1 Alcances

La investigación en soldadura submarina está siendo ampliamente estudiada desde hace algunos años en el Laboratorio de Robótica Soldadura y Simulación (LRSS), de la Universidad

Federal de Minas Gerais de la Ciudad de Belo Horizonte, Brasil, con el fin de evaluar condiciones operacionales para analizar el proceso de soldadura en un medio acuático. Además de ser evaluada la estabilidad del proceso para obtener mejores resultados muy cercanos a los obtenidos en la soldadura al aire, también realizan el estudio de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.

1.4.2 Limitaciones

Debido a que la investigación en soldadura submarina es relativamente nueva, hay muy pocos trabajos y material de estudio por lo que hace más complicado recopilar esa información, además de eso todavía existen contradicciones o pensamientos opuestos entre investigadores, y que no se han podido aclarar o estudiar concretamente.

1.5 Descripción de las actividades a desarrollar en la misma

En la Tabla 1 se muestran el objetivo general y los específicos, así como las actividades para ejecutar cada uno de ellos.

Tabla 1

Actividades

Objetivo General	Objetivos específicos	Actividades
Ejecutar el estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.	Identificar las investigaciones más relevantes relacionadas al análisis de contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.	Buscar información sobre el estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina. Revisar referencias bibliográficas de los documentos seleccionados.
	Categorizar los efectos de las diferentes condiciones del proceso en el contenido de hidrogeno difusible, y sus implicaciones mecánicas y metalúrgicas. Analizar el estado del arte y los aspectos más importantes de la evaluación del contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.	Elaborar el estudio bibliográfico mediante gráficos que ayuden a exponer con mayor facilidad la información Seleccionar la muestra: Artículos según SCOPUS en los cuales se puede abordar la respectiva temática Elaborar una síntesis de la información referida a porosidad y fisuras inducidas por Hidrogeno. Elaborar una síntesis de la información referida a susceptibilidad y efectos de la composición química y microestructura en el hidrogeno difusible. Elaborar una síntesis de la información referida al efecto de la profundidad, ambiente y otras variables relacionadas en el contenido de hidrogeno difusible. Elaborar una síntesis de la información referida a la Ejecución del análisis de hidrogeno difusible

Nota. Elaboración propia (2023).

Capítulo 2. Enfoques referenciales

2.1 Enfoque conceptual

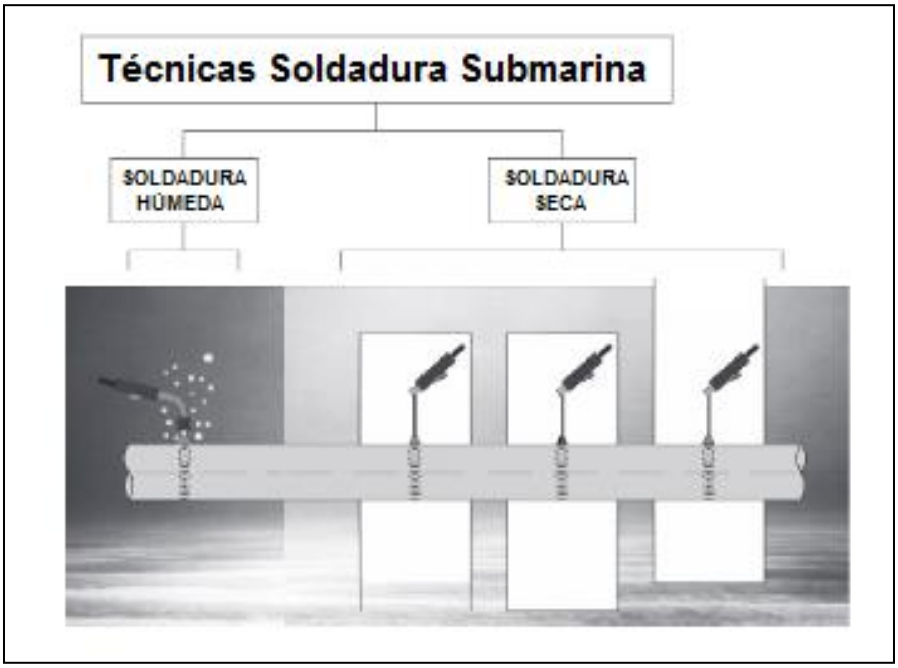
Arco eléctrico. Consiste en una descarga eléctrica sostenida a través de un conductor de plasma con alta temperatura, capaz de producir energía térmica suficiente para unir metales por fusión (Esmerio, 1998).

Soldadura. La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) define la soldadura como un proceso en el cual ocurre una coalescencia localizada, es decir, la fusión o unión de la estructura de granos de los materiales que se están soldando, de metales o no metales, producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas requeridas, con o sin la aplicación de presión, y con o sin el uso de materiales de aportación (Sociedad Americana de Soldadura, s. f.).

Soldadura submarina. Técnica de soldadura que se ejecuta en ambiente acuático, siendo divida en dos grupos principales, tal como muestra la Figura 2: Soldadura Submarina Seca, la cual se lleva a cabo en cámaras especiales que sirven como barrera para el agua, envolviendo alto costo, pero, produciendo soldaduras con cualidad semejante a aquellas realizadas al aire. Asimismo, se tiene la Soldadura Submarina Húmeda, que es aquella que ocurre directamente en un ambiente acuático, sin ningún tipo de protección, tratándose de un proceso más simple, de costo reducido y fácil utilización (Tomków & Janeczek, 2019).

Figura 2

Tipos de soldadura submarina



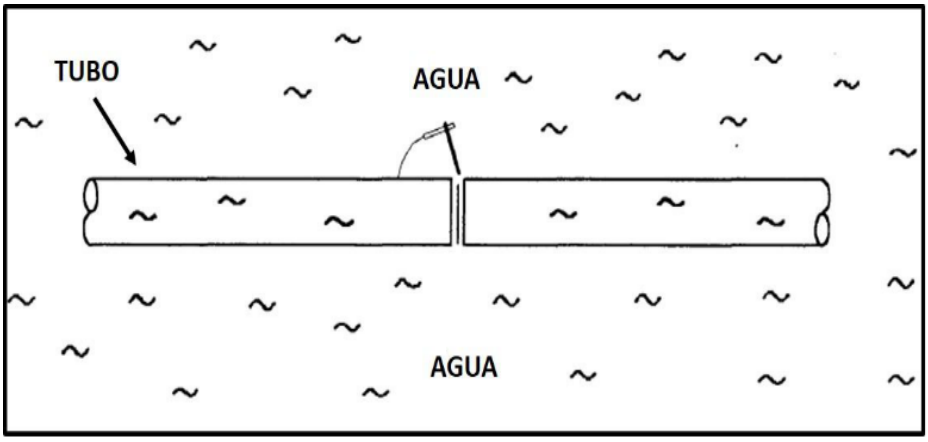
Nota. Tomado de Tamków, J. & Janeczek, A. (2019). The influence of the welding environment on the properties of Tekken joints made from S355J2C+N steel. Revista Welding Technology, 91 (1), 231-246.

Soldadura Submarina Húmeda. Es el tipo de soldadura submarina que se ejecuta en ambiente acuático, con el arco en contacto directo con el agua. La técnica de Soldadura Submarina húmeda, debido a su mayor libertad de movimiento y a la facilidad con que se puede emplear (no hay necesidad de encapsular la región que se va a soldar) resulta más económica y operacionalmente eficiente en comparación con la soldadura seca (Nixon & Billingham, 1987). Labanowski, Fydrych, & Rogalski (2008), explican que, debido a que el arco y la poza de fusión están directamente en contacto con el medio acuoso, se produce la disociación del agua (en H+ y OH-) debido al calor generado por el arco eléctrico y la alta tasa de enfriamiento. Esos factores

combinados dan origen a diferentes problemas metalúrgicos, como: inclusiones, poros, microestructura de alta dureza y agrietamiento en frío (grietas por hidrógeno). Además de los problemas asociados con la operatividad, como son la mala visibilidad del arco y la mayor inestabilidad del proceso.

Figura 3

Representación básica de soldadura submarina húmeda



Nota. Tomado de Nixon, J. & Billingham, J. (1987). A survey of underwater welding techniques. Revista Endeavour, 11(3), 143-148.

Problemas asociados a la Soldadura Submarina Húmeda. Según Liu, Pope, y Daemen (1994), los principales factores que afectan a la soldadura submarina húmeda son:

Presión Hiperbárica. Aumenta la inestabilidad del arco eléctrico por su constricción y por el aumento de la densidad de energía. Además, causa la pérdida de Manganeso y Silicio, aumentando el contenido de Carbono y Oxígeno del metal de soldadura.

Disociación del agua. Causa fisuras inducidas por el Hidrógeno, aumentando la formación de poros. A su vez, ocurre pérdida de elementos en el metal de soldadura.

Altas tasas de enfriamiento (generadas por la presencia de agua). Incrementa la probabilidad de formación de poros y ocurriendo fisura por solidificación.

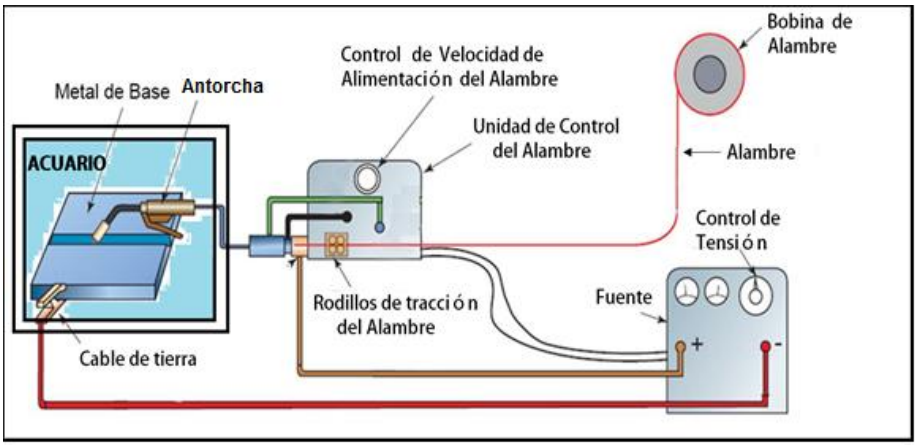
Soldadura Submarina Húmeda con alambre tubular. Tal como lo establecen Grubbs, Bertelmann, Ibarra, Liu, Marshall y Olson (2011), los procesos más utilizados en la soldadura submarina húmeda, son la Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (SMAW) y la Soldadura por Arco Eléctrico con Alambre Tubular (FCAW). Entre estos procesos, el electrodo revestido sigue siendo el más utilizado en la soldadura submarina húmeda, pues su aplicabilidad se justifica debido a características como la versatilidad, configuraciones simples del proceso, economía en la operación y calidad del producto terminado. Sin embargo, debido a su baja productividad, el alambre tubular ha surgido como una alternativa prometedora debido al alto factor de trabajo del soldador, una alta tasa de deposición y un alto rendimiento, lo que se traduce en una alta productividad en la operación, la facilidad de ser automatizado y la presencia de un fundente (similar al electrodo revestido, Este factor permite alterar las características del metal de soldadura con la variación de la composición del fundente). Estos hechos se vuelven aún más importantes debido a la reducida capacidad de buceo de los soldadores (Omajene, Kah, Wu, Martikainen & Izelu, 2015). Un esquema del montaje es presentado en la Figura 4.

Como evidencia de lo anterior mencionado, se han realizado varias investigaciones para mejorar la calidad de las piezas soldadas con soldadura submarina húmeda, donde los mayores

avances se han obtenido a través de formulación especial de nuevos fundentes para el proceso de FCAW (Zhang, Jia, Zhao, Hu, & Wu, 2016).

Figura 4

Esquema representativo de un montaje de soldadura submarina húmeda usando alambre tubular

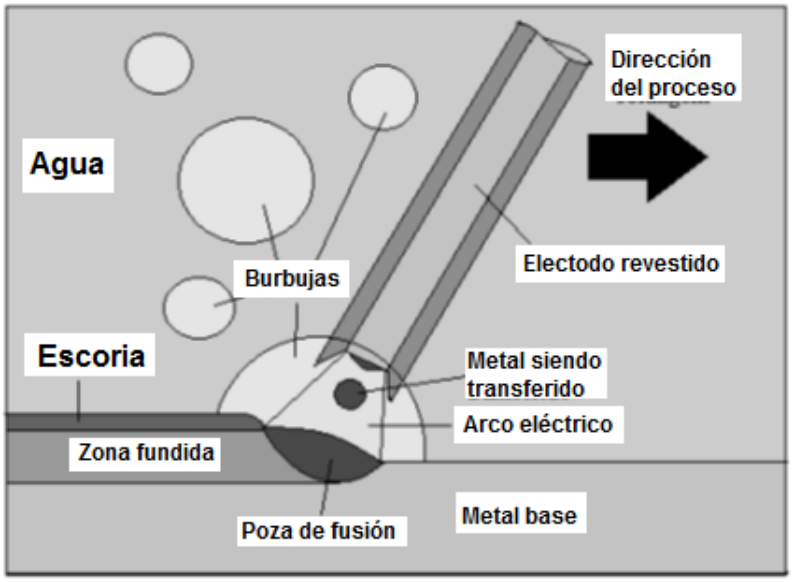


Nota. Tomado de Jeffus, L. (2016). Welding: Principles and Aplications [Soldadura: Principios y aplicaciones] (8va Ed.). New York, Estados Unidos: Delmar.

Soldadura Submarina Húmeda con electrodo revestido. Las ventajas del proceso de soldadura húmeda con SMAW, incluyen el uso de equipos portátiles, sencillos y de fácil acceso, adaptables a áreas de acceso limitado con profundidades de hasta 100 metros, con electrodos recubiertos que en la fusión generan gases involucrados en la estabilización del arco eléctrico y protección de transferencia de metal. (Pett, 1998). En la Figura 5 se presenta un esquema con las principales características del proceso.

Figura 5

Esquema de soldadura submarina húmeda con electrodo revestido

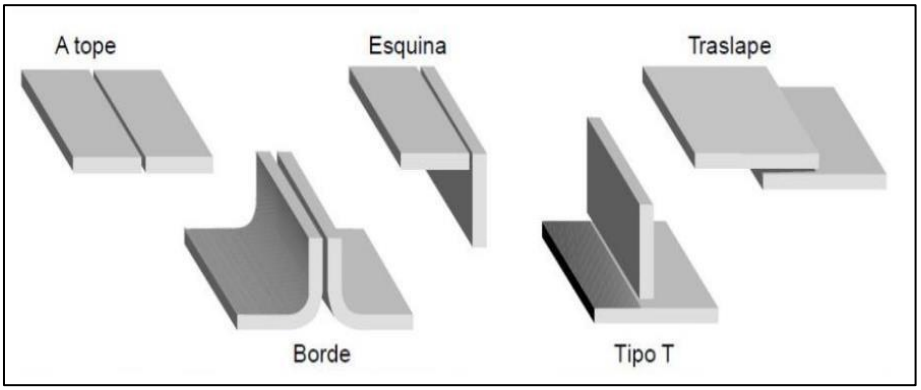


Nota. Tomado de Adaptado Meneses, P. M. (2017). Estudo Comparativo Entre Eletrodos E7018 Convencional E Aglomerados Com Polímeros Em Soldagem Subaquática Molhada. Trabajo de grado. Ingeniero mecánico. Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

Tipos de junta de soldadura. Se pueden agrupar las uniones básicas en 5 tipos diferentes, algunas tienen sus variantes que dependen de su diseño en particular. En la Figura 6 son mostrados los tipos de junta posibles en soldadura.

Figura 6

Tipos de juntas posibles en soldadura



Nota. Tomado de Castillo, 2018

Junta a tope. La junta a tope es el tipo más común de unión soldada. Se emplea para unir dos piezas que están sobre el mismo plano. Los dos objetos pueden consistir en dos bordes ya sean en forma de "V", de "U" o cuadrados. Depende de los materiales que serán soldados, y también puede tener relación con la aplicación que se logra dar a esos materiales. Las uniones a tope consisten en una soldadura simple o doble, teniendo las soldaduras simples las que logran una mejor relación entre costo y beneficio (Larry, 2009).

Soldadura de esquina. Se utiliza para unir dos piezas en un ángulo de 90 grados, las piezas se posicionan de manera que sólo mantengan contacto sobre una arista. Esto deja un agujero en forma 12 de "V" que debe ser cubierto con material de soldadura. Esta soldadura permite una junta más fuerte, y a la vez permite al soldador juntar las piezas en un paso (Ibrahim et al., 2012).

Junta de borde. La unión de borde es parecida a una junta de tope, pero se utiliza sobre las aristas de dos piezas de distribución vertical. Por ejemplo, esta junta se aplica para una chapa doble de acero. Las placas se colocan una sobre la otra, por lo menos un borde se suelda mediante esta metodología. Para incrementar la fuerza en la unión, debe realizar el proceso de soldadura en dos o más bordes (Pérez, 2020).

Junta solapada o de traslape. Las juntas solapadas se utilizan para sobre montar dos piezas que no permanecen directamente una sobre la otra, una porción de las piezas se coloca por encima, una junta de bordes no basta en su lugar, se sueldan las uniones donde la arista de un objeto tiene contacto con el otro, una junta solapada se utiliza para juntar elementos de diferentes espesores generalmente (Pinto & Francisco, 2018).

Soldadura en T. Las soldaduras en "T" se aplican para juntar dos piezas en el ángulo correcto para tener forma de "T". Un ejemplo sencillo es una viga de acero suspendida de un techo. La soldadura puede utilizarse en uno de los lados de la viga, en la cual se une con la cubierta del techo. Si la pieza metálica está colocada por encima del techo en una formación de tipo cruz, el resultado de la soldadura es lo que se conoce como una unión en forma de cruz (Pérez, 2020).

Grieta. Abertura alargada y con muy poca separación entre sus bordes que se hace en la tierra o en un cuerpo sólido, en soldadura los agrietamientos en frío se definen como grietas que se producen a temperaturas de entre 200-300° C o menos en soldaduras de acero al carbono y de baja aleación. Los agrietamientos en frío pueden ocurrir tanto en las soldaduras a tope como en

las soldaduras en ángulo. (Araque & Arzola, 2013). Por otra parte, están las grietas en caliente que son un inconveniente típico en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos. Las grietas en los cordones son debidas a una acumulación de impurezas debidas a las segregaciones en el metal de aporte último en solidificar. En tales zonas superficiales débiles, que pueden romperse y generar grietas bajo la influencia de la propia tensión de contracción de la soldadura.

Porosidad. Es una discontinuidad de tipo cavidad o aberturas superficiales resultantes de gas atrapado en o escapar del baño de soldadura durante la solidificación (Garzón & Xavier, 2020).

Posiciones de soldadura. Las posiciones de soldeo se definen de acuerdo con EN ISO 6947. Según UNE EN ISO 15614-1, el soldeo de un cupón de prueba en una posición (tubo o chapa) cualifica para el soldeo en todas las posiciones (tubo o chapa) (Calzada, 2008).

2.2 Enfoque legal

Hace algunos años atrás la soldadura subacuática mojada se inició solo en la reparación de cascos de aceros de navíos o embarcaciones dañadas, pero en la actualidad con el desarrollo de nuevas tecnologías y el progreso de las industrias. La soldadura subacuática ha crecido y se ha expandido hasta expandirse hasta convertirse en un método avanzado y ampliamente utilizado en construcción de y reparación para numerosas estructuras. Esto genero la necesidad de estandarizar los procesos de soldadura submarina para asegurar las mejores prácticas.

Norma AWS. El código de soldadura subacuática tiene sus orígenes a mediados de la década de 1970, cuando el Comité de Construcción Marina de la AWS solicitó al Subcomité de Soldadura Submarina en la búsqueda de establecer un estándar que reflejara la tecnología de punta para la soldadura subacuática. Sus esfuerzos culminaron con la publicación inicial del código en 1983, seguida de cinco revisiones posteriores. Recientemente se ha publicado la sexta y actual edición del estándar, AWS D3.6M: 2017 - Underwater Welding Code (Underwater welding code, s. f.).

AWS D3.6M: 2017. En medio de la variedad de variables y procedimientos de inspección que detalla, en última instancia se dirige hacia un objetivo claro: especificar convenientemente el trabajo de soldadura bajo el agua de un nivel de calidad conocido.

En general, la norma aborda la soldadura tanto en ambientes secos como húmedos, siendo aplicable a cinco ambientes hiperbáricos específicos, cada uno enfrentando diferentes condiciones submarinas. Se trata de soldadura: en un recipiente a presión en el que la presión se reduce a aproximadamente una atmósfera (soldadura en seco a una atmósfera), a presión ambiente en una cámara grande de la que se ha desplazado el agua para que el trabajador no necesite equipo de buceo (seco soldadura en un hábitat), a presión ambiental en una cámara seca simple de fondo abierto que acomoda al menos la cabeza y los hombros del soldador (soldadura de cámara seca), a presión ambiental en un recinto pequeño, transparente y lleno de gas, con el soldador al aire libre en el agua (soldadura por puntos secos), y a presión ambiente, con el soldador o buzo en el agua y sin ninguna barrera entre el agua y el arco de soldadura (soldadura húmeda).

Las cláusulas 1 a 8 de AWS D3.6M: 2017 se aplican a todo tipo de soldaduras, abordando su mano de obra y técnica, así como la calificación de los soldadores. 9, 10 y 11, sin embargo, están dedicados a una clase de soldadura diferente, especificando un nivel de capacidad de servicio y propiedades a las que debe ajustarse cada clase. Las clases de soldadura incluidas en el código de soldadura subacuática son:

Soldaduras de Clase A. diseñadas para ser adecuadas para aplicaciones y tensiones de diseño bajo el agua que son comparables a sus homólogos de soldadura de superficie convencional.

Soldaduras de clase B. destinadas a aplicaciones subacuáticas menos críticas donde se pueden tolerar discontinuidades limitadas.

Soldaduras de Clase O. deben cumplir con otro código o estándar designado y pautas adicionales para hacer frente al entorno de soldadura bajo el agua.

Como la última revisión del código de soldadura subacuática, AWS D3.6M: 2017 contiene muchas alteraciones de la versión 2010 del estándar. Algunos cambios importantes incluyen:

Los requisitos de limpieza se han definido mejor.

Se incorpora la aceptación de la calificación a ediciones anteriores de D3.6M.

Se actualizó la cláusula de examen ultrasónico 8, parte IV, para alinearla mejor con la técnica UT descrita en AWS D1.1 / D1.1M, Código de soldadura estructural: acero (Structural welding code - steel, 2015).

Los formularios de muestra se han revisado.

Se ha agregado un anexo informativo para abordar la calificación de los inspectores de soldadura marina.

Hay una reestructuración de los números de cláusula.

Se ha agregado al documento el alivio ultrasónico de estrés.

2.3 Marco Contextual

2.3.1 Universidad Federal de Minas Gerais.

Figura 7

Logo UFMG



Nota. Tomado de Universidad Federal de Minas Gerais UFMG. (s.f.).

Localizada en la región sudeste, la más industrializada de Brasil, la UFMG, institución pública de enseñanza superior gratuita, es la más antigua universidad del estado de Minas Gerais. Su fundación tuvo lugar el 7 de septiembre de 1927, con el nombre Universidad de Minas Gerais (UFMG). Casi un siglo después, la institución es ejemplo de liderazgo regional y nacional en enseñanza, extensión, cultura, investigación científica y generación de patentes, en diversas áreas del conocimiento.

Su comunidad reúne a cerca de 72 mil personas en las ciudades de Belo Horizonte, Montes Claros, Diamantina y Tiradentes, que se divide en alrededor de 77 cursos de graduación, 80 programas de postgrado, y más de 750 núcleos de investigación. Asimismo, en 2016, la UFMG alcanzó 1076 registros de patentes, lo que le rinde posición de liderazgo entre las instituciones de enseñanza superior del país.

Desde la creación de la UFMG, sus estudiantes ejercen gran influencia en la vida cultural, política y económica, actuando con destaque, como formadores de la intelectualidad, de las artes, de la ciencia, y teniendo asiento en la gestión de empresas, ya sea en empresas privadas o públicas del estado y del país. Asimismo, es considerada por los sistemas de evaluación de la enseñanza superior en Brasil, una de las mejores universidades del país, siendo respaldada, además, por los diversos indicadores académicos (Universidad Federal Minas Gerais [UFMG], s.f.).

Las investigaciones realizadas en sus diversas unidades académicas, ganan cada vez más espacio en revistas especializadas, en Brasil y en el mundo. En 2014, Scopus - considerada la mayor base mundial de datos de resúmenes y citas de literatura científica revisada por pares en las áreas de ciencia, tecnología, medicina, ciencias sociales, artes y humanidades - registró una publicación media de más de tres mil artículos en periódicos de alto impacto internacional.

Entre los profesores, 734 son investigadores del CNPq. El número de patentes nacionales e internacionales registradas por la UFMG también ha crecido en los últimos años-en 2016, la UFMG alcanzó 1065 registros de patentes, lo que le rinde posición de liderazgo entre las instituciones de enseñanza superior del país. La Universidad cuenta con cerca de 900 grupos de investigación registrados en el CNPq (UFMG, s. f.).

2.3.2 Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación LRSS.

En 1995, bajo la coordinación del Profesor Alexandre Queiroz Bracarense, PhD. Se inició en el Departamento de Ingeniería Mecánica DEMEC de la UFMG, el Grupo de Robótica, Soldadura y Simulación, GRSS, se estableció con la filosofía de "Estudiar los fenómenos físicos, químicos, mecánicos y metalúrgicos para la automatización del proceso de soldadura". El grupo también contó con la participación del Prof. Dr. Paulo Villani Marques, formando un grupo de trabajo que tenía como objetivo contribuir al perfeccionamiento técnico y científico de los profesionales en el área de la automatización de los procesos de soldadura, en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías, además de prestar servicios en robótica, soldadura y simulación. Con el apoyo de empresas del sector productivo y organismos gubernamentales, se construyó el Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación, un laboratorio de última generación que ofrece al GRSS las condiciones necesarias y suficientes para la docencia, la investigación y la asesoría en las más diversas áreas. El Laboratorio de Soldadura y Robótica de DEMEC/UFMG ocupa actualmente un área de 250 metros cuadrados («Laboratorio LRSS», s.f.).

Capítulo 3. Desarrollo de la Investigación

3.1 Identificar las investigaciones más relevantes relacionadas al análisis de contenido de hidrógeno difusible en soldadura submarina húmeda

3.1.1 Buscar información sobre el estudio del hidrógeno difusible en soldadura submarina

A continuación, se enunciará la metodología que se utilizó en el actual proyecto, con la finalidad de obtener información trascendental y veraz que permitiera dilucidar a cerca del estudio del Hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.

Tipo de información. Con el objetivo de ejecutar un estudio bibliográfico que permitiera cumplir con los estándares de calidad otorgados en la Resolución No. 011840 del 13 de noviembre del 2019 por el Ministerio de Educación Nacional al programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña; fueron usadas como fuentes primarias revistas científicas con contenidos originales, en las cuales se demostró el estudio del Hidrogeno difusible en soldadura submarina húmeda.

Estrategia de búsqueda. La base de datos utilizada para realizar la actual investigación fue SCOPUS, empleándose la frase “Hydrogen diffusible in underwater welding”, lo cual permitió obtener 59 documentos en total. No obstante, fueron utilizados recursos institucionales (Trabajos de pregrado, disertaciones de maestría, tesis de doctorado, apostillas, libros, entre otros) con el fin de ampliar la temática abordada.

3.1.2 Revisar referencias bibliográficas de los documentos seleccionados.

En esta etapa del proyecto, fueron analizados los distintos documentos (Tesis, artículos científicos, apostillas, etc.). Teniendo en cuenta los siguientes aspectos.

Resumen. Fueron analizados los resúmenes e párrafos introductorios de artículos científicos indicando el nivel de importancia y la relación con la temática abordada.

Metodología. Fueron identificados los materiales, equipos, herramientas, normas y diferentes elementos que permitieron ejecutar cada investigación.

Discusión y Resultados. Fueron evaluados los resultados obtenidos y las discusiones generadas, con el fin de establecer relación entre lo registrado en esos documentos y lo estipulado en trabajos anteriores.

Conclusiones Recomendaciones. Fueron analizados con el objetivo de evaluar la importancia que tienen para el desarrollo de la temática abordada y de futuras investigaciones.

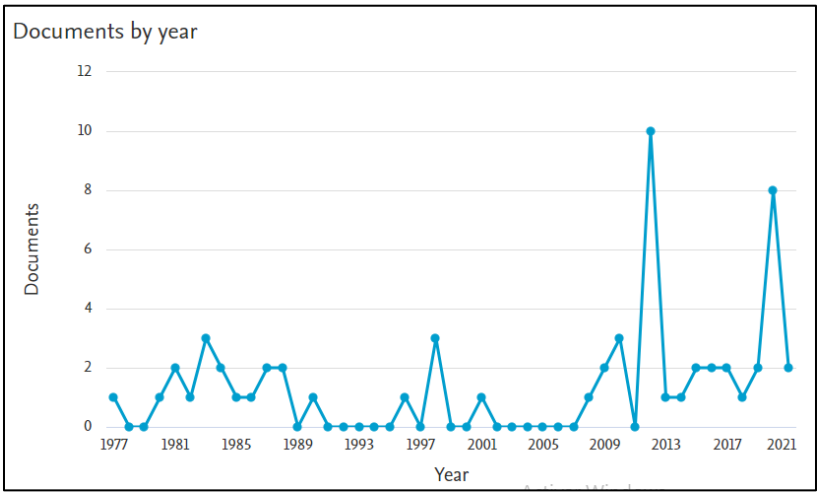
3.2 Categorizar los efectos de las diferentes condiciones del proceso en el contenido de hidrogeno difusible, y sus implicaciones mecánicas y metalúrgicas.

3.2.1 Elaborar el estudio bibliográfico mediante gráficos que ayuden a exponer con mayor facilidad la información.

Tal como fue enunciado anteriormente, el filtro de búsqueda dio como resultado 59 documentos. En esta fase fue utilizada la base de datos SCOPUS, para elaborar el estudio bibliográfico, exponiendo los resultados relacionados con cantidad de investigaciones, autores de artículos, instituciones implicadas, entre otros.

Figura 8

Investigación de hidrógeno difusible a través de los años



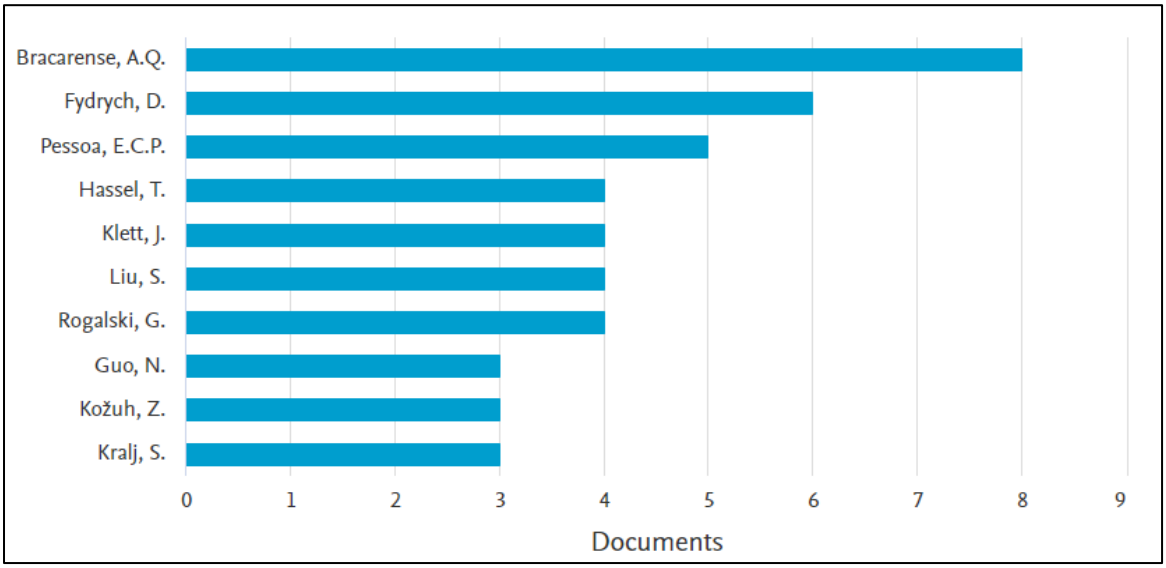
Nota. Tomado de Análisis de datos (Scopus, S.F)

En la Figura 8 es mostrada una gráfica obtenida a través de la base de datos SCOPUS en la cual se evidencia la cantidad de publicaciones por año, desde 1977 hasta 2021, de artículos científicos referentes al estudio de hidrogeno difusible en soldadura submarina. Además, puede notarse el aumento gradual de estudios en la pasada década, debido al interés que ha surgido en los diferentes laboratorios de soldadura a nivel mundial sobre el análisis del efecto del hidrogeno difusible en juntas soldadas en ambiente subacuático y las repercusiones metalúrgicas y mecánicas que esto implica.

Según registros obtenidos a partir de SCOPUS, puede exponerse que en el año de 1977 fue realizado el primer estudio de hidrogeno difusible en soldadura submarina, en el cual, se demostró que para el proceso de soldadura MIG con cortina de agua se obtuvo disminución del contenido de Silicio, Manganeso y Carbono en el metal de soldadura con la adición de oxígeno al argón como gas de protección en profundidades simuladas de 50 y 90 m (Arata & Skakibara, 1977). Asimismo, SCOPUS muestra que en marzo de 2021 fue publicado un artículo en el cual los autores deducen que un metal de soldadura austenítico puede retener más hidrogeno que un metal de soldadura ferrítico o martensítico, llevando a la reducción del mismo hasta en un 91,72% (Klett, Mattos, Hans, Silva, &Hassel, 2020).

Figura 9

Principales investigadores en el estudio del hidrógeno difusible en soldadura submarina

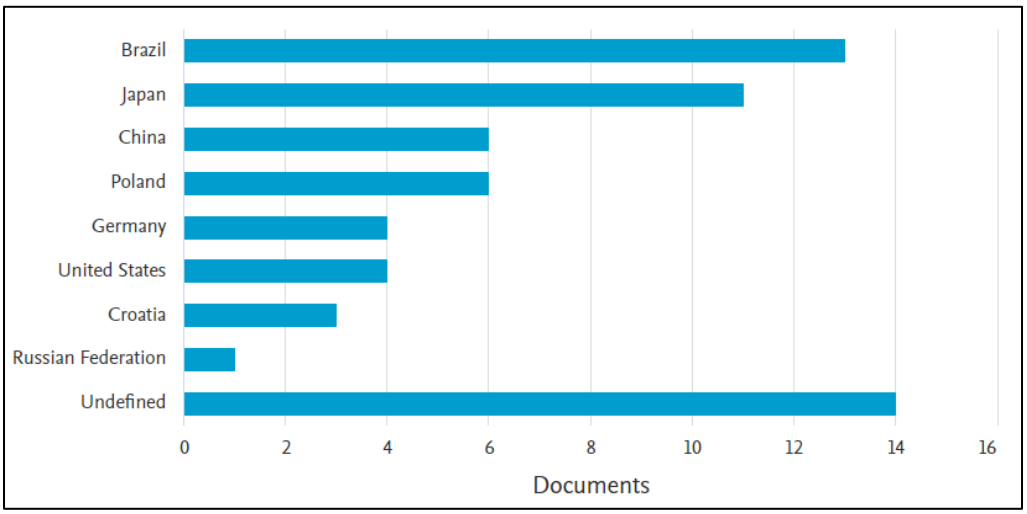


Nota. Tomado de Análisis de datos (Scopus, s.f.)

En la Figura 9 se muestra un gráfico que relaciona la cantidad de documentos por autor entre los años 1977 y 2021. En primer lugar, se encuentra posicionado el profesor Alexander Queiroz Bracarense, el cual estuvo adscrito al programa de ingeniería mecánica de la Universidad Federal de Minas Gerais y teniendo experiencia en el área por más de 30 años, siendo uno de los fundadores del Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación de la UFMG. Como aportes destacados de este investigador, se presenta la fabricación de consumibles Rutilico oxidantes en asociación con otras instituciones, realizándose estudios de la influencia de la polaridad sobre la estabilidad del proceso en soldadura submarina (Uribe, Bracarense, Pessoa, & dos Santos, 2017).

Figura 10

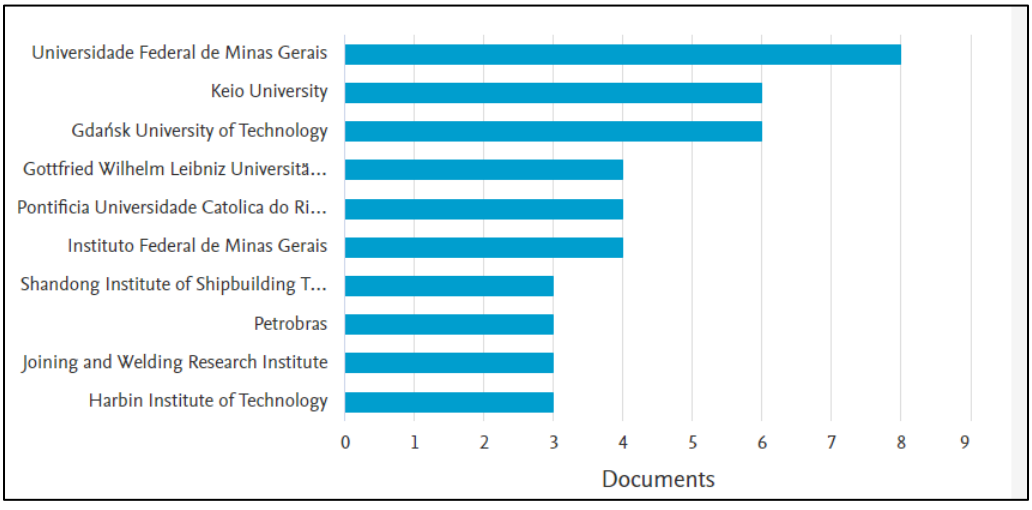
Principales países en los cuales se investiga sobre hidrógeno difusible en soldadura submarina



Nota. Tomado de análisis de datos (Scopus, S.F)

Figura 11

Instituciones que investigan sobre hidrógeno difusible en soldadura submarina

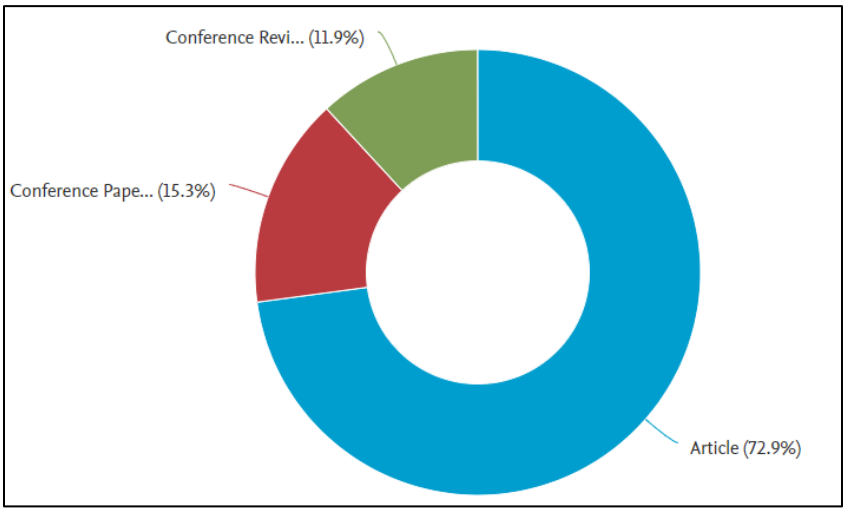


Nota. Tomado de análisis de datos (Scopus, S.F)

Tal como muestra la Figura 10, Brasil es el principal país latinoamericano que investiga los efectos del hidrogeno difusible en soldadura submarina, esto es consecuencia de la sinergia entre instituciones educativas (Universidad Federal de Minas Gerais, PUC RJ, Instituto Federal de Minas Gerais, entre otros) e estamentos federales, tales como Petrobras (Ver Figura 11), debido a la alta demanda del crudo y el aumento en exploración y extracción. Sin embargo, en países como Estados Unidos, Japón, Alemania y Polonia, se ha visto el aumento de estudios en el área debido a la importancia de la aplicación de la soldadura en el ambiente subacuático como solución a reparación y mantenimiento de estructuras offshore.

Figura 12

Tipos de documentos en los cuales se registran los estudios de hidrógeno difusible en soldadura submarina



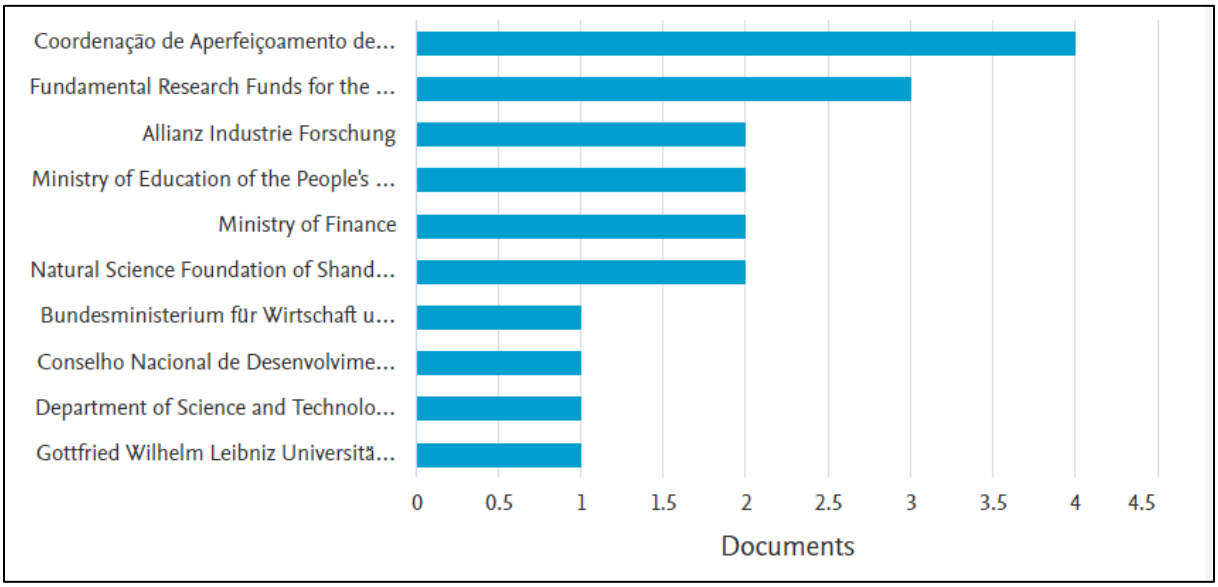
Nota. Tomado de análisis de datos (Scopus, S.F)

La Figura 12 muestra que, para los criterios de búsqueda establecidos, el 72,9 % de los documentos relacionados con el estudio de Hidrogeno difusibles en soldadura submarina fueron

publicados como artículos científicos en revistas, y el restante en Conferencias. Esto garantiza credibilidad y seriedad, además de significar información con gran impacto mundial.

Figura 13

Principales patrocinadores de estudios de hidrógeno difusible en soldadura submarina



Nota. Tomado de análisis de datos (Scopus, S.F)

En la Figura 13 se muestran los principales patrocinadores a nivel mundial de estudios de Hidrogeno difusible en soldadura submarina. Esto evidencia la importancia que tiene para la ciencia y la tecnología grandes aportes económicos, que permitan a su vez, incentivar la investigación en los niveles superiores de educación.

3.2.2 Seleccionar la muestra

Artículos según SCOPUS en los cuales se puede abordar la respectiva temática. En esta etapa, se seleccionó una muestra de 30 artículos luego de utilizar el filtro anterior, ya que estos documentos abordaron de manera precisa y clara la temática de Hidrogeno difusible, relacionada con soldadura submarina. En la Tabla 2, son abordados estos documentos. Cabe resaltar, que se emplearon otros documentos para extender la temática abordada, solo que para el estudio bibliográfico en específico, fue escogida la muestra nombrada anteriormente, debido a que permitió sintetizar toda la información encontrada, pudiéndola organizar en distintos tópicos.

Tabla 2

Documentos obtenidos de Scopus para abordar el estudio de hidrógeno difusible en soldadura submarina húmeda.

Nombre del documento	Autores	Año	Fuente
Control of the difusible hydrogen content in different Steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding	Klett, Mattos, Maier, Silva, Hassel	2021	Materials and Corrosion 72(3), pp. 504 - 516
Effects of PTFE on operational characteristics and diffusible H	Amaral, Moreno-Uribe, Bracarense	2021	Journal of Manufacturing

and O contents of weld metal in underwater wet welding			Processes 61, pp. 270-279
Metallurgical model of diffusible hydrogen and non-metallic slag inclusions in underwater wet welding of high-strength steel	Parshin, Levchenko, Maystro	2020	Metals 10(11), 1498, pp.1-17
The applicability of the Standard DIN EN ISO 3690 for the analysis of difusible hydrogen content in underwater wet welding	Klett, Wolf, Maier, Hassel	2020	Materials 13(17), 3750
Influence of welding speed on weld pool dynamics and welding quality in underwater wet FCAW	Xu, Guo, Zhang, Tan, Zhou	2020	Journal of Manufacturing Processes 55, pp. 381-388
Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints	Klett, hecht-Linowitzki, Grunzel, Maier, Hassel	2020	SN Applied Sciences 2(7), 1269
Effects of electrode waterproof coating on quality of underwater wet welded joints	Tomkow, Fydrych, Wilk	2020	Material 13(13), 2947

Insight into hydrostatic pressure effects on diffusible hydrogen content in wet welding joints using in-situ X-ray imaging method	Chen, Guo, Liu, Xu, Wang	2020	International Journal of Hydrogen Energy 45(16), pp. 10219-10226
Reducing the risk of hydrogen-induced cold cracks in hyperbaric wet welding of high-strength steels by using austenitic welding consumables	Klett, Hassel	2020	Welding and Cutting 19(1), pp. 54-60
Comparison of underwtaer wet welding performed with silicate and polymer agglomerated electrodes	Menezes, Pessoa, Bracarense	2019	Journal of Materials Processing Technology 266, pp. 63-72
Effect of the welding environment ans storage time of electrodes on the diffusible hydrogen content in deposited metal	Tomkow, Fydrych, Rogalski, Labanowski	2019	Revista de Metalurgia 55(1), e140.
Diffusible hydrogen management in underwater	Swierczynska, Fydrych, Rogalski	2017	International Journal of Hydrogen Energy

wet self-shielded flux cored arc welding			42(38), pp. 24532-24540
Measurement and analysis of the diffusible hydrogen in underwater wet welding joint	Kong, Li, Zou, Hu, Wang	2016	MATEC Web of Conferences 39, 03004
Effect of underwater wet welding conditions on the diffusible hydrogen content in deposited metal	Fydrych, wierczynska, Rogalski	2015	Metallurgia Italiana 107(11-12), pp. 47-52
Diffusible hydrogen content and microestructure characteristic in the joint by underwater shielded metal arc welding	Cheng, Hu, Gao, Wang, Jing	2014	Hanjie Xuebao/Transaction of the China Welding 35(9), pp. 45-48
Effect of underwater local cavity welding method conditions on diffusible hydrogen content in deposited metal	Fydrych, Rogalski	2013	Welding International 27(3) pp. 196-202
Effect of the hydrostatic pressure in the difusible hydrogen at the underwater wet welding	Da Silva, Ribeiro, Bracarense, Pessoa	2012	Proceedings of the International Conference on Offhore Mechanics

			and Arctic Engineering – OMAE 6, pp. 1-8
Development of an oxyrutile electrode for wet welding	Santos, Monteiro, Rizzo, Marinho, Vieira	2012	Welding Journal 91(12), pp. 319s-328s
Effect of water depth on diffusible Hydrogen on wet welds	Da Silva, Bracarense, Pessoa	2012	Soldagem e Inspeção 17(4), pp. 298-305
Comparative study of comercial electrodes for underwater wet welding	Bracarense, Pessoa, Santos, Domingues, Vieira	2010	Soldagem e Inspeção 15(4), pp. 325-335
Evaluation of the effects of replacement of hematite by wustite on oxidizing electrodes coating for underwater wet welding	Ferreira, Paciornik, Dos Santos, Bracarense, Pessoa	2010	65th ABM International Congress, 18th IFHTSE Congress and 1st TMS/ABM International Materials Congress 2010 3, pp. 2266-2276
Recent developments in underwater wet welding	Rowe, Liu	2001	Science and Technology of

			Welding and Joining 6(6), pp. 387-396
Predictive electrochemical model for weld metal hydrogen pickup in underwater wet welds	De Medeiros, Raimundo, Liu, Stephen	1998	Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE pp. 9
Hydrogen content of underwater wet welds deposited by rutile and Oxidizing electrodes	Pope, Liu	1996	Proceedinsg of the International Conference on Offshore Mechanics an Artic Enginnering
Effect of difussible hydrogen on mechanical properties of underwater welded joints: Study on improving the mechanical properties of underwater welded joints	Suga, Yasuo	1985	Transactions of the Japan Welding Society 16(2), pp; 125-130

Water Curtain Type Underwater MIG Arc Welding effect of water Pressure on Chemical Composition ans Strength of Weld Metal	Arata, Skakibara	1977	Journal of the Japan Welding Society 46(10) pp. 728-734
Study on the Crack Sensiticity on Mild Steel Welded joint by Underwater Welding	Maumoto, Matsuda, Hasegawa	1981	Journal of the Japan Welding Society 50(9), pp; 881-887
Underwater wet welding and Hydrogen	Hamasaki, Masanobu, Sakakibara, Jitsuo, Arata, Yoshiaki	1981	Metal Construction 13(12), pp. 755-756
Influence of Equivalen Carbon Contens of Steel on Proportions of Martensite, Hardnesses and Susceptibilty to Cold Cracking at Coarse-Grained Regions in Underwater Wet Welding	Kinugawa, Fukushima	1982	Journal of the Japan Welding, Society 51(3), pp. 297-303
Underwater gravity pulsed Arc Welding	Suga, Hasui	1988	Welding International 2(9), pp. 802-807

Nota. Elaboración Propia (2023).

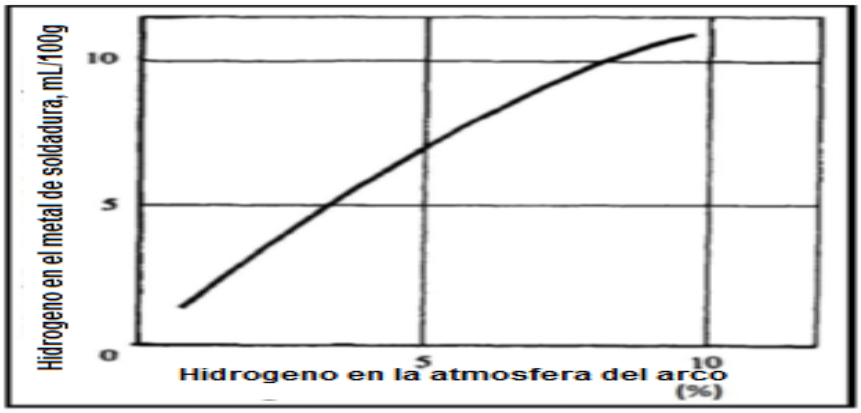
3.3 Analizar el estado del arte y los aspectos más importantes de la evaluación del contenido de hidrógeno difusible en soldadura submarina húmeda

3.3.1 Porosidad y fisura inducidas por hidrógeno

En soldadura submarina, tanto el operario como las piezas a ser reparadas se encuentran en contacto directo con el ambiente húmedo, lo que conlleva un a enfriamiento rápido y a una susceptibilidad de las juntas soldadas a agrietamiento por hidrogeno o también conocido como grietas a frío (Tsai & Masubuchi, 1977) o agrietamiento atrasado (Wang, Li, Lu, & Hu, 2017)., debido a que el hidrogeno puede difundirse en el metal de soldadura durante la disociación de la molécula de agua por el calor generado en el arco eléctrico (Andrade, 1995).. Según Bailey, Coe, Gooch, Hart, Jenkins, N. & Pargeter (1993), durante el proceso de soldadura, el hidrogeno en el ambiente circundante es absorbido por la poza de fusión, tal como representa la Figura 14.

Figura 14

Cantidad de hidrógeno absorbido en la poza de fusión en función de su concentración en la atmósfera de arco (solubilidad a 1900 ° C)



Nota. Tomado de Bailey, Coe, Gooch, Hart, Jenkins & Pargeter, (1993).

Payão (2003) y Rowe & Liu (2001). explican que el agrietamiento por hidrogeno en juntas de acero soldadas se debe a la simultaneidad de los siguientes factores:

- Hidrogeno en el metal de soldadura
- Altas tensiones
- Microestructura susceptible (generalmente martensita)
- Temperaturas inferiores a 200 ºC

Como es conocido, el Hidrogeno puede ser absorbido por la poza de fusión resultante de la quema del arco eléctrico y disociación de la molécula de agua. Además, Cheng, Hu, Gao, Deng, Wang, & Jing, (2014) y Bailey, Coe, Gooch, Hart, Jenkins & Pargeter (1993), menciona que las principales fuentes de hidrogeno en el proceso pueden provenir de la presencia de

pintura, grasa, y partículas de suciedad en el metal de base o en el electrodo, composición del fundente o revestimiento del metal de aporte y metal base.

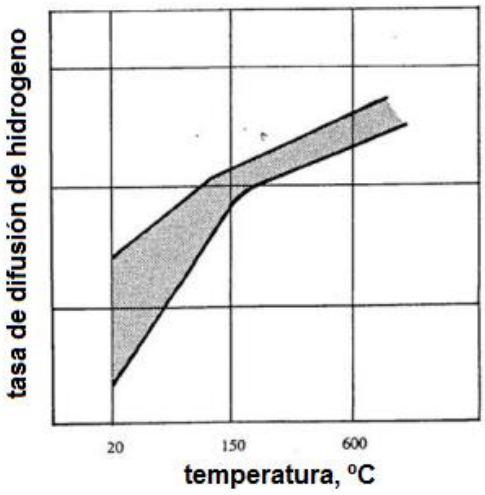
Según Kou (2003), se inducen tensiones elevadas (tensiones residuales) durante el enfriamiento por la contracción de la solidificación y, se desarrollan en mayor grado por contracción térmica bajo las restricciones de las dimensiones de la soldadura, la geometría de la junta y las propiedades mecánicas del metal base.

Referente a la microestructura, Kou (2003), menciona que la formación de microconstituyentes más duros en la ZTA y metal de soldadura son más propensos al aparecimiento de agrietamiento a frio. Bailey, Coe, Gooch, Hart, Jenkins & Pargeter (1993), relatan también que la microestructura de la ZTA y metal de soldadura depende de la tasa de enfriamiento en el intervalo de temperatura crítica del acero, composición química y temperabilidad.

De la misma forma, la temperatura es una variable importante para tener en cuenta, puesto que la tasa de difusión del hidrogeno en aceros ferríticos disminuye considerablemente a partir de temperaturas menores que 150ºC, como es mostrado en la Figura 15.

Figura 15

Tasa de difusión de hidrógeno en acero ferrítico

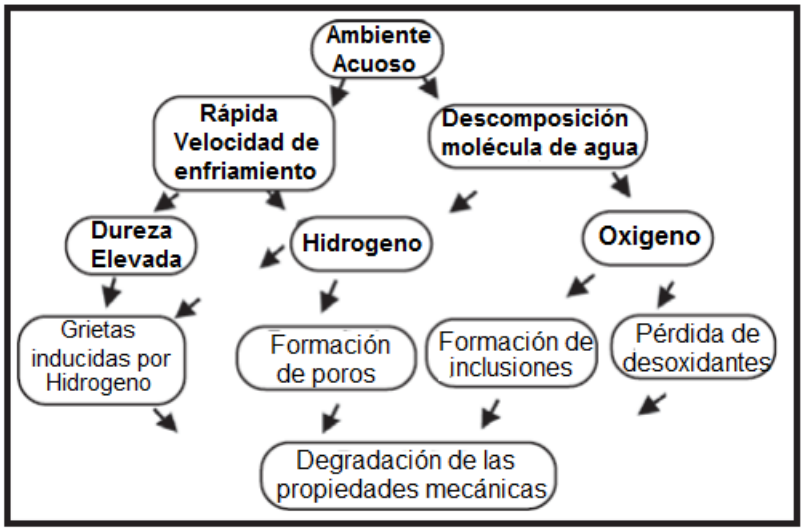


Nota. Tomado de Bailey, N. (1981).

Asimismo, la presencia de Hidrogeno en el metal de soldadura también puede generar porosidad Sanchez-Osio, Liu, Olson & Ibarra (1993), y en consecuencia, degradación de las propiedades mecánicas de las juntas obtenidas por soldadura submarina (Pope, 1995); tal como es mostrado en la Figura 16.

Figura 16

Efecto del medio subacuático en las propiedades mecánicas en soldadura submarina



Nota. Tomado de Pope (1995).

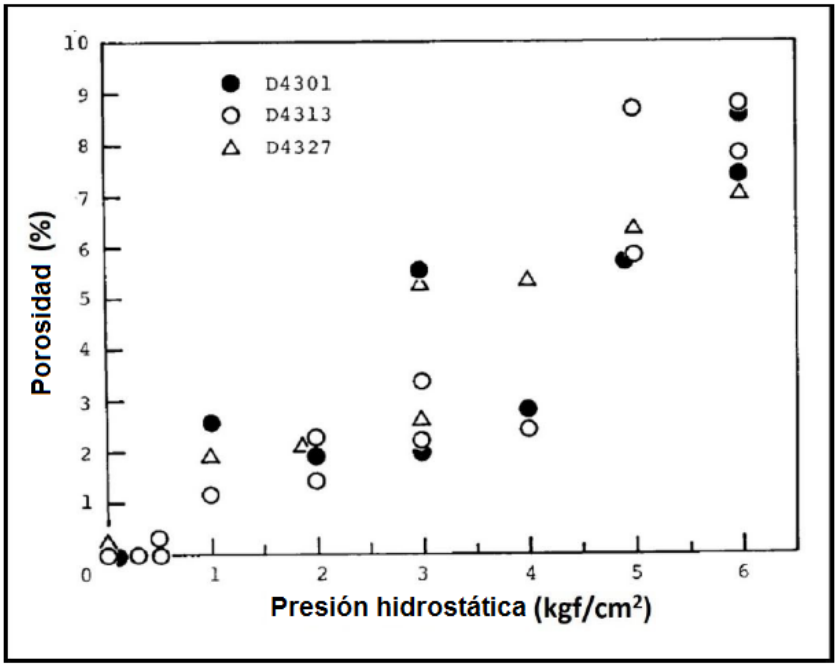
La porosidad en el metal de soldadura es uno de los defectos más comunes en todos los procesos de soldadura (Trevisan, Schwemmer, & Olson, 1990), siendo a su vez, uno de los mayores problemas en soldadura submarina. Liu, Pope & Daemen (1994) y Perez (2007) mencionaron que la porosidad provoca reducción de la tenacidad, ductilidad y límite de elasticidad del metal de soldadura, y de acuerdo a lo relatado por Sanchez-Osio, Liu, Olson, & Ibarra (1993), es causada por la concentración de hidrogeno.

Estudios ejecutados por Suga y Hasui (1986), permitieron establecer que en soldadura submarina la presión hidrostática y la porosidad son directamente proporcionales, presentándose poros a partir de 5 metros de profundidad, tal como muestra la figura 17. Sin embargo, Suga y Hasui (1986) también relatan que la ausencia de porosidad en las soldaduras realizadas en

profundidades inferiores a 5 m (0,5 kgf / cm2) pueden estar relacionadas con el bajo contenido de hidrógeno, lo cual no es suficiente para promover el crecimiento de los poros.

Figura 17

Efecto de la profundidad en la porosidad

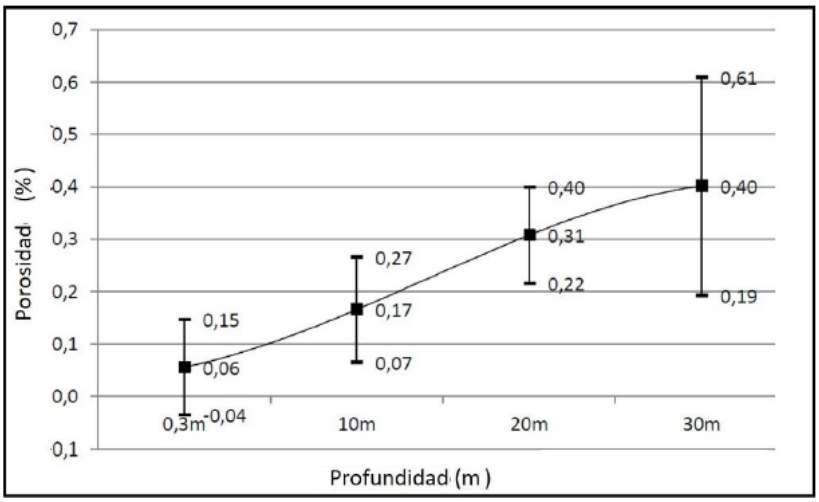


Nota. Tomado de Suga y Hasui (1986).

Del mismo modo, Da Silva, Bracarense, & Pessoa (2012), analizaron la influencia de la profundidad de soldadura (presión) en la formación de poros. Para la ejecución de los experimentos, fue utilizado un electrodo barnizado comercial E6013. La porosidad del metal de soldadura se midió a profundidades de 0,3 m, 10 m, 20 m y 30 m. Los resultados, que se pueden ver en la figura 18, reflejan que la porosidad del metal de soldadura ha aumentado con la profundidad.

Figura 18

Efecto de la profundidad en la porosidad en soldadura submarina con un consumible E6013



Nota. Tomado de Silva, Bracarense, & Pessoa (2012).

3.3.2 Susceptibilidad y efectos de la composición química y microestructura en el hidrógeno difusible

Trabajos llevados a cabo por Neeraj, Srinivasan, & Li (2012) y Duplessis, & Dutoit (2006), relatan la posibilidad de controlar el contenido de hidrogeno difusible mediante la modificación de la composición química de los consumibles utilizados en el proceso.

Por ejemplo, Turani, Bracarense, Felizardo & Pessoa (2012), utilizaron electrodos revestidos E7018 convencionales comparándolos con electrodos de la misma familia, pero siendo impermeabilizados. Como resultado, el contenido de hidrógeno difusible en el metal de soldadura producido con electrodos impermeables es extremadamente bajo, estando por debajo

del contenido de hidrogeno difusible en el metal de soldadura depositado por consumibles de clase E7018 convencionales. Rowe & Liu (2001) citados por Parshin, S., Levchenko, A. & Maystro, A. (2020) mencionan que un mecanismo para la reducción de hidrógeno difusible es una disminución en la presión parcial de hidrógeno en la atmósfera de burbujas de vapor-gas, por ejemplo, por disociación de carbonatos y fluoruros, a saber, Na2CO3, NaF, CaCO3, CaF2, MgCO3 y MgF2, en el flujo del alambre tubular.

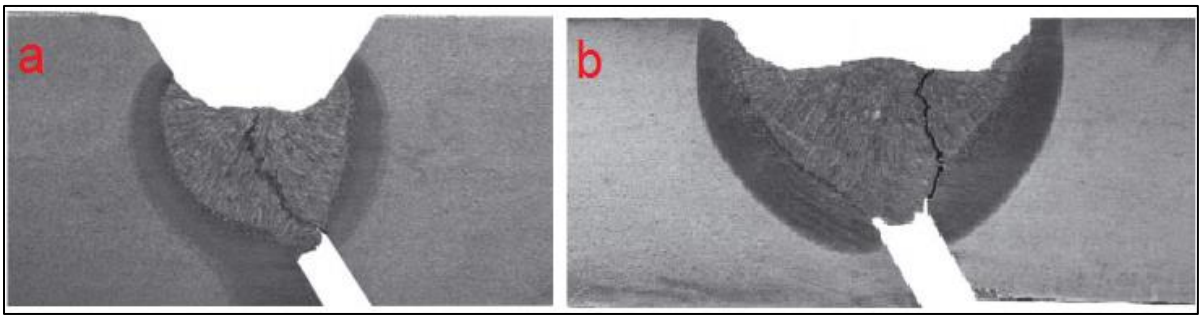
Asimismo, Ozaki, Naiman & Masubuchi, (1977); Martin, Weber, Izawa, Wagner, Pundt & Theisen (2011) y Perng & Altstetter (1988) mencionan que los problemas causados por el hidrógeno son menores en aceros con carbono equivalente menor a 0,4%, sin embargo, metales de soldadura con microestructura austenitica son apropiados para aceros con carbono equivalente mayor a 04%, debido a que presentan mayor solubilidad del Hidrogeno que un metal de soldadura ferritico. Por ende, los aceros inoxidables austeníticos se utilizan a menudo para aplicaciones en las que está presente el hidrógeno, debido a su ductilidad a temperaturas muy bajas, baja conductividad térmica y a la menor susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno que los aceros ferríticos (Martin, Weber, Izawa, Wagner, Pundt & Theisen, 2011).

Fydrych, Labanowski y Rogalski (2013), caracterizaron los problemas de soldabilidad de aceros de alta resistencia en soldadura submarina mediante el uso de consumibles rutilicos. Establecieron que el agua como entorno de soldadura intensifica la acción de factores desfavorables que influyen en la susceptibilidad al agrietamiento en frío de las uniones de acero soldadas. Fisuras en las secciones transversales de los aceros S500M y S355J2G3 son mostradas en la figura 19.a y figura 19.b, respectivamente. En este trabajo se pudo concluir la

susceptibilidad de la microestructura formada, además, el ambiente, la disociación de la molécula de agua y la dureza pueden inducir en el aparecimiento de agrietamiento a frio.

Figura 19

Fisuras evidenciadas en las secciones transversales. (a) S500M (b) S355J2G3



Nota. Tomado de Fydrych, Labanowski y Rogalski (2013).

Pope y Liu (1996) estudiaron el hidrógeno difusible de las soldaduras húmedas depositadas por electrodos oxidantes y rutilicos. Las formulaciones de electrodos utilizadas en este trabajo variaron desde electrodos típicamente rutilicos hasta electrodos completamente oxidantes. Esto fue posible gracias a las adiciones sistemáticas de hematita al revestimiento del electrodo. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos por Pope y Liu (1996), en los que se puede observar que la adición de hematita (Fe2O3) en el recubrimiento del electrodo redujo significativamente el hidrógeno difusible de las soldaduras húmedas. Según los autores, los electrodos oxidantes tenían los valores más bajos de hidrógeno total (difusible + residual). Este hidrógeno total medido representa la cantidad de hidrógeno presente en el metal de soldadura justo después de que la soldadura se haya enfriado a temperatura ambiente. Por lo tanto, es razonable suponer que el hidrógeno difusible más bajo asociado con los electrodos oxidantes se debe a algún proceso que ocurre durante o antes de la solidificación del metal de soldadura. Este

hecho podría explicarse por la mayor cantidad de oxígeno en la atmósfera del arco eléctrico de los electrodos oxidantes, lo que provoca la oxidación de parte del hidrógeno presente en el arco eléctrico, reduciendo así la absorción de este elemento en el metal de soldadura líquido. Los autores detectaron FeO solo en la punta fundida de los electrodos oxidantes. De esta forma, una capa de FeO puede ser responsable del menor contenido de hidrógeno del metal de soldadura depositado con los electrodos oxidantes (Ferreira, Paciornik, Dos Santos & Bracarense, 2010). Es posible que el hidrógeno reaccione con el oxígeno de la monocapa de iones Fe +2 O -2, reduciendo la absorción de hidrógeno por el grupo de fusión.

Tabla 3

Medición del hidrógeno difusible y residual para distintos electrodos

Electrodo	Hidrogeno difusible	Hidrogeno Residual
A (50% TiO2)	92.3±8.6	4,1±1,9
B (20% Fe2O3)	43,9±9,8	2,9±0,7
C (30% Fe2O3)	42,4±3,6	4,9±0,4
D (50% Fe2O3)	39,8±1,8	4,2±1,9
E (20% Fe2O3 + 10%MgO)	51,3±15,5	4,3±0,4
F (Oxidante 2%Ni)	44,9±5,1	4,4±1,5
G (E6013)	99,5±2,5	2,8±1,2

Nota. Tomado de Pope y Liu (1996)

Relativo a electrodos oxidantes, experimentos ejecutados por Bracarense, Pessoa, dos Santos, Monteiro, Rizzo, Paciornik, Reppold, Domingues & Vieira (2010) realizaron

caracterización microestructural, análisis y cuantificación de inclusiones, composición química del metal de soldadura, dureza Vickers, hidrógeno difusible y evaluación de soldabilidad para metales de soldadura obtenidos a partir del uso de electrodos revestidos a 0,5 metros de profundidad, en un tanque abastecido con agua dulce. Los resultados obtenidos de hidrogeno difusible, evidenciados en la tabla 4, muestran que el electrodo oxidante ensayado (Electrodo A), es capaz de producir soldaduras de bajo contenido y, por tanto, menos susceptible a la aparición de fisuras a frío, tanto en el metal de soldadura como en la ZTA del metal base.

En contexto con lo relatado anteriormente, Santos, Monteiro, Rizzo, & Bracarense (2012) describieron el desarrollo experimental de un electrodo de rutilico oxidante E70XX con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas del metal de soldadura y minimizar el contenido de hidrógeno difusible en comparación con los consumibles comerciales existentes. Para ellos, fueron producidos dieciocho lotes de electrodos en instalaciones industriales. Asimismo, se adicionaron níquel y molibdeno para fortalecer el metal de soldadura. La mayoría de las pruebas de soldadura fueron realizadas mediante simulaciones de laboratorio y también por buceadores en el mar a 10 m de profundidad, con el objetivo de obtener la calificación hasta 20 m según AWS D3.6M: 2010. Como resultados, el contenido de hidrógeno difusible de aproximadamente 20 ml / 100 g fue alcanzado en el desarrollo de electrodos tipo rutilico oxidantes, siendo aproximadamente equivalente al contenido de los electrodos oxidantes típicos y considerablemente más bajo que el contenido típico de los electrodos de tipo rutilo. En consecuencia, se logró una baja porosidad y la ausencia de micro fisuras de metal de soldadura, así como una mejor operatividad relacionada con el electrodo oxidante comercial. Además, los

electrodos desarrollados aquí mostraron una menor porosidad y un rendimiento superior en términos de tenacidad (energía Charpy) y ductilidad (alargamiento).

Tabla 4

Valores obtenidos en el análisis de contenido de Hidrogeno difusible para diferentes familias de electrodos revestidos en soldadura submarina

Electrodo	Hidrogeno difusible (mL/100 g)				Promedio	Desviación
A	18.7	24.5	18.1	-	20.43	3.53
E	98.8	101.4	91.4	-	97.20	5.19
D	96.8	100.9	68.5	-	88.73	17.64
B	84.8	87.9	89.7	-	87.43	2.47
C	85.1	105.2	72.3	78.9	85.38	14.21

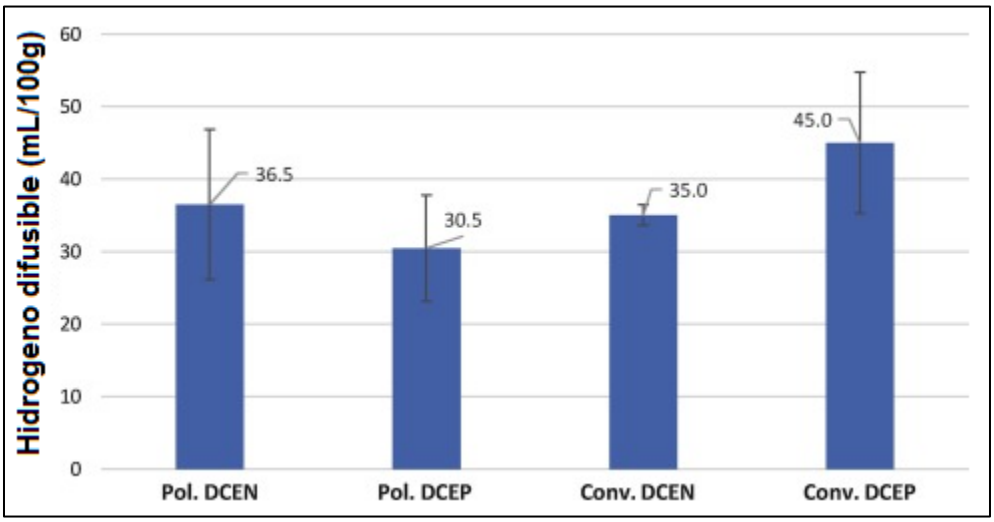
Nota. Tomado de Bracarense, Pessoa, dos Santos, Monteiro, Rizzo, Paciornik, Reppold, Domingues & Vieira (2010).

Ribeiro, Pessoa & Bracarense (2019), compararon electrodos básicos convencionales barnizados y electrodos básicos aglomerados con polímero en soldadura húmeda subacuática a una profundidad simulada de 10 m. Se utilizó un tanque hiperbárico para la simulación de profundidad y un dispositivo de soldadura por gravedad para hacer el cordón en las soldaduras de placa. Se depositaron soldaduras cordón sobre placa con corrientes de soldadura de 100, 120, 140, 160 y 180 A con polaridades DCEN y DCEP, con el fin de evaluar la estabilidad del arco mediante un índice estadístico adimensional. La corriente de soldadura que mostró un mejor nivel de estabilidad en ambas polaridades se eligió para evaluar la morfología del cordón de soldadura, la porosidad del metal de soldadura, el oxígeno del metal de soldadura y los niveles de

hidrógeno difusible. En la figura 20 se observa que el menor índice de hidrógeno difusible se encontró para el electrodo aglomerado con polímero en la polaridad DCEP (30,5 ml / 100 g de metal depositado), que presentó la mayor cantidad de oxígeno. El valor más alto se encontró para el electrodo convencional en la polaridad DCEP (45 ml / 100 g de metal depositado), que fue el que presentó los valores más bajos de oxígeno. El electrodo aglomerado con polímero en la polaridad DCEN y el electrodo convencional en la polaridad DCEN obtuvieron valores intermedios y muy cercanos.

Figura 20

Contenido de Hidrogeno difusible para electrodos de polímero y convencionales en las dos polaridades



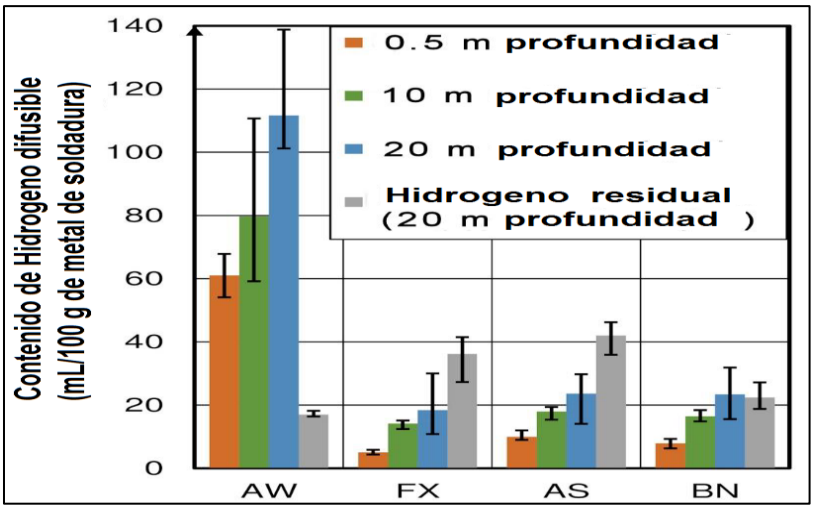
Nota. Tomado de Ribeiro, P., Pessoa, E. & Bracarense, A. (2019).

Klett y Hassel (2020), ejecutaron el proceso de soldadura con electrodo revestido en diferentes presiones, simulando profundidades de 0.5m, 10m y 20m. Tal como muestra la figura 21, en todas las profundidades del agua, el uso de metal de soldadura austenítico da como

resultado una reducción del contenido de hidrógeno difusible. La mayor reducción del contenido de hidrógeno difusible podría lograrse con el electrodo austenítico Finox 4519 AC. Se midió una reducción del 92% (0,5 m), 82% (10 m) y 85% (20 m) de hidrógeno difusible en comparación con la soldadura con el electrodo ferrítico Aquaweld. A 0,5 m de profundidad del agua, el contenido medio de hidrógeno difusible de todas las soldaduras austeníticas es inferior a 10 ml / 100 g de metal de soldadura. En 10 m de profundidad de agua se alcanzan promedios por debajo de 20 ml / 100 g de metal de soldadura y en 20 m de profundidad de agua por debajo de 25 ml / 100 g de WM.

Figura 21

Contenido de hidrogeno difusible para distintos electrodos con metal de soldadura de matriz austenítica y ferrítica en diferentes profundidades



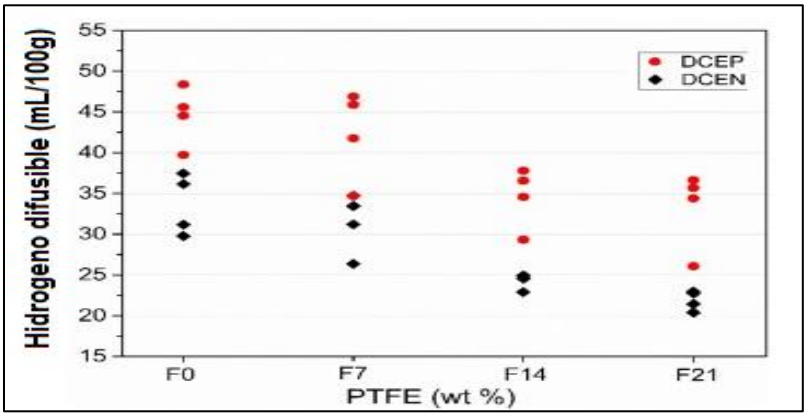
Nota. Tomado de Klett y Hassel (2020).

Campos, Moreno & Bracarense (2021), desarrollaron alambres tubulares oxidantes de tipo rutilo utilizando politetrafluoroetileno (PFTE) como ingrediente de fundente en

concentraciones de hasta 21%. Ejecutaron el proceso en posición plana a una profundidad de 0,5 m utilizando electrodos tanto negativos (DCEN) como positivos (DCEP). Realizaron la adquisición y procesamiento de señales eléctricas de soldadura para determinar características del proceso y cuantificar la aparición de cortocircuitos y extinción de arco. También evaluaron la influencia de la composición del fundente en la forma del cordón de soldadura y su contenido de hidrógeno y oxígeno. Tal como muestra la figura 22, las formulaciones con altas adiciones de PTFE exhiben bajos niveles de H y O difusibles. Estos resultados son más pronunciados en la condición DCEN, ya que en esta condición el número de cortocircuitos aumenta con el aumento en la cantidad de PTFE, lo que indica una reducción de la longitud de arco, que a su vez influye directamente en la reducción de la absorción de H y O.

Figura 22

Hidrogeno difusible para diferentes contenidos de PTFE en el fundente del alambre tubular, evaluado en las dos polaridades.



Nota. Tomado de Campos, Moreno & Bracarense (2021).

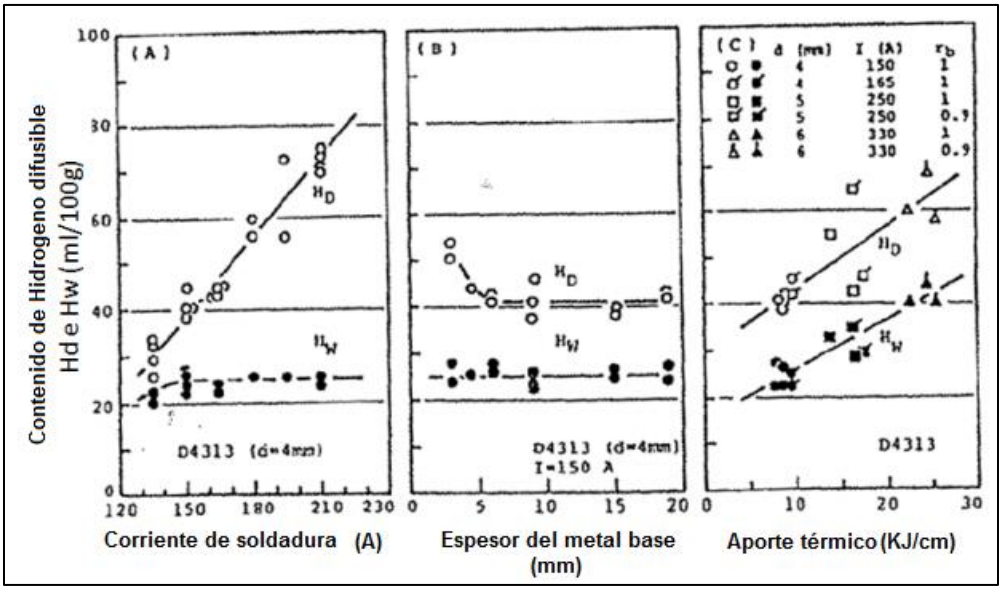
3.3.3 Efecto de la profundidad, ambiente y otras variables relacionadas en el contenido de hidrogeno difusible

Suga (1985) estudió el efecto del hidrógeno difusible sobre las propiedades mecánicas de juntas soldadas en el ambiente húmedo, en una profundidad de 200 mm. Fue utilizado un sistema de gravedad, el cual ejecuta el proceso mediante arrastre, siendo soldados en polaridad directa (DCEN) electrodos de 4 y 6 mm de diámetro, siendo empleados las siguientes familias: Ilmenita (D4301), cal-titania (D4303), celulósico (D4311), alto oxido de titanio (D4313) y hierro-óxido de hierro (D4327). En este mismo trabajo, Suga (1985) midió el hidrógeno difusible en relación con el metal depositado (Hd-hidrógeno difusible por 100 g de material depositado) y también en relación con el metal soldadura (Hw-hidrógeno difusible por 100 g de metal de soldadura). Los resultados, que son presentados en la figura 22, permiten concluir que el hidrogeno difusible del metal de soldadura depositado es linealmente proporcional a la corriente. En este caso, el espesor del metal base influye en el contenido de hidrógeno difusible solo para espesores del metal base inferiores a 5 mm, proporcionando un aumento en el hidrógeno difusible del metal de soldadura depositado con una reducción en el espesor del metal base. En cuanto al aporte térmico, Suga (1985) también observó que el hidrógeno difusible del metal depositado (Hd) y el metal de soldadura (Hw) tiene una relación linealmente proporcional con el aporte térmico. En cuanto al hidrógeno del metal de soldadura (Hw), no hubo variaciones en relación con la corriente de soldadura y el espesor del metal base. El aumento de la corriente de soldadura implica una mayor velocidad de fusión del electrodo, lo que se traduce en una mayor velocidad de soldadura, ya que Suga (1985) utilizó un sistema de soldadura por gravedad para la ejecución de los cordones de soldadura. El aumento de la velocidad de soldadura da como resultado tasas de enfriamiento más

altas para el metal de soldadura solidificado. Por lo tanto, hay menos tiempo para que el hidrógeno se difunda del metal de soldadura solidificado, lo que proporciona valores más altos de hidrógeno difusible con una corriente de soldadura creciente. En cuanto a las propiedades mecánicas de las soldaduras húmedas; Suga (1985), Suga (1988) informó que es posible obtener ganancias considerables en los límites de resistencia, alargamiento, flexión, ductilidad y tenacidad con el tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Figura 23

Influencia de algunos parámetros en soldadura submarina



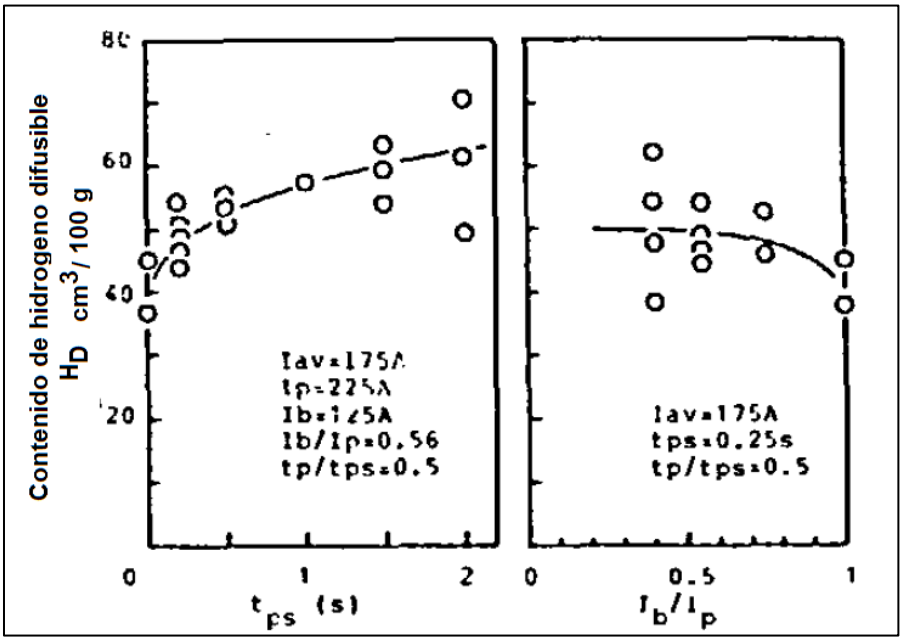
Nota. Tomado de Suga (1985).

Suga y Hasui (1988), emplearon un sistema de gravedad para ejecutar el proceso de soldadura con electrodo revestido en una profundidad de 100 mm en la posición plana y polaridad negativa, empleado corriente pulsada. Para el análisis de hidrogeno difusible, utilizaron

un consumible de la familia cal-titania (D5003). En la figura 24 es mostrado que el hidrogeno difusible aumenta con la corriente de pico (Ip), y tiempo de pulso (ts).

Figura 24

Influencia de algunos parámetros de corriente pulsada en soldadura submarina

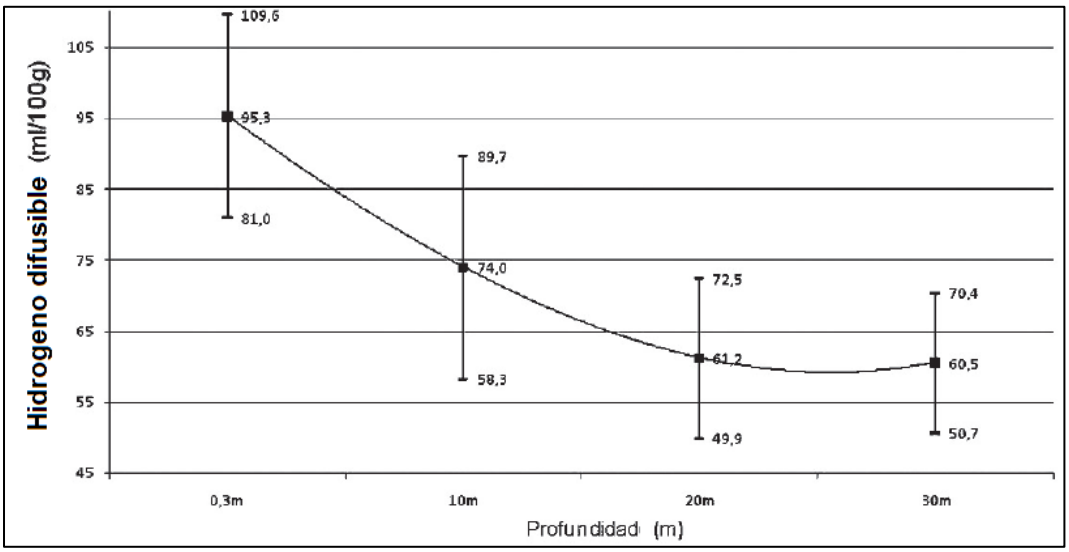


Nota. Tomado de Suga y Hasui (1988).

Bracarense, Da Silva y Pessoa (2012) ejecutaron la medición del Hidrogeno difusible mediante cromatografía gaseosa en las profundidades de 0.30, 10, 20 y 30 metros, tal como muestra la figura 25, utilizando un electrodo comercial E6013 barnizado, empleando una cámara hiperbárica que simula profundidad mediante la inyección de aire comprimido.

Figura 25

Efecto de la profundidad en el hidrogeno difusible en soldadura submarina con electrodo E6013



Nota. Tomado de Bracarense, Da Silva y Pessoa (2012).

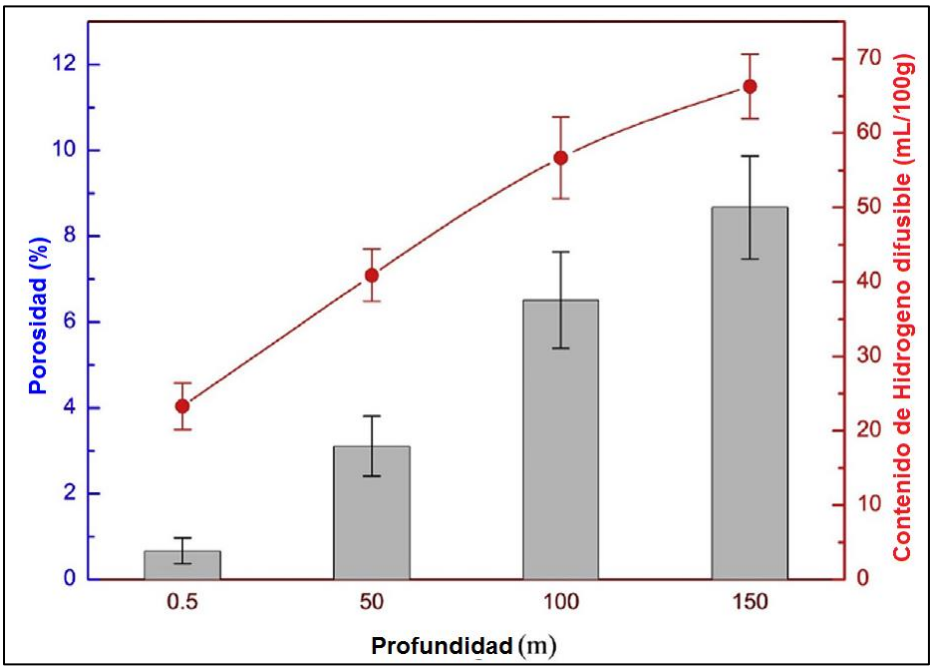
En general, el contenido del hidrogeno difusible es inversamente a la profundidad, puesto que, al variarse de 0,3 metros para 10 metros; el hidrogeno difusible disminuyó en un 25%, reduciéndose a su vez en un 16% cuando se varió la profundidad de 10 metros a 20 metros. Sin embargo, los resultados obtenidos para la profundidad de 30 m no fueron estadísticamente diferentes de los resultados obtenidos para la profundidad de 20 m. Esto significa que, probablemente, el hidrógeno difusible alcanza un nivel constante para presiones de 20 m (estabilización), lo que también es afirmado por Ibarra, Grupps y Liu (1994).

Chen, Guo, Liu, Zhang, Xu & Wang (2020).emplearon alambre tubular con 1,6 mm de diámetro, al cual se agregaron algunos minerales como Fe2O3 y CaF2 en el núcleo del fundente para reducir el hidrógeno disuelto en el metal de soldadura. El proceso fue ejecutado en la

polaridad inversa (DCEP), realizándose en una cámara hiperbárica de 0,5 m de profundidad. Por encima del agua, el aire en la cámara se presurizó a 0,5, 1,0 y 1,5 MPa para simular el entorno de presión hidrostática a una profundidad de 50, 100 y 150 m, respectivamente. Como parámetros constantes, se utilizó: Tensión de 45 V, velocidad de alimentación del alambre de 6m/min, velocidad de desplazamiento del metal base de 3 mm/s, distancia entre la boquilla de contacto y la pieza de 20 mm y una extensión de alambre de 15 mm. La Figura 25 muestra el contenido de hidrógeno difusible y la porosidad del metal de soldadura obtenido en agua de 0.5, 50, 100 y 150 m de profundidad, respectivamente. Obviamente, ambos muestran las tendencias ascendentes a medida que aumenta la profundidad del agua. La porosidad del metal de soldadura aumentó de 0,67% a 8,67% y la profundidad del agua aumentó a 150 m. A 0,5 m de profundidad del agua, el contenido de hidrógeno difusible en el metal de soldadura fue de 23,3 ml / 100 g. A medida que la profundidad del agua aumentó a 150 m, el valor del hidrógeno difusible casi se duplicó a 66,3 ml / 100 g. En general, este valor de hidrógeno difusible en el metal de soldadura es inferior a 15 ml / 100 g cuando la soldadura se realiza en un ambiente de aire utilizando el mismo tipo de material de soldadura. Claramente, la descomposición del agua indujo un ambiente rico en hidrógeno que rodeaba la zona de soldadura, que fue una de las principales razones del aumento de hidrógeno difusible. En el entorno de aguas profundas, la alta presión hidrostática suprimió el escape de hidrógeno en forma de gas. Se ha dejado una gran cantidad de burbujas de gas hidrógeno en la poza de fusión y luego se formaron algunos poros de gas hidrógeno después del enfriamiento del metal de soldadura.

Figura 26

Efecto de la profundidad en la porosidad y contenido de hidrogeno difusible en soldadura submarina



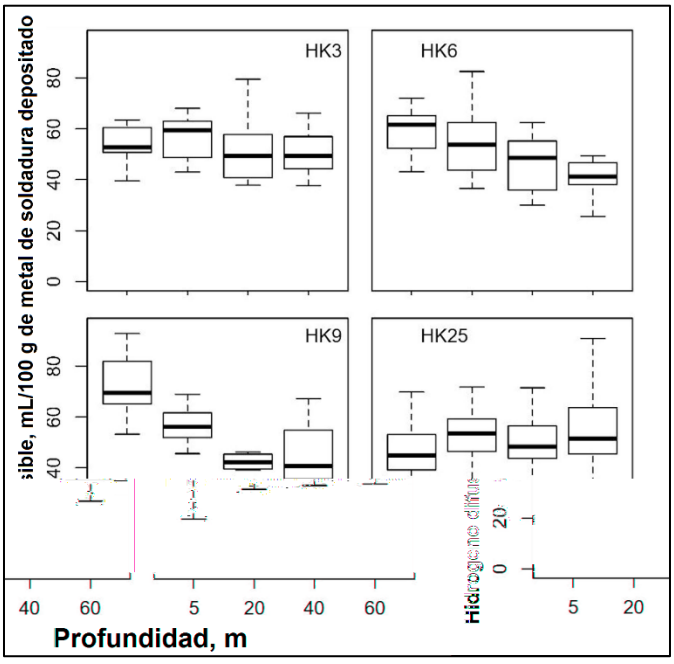
Nota. Tomado de Chen, Guo, Liu, Zhang, Xu & Wang (2020).

Klett, Oliver, Schmidt & Linowitzki (2020) realizaron el análisis de hidrogeno difusible para 4 tipos de electrodos revestidos, en 4 profundidades simuladas (5m, 20m, 40m y 60m) tal como es mostrado en la Figura 27. Como resultado, es evidenciada la tendencia de la disminución del hidrogeno difusible al aumentar la profundidad. Asimismo, El voltaje del arco (longitud del arco) y la corriente de soldadura mostraron una correlación positiva con el contenido de hidrógeno difusible. Las corrientes más altas conducen a una mayor entrada de energía y, por lo tanto, dan como resultado una mayor cantidad de agua disociada. Los arcos más largos conducen a columnas de arco más grandes y temperaturas de arco más altas. Por lo tanto,

hay más agua en contacto con el arco y puede disociarse. Ambos conducen a un aumento de hidrógeno difusible en el metal de soldadura. La alteración del contenido de celulosa del revestimiento del electrodo condujo a contenidos de hidrógeno difusible ligeramente más altos, independientemente de la profundidad del agua. Esto se explica por el hidrógeno contenido en la celulosa. El estudio también mostró la inconsistencia del proceso de soldadura en húmedo. Se necesitaba una gran cantidad de muestras para obtener resultados estadísticamente válidos, incluso en un proceso automatizado. Solo un gran esfuerzo y un gran tamaño de muestra conducen a resultados reproducibles válidos que se pueden transferir a la aplicación manual.

Figura 27

Análisis de hidrogeno difusible para 4 tipos de electrodos revestidos, en 4 profundidades simuladas (5m, 20m, 40m y 60m)

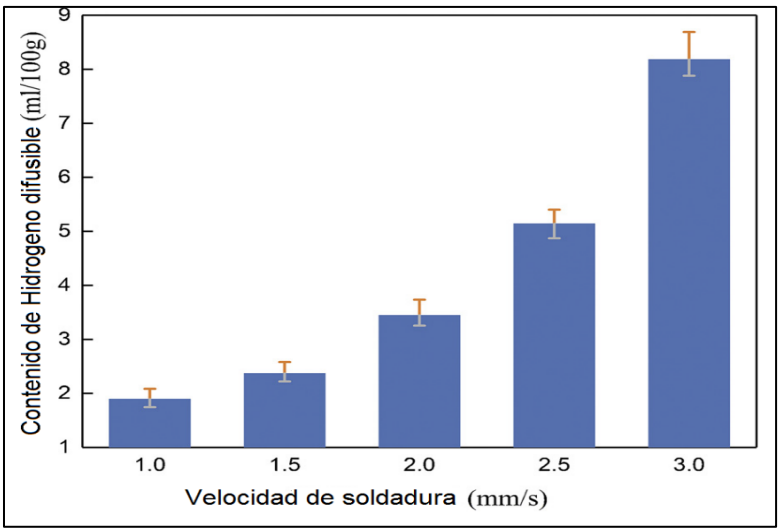


Nota. Tomado de Klett, Oliver, Schmidt & Linowitzki (2020).

Xu, Guo, Zhang, Jiang, Tan, & Zhou(2020), estudiaron los efectos de la velocidad de soldadura en la dinámica de la poza de fusión, la formación de la soldadura y el contenido de hidrógeno difusible en el metal depositado durante la soldadura submarina con alambre tubular (FCAW). En la Figura 28 es mostrado el efecto de la velocidad de soldadura en el contenido de hidrogeno difusible, La longitud del charco fundido aumentó con el incremento de la velocidad de soldadura. Mientras que el tiempo de solidificación y la fluctuación del charco fundido se redujeron. A medida que aumenta la velocidad de soldadura, el contenido de hidrógeno difusible en el metal depositado se incrementa gradualmente, pasando de unos 1,9 ml/100 g a una velocidad de soldadura de 1 mm/s a 8,2 ml/100 g a un tiempo de 3 mm/s, lo que supone unas cuatro veces más. Esto se debió a que se produjo un menor desprendimiento de hidrógeno de la poza de fusión con la solidificación más rápida y la menor estabilidad de la pobre poza fundida.

Figura 28

Efecto de la velocidad de soldadura en el contenido de hidrogeno difusible

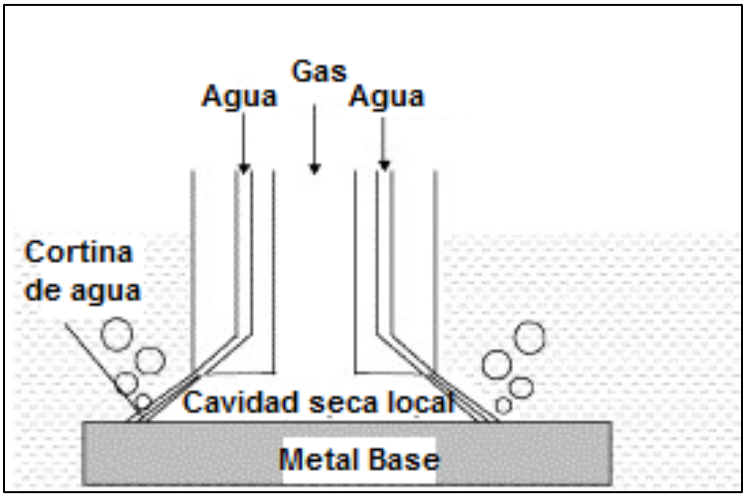


Nota. Tomado de Xu, Guo, Zhang, Jiang, Tan, & Zhou (2020).

Por otro lado, es posible ejecutar soldadura submarina con el auxilio de una cavidad seca local, la cual ayuda a la formación de una cortina de agua que simula un ambiente seco debajo del agua. Zhang, Ashida, Shono & Matsuda (2006), emplearon esta herramienta (Ver figura 29), con el objetivo de evaluar su desempeño en la tecnología de soldadura por rayo láser subacuático (LBW), la cual es empleada con el fin de reparar efectos o daños inducidos por la irradiación en las partes internas de un reactor nuclear (Sato, Kobayashi, Sano, & Kimura, 2000) (Kojiam, Owaki, Tsuchiya & Katayama, 1997) (Nakat & Oishi, 1998).

Figura 29

Esquema de cavidad local seca utilizada en soldadura submarina



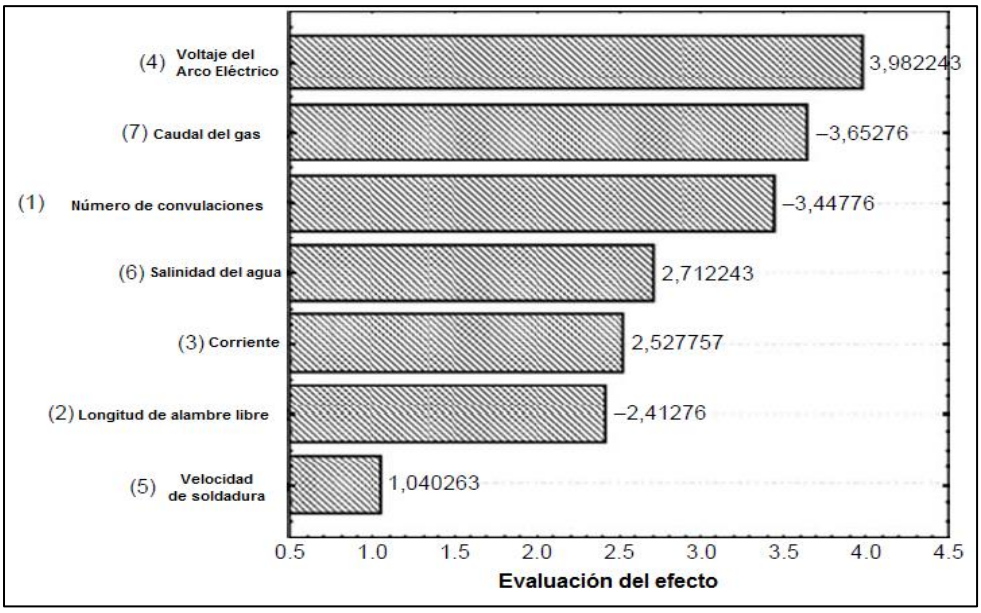
Nota. Tomado de Zhang, Ashida, Shono & Matsuda (2006).

Fydrych & Rogalski (2013), utilizaron cavidad local seca para soldar un alambre sólido tipo G3sil de 1,2 mm de diámetro, con la ayuda de CO_2 como gas de protección a 150 mm de profundidad. Los autores realizaron mediciones del Hidrogeno difusible mediante el método de desplazamiento de glicerina y, aplicando estadística basados en el plan Plackett-Burman

determinaron de manera eficiente el efecto de los parámetros del proceso, tales como factor de circunvalación (factor estadístico utilizado en el análisis de hidrogeno difusible), longitud del alambre del electrodo, corriente de soldadura, voltaje del arco, velocidad de soldadura, salinidad del agua y caudal de gas protector. Un aumento en el valor del voltaje del arco, la salinidad del agua, la velocidad de soldadura y la corriente de soldadura aumenta la cantidad de hidrógeno difusible, mientras que el efecto opuesto se logra mediante un aumento en la longitud de alambre libre, la velocidad de flujo del gas protector y el factor de circunvoluciones. En la figura 30 es mostrado un diagrama de Pareto representando los anteriores parámetros y sus respectivas significancias.

Figura 30

Diagrama de Pareto de los efectos del modelo aplicado para análisis de hidrogeno difusible



Nota. Tomado de Fydrych & Rogalski (2013).

3.3.4 Ejecución del análisis de hidrogeno difusible.

Las pruebas de hidrogeno difusible son estrictamente necesarias y están ligadas a la soldadura subacuática tanto como a la soldadura atmosférica, puesto que deben cumplir con estándares regidos por la norma de la AWS en los cuales se denota que existen diferentes márgenes en la medición para soldadura atmosférica siendo esta la más baja en comparación a la soldadura subacuática húmeda. Para el caso de la soldadura subacuática húmeda, se debe tener en cuenta que los niveles son tan elevados por el medio donde se realiza, ya que hay contacto directo con el agua y, en la mayoría de los casos, esto produce gradientes de temperatura muy radicales dando así un enfriamiento de la poza de soldadura muy rápido, produciendo efectos negativos como tensiones en las juntas unidas, dado que las altas temperaturas del proceso de soldadura producen una dilatación de la zona y su rápido enfriamiento producen una contracción muy brusca (Payão, Mello, Medeiros & Paranhos, 2004).

Otro de los efectos negativos que produce la soldadura subacuática mojada es el contenido de hidrogeno dentro de la poza de soldadura, debido a que se libera este, entre otros gases. También, la disociación de la molécula de agua en razón de la quema del arco eléctrico, propicia a que este sea un ambiente con un importante contenido de hidrogeno, que junto a la presión ser mucho mayor a diferencia de la atmosférica, produce que las moléculas de hidrogeno queden atrapadas en la poza de soldadura que posteriormente solidificará (Chen, Guo, Cheng, Xin, & Guodong, 2020).

Cabe destacar que esto reduce en gran medida la confiabilidad del trabajo realizado y aumenta el riesgo a aparecimiento de agrietamiento y porosidad, por ende, cada vez más se trabaja con el auxilio de diferentes métodos que ayuden a la reducción de hidrogeno difusible en la soldadura, métodos que van desde modificaciones en la composición química en los electrodos, hasta cambios en parámetros del proceso, tal como se enunció anteriormente. (Fichel, Dalla, Ros, Felizardo, Turani, González, Pérez, Puchol, Pessoa & Bracarense, 2009).

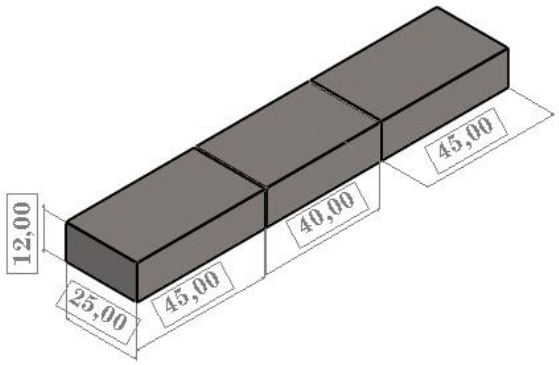
Una vez destacada la importancia de las pruebas de hidrogeno difusible en los cuerpos, es posible establecer cuáles son los métodos actualmente usados para dichas pruebas. Los 3 métodos para realizar está evaluación son: cromatografía gaseosa, desplazamiento de glicerina, y mercurio.

Cromatografía gaseosa. Para realizar la prueba se debe contar con 3 piezas, dos de estas del mismo tamaño y la de en medio un poco más larga, las piezas deben ser de acero ss400 o de composición química de bajo carbono de 0,18% o menor, Chen, Guo, Zhang, Cheng, Zhou, & Wang (2020) determinaron que a mayor CE en los aceros es mayor su tendencia a la creación de grietas frías e imperfecciones en su microestructura dando como resultado perdida en las propiedades mecánicas. Así mismo Muhayat, Matien, Sukanto & Saputro (2019) en su estudio de la fatiga del acero ss400 determino que sus propiedades mecánicas se ven fuertemente afectadas a medida que la soldadura subacuática aumenta de profundidad.

Para los métodos de soldadura de (SMAW) y (MIG/MAG) las piezas de muestra deben tener unas dimensiones de 12x25x40 y 12x25x45 mm para la pieza de prueba y las piezas finales respectivamente como se muestra en la Figura 31.

Figura 31

Piezas de prueba con dimensiones ilustradas para soldaduras (SMAW) y (MIG/MAG).

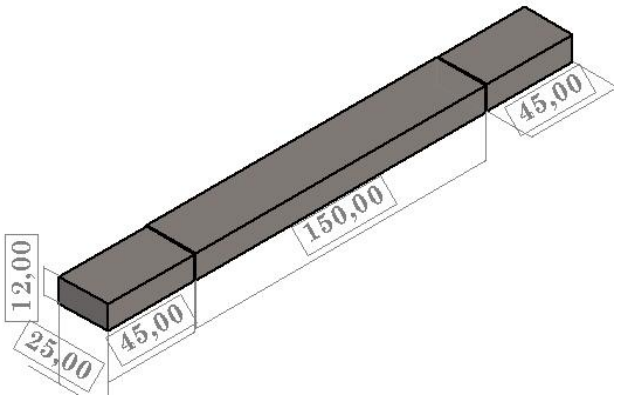


Nota. Elaboración propia.

Pala el método de soldadura (SAW) las piezas de muestra deben tener unas dimensiones de 12x25x150 y 12x25x45 mm para la pieza de prueba y las piezas finales respectivamente como se muestra en la Figura 33.

Figura 32

Piezas de prueba con dimensiones ilustradas para soldadura (SAW).



Nota. Elaboración propia.

Una vez cortadas deben ser pulidas y limpias para posteriormente ser calentadas a una atmosfera de 650°C durante una hora para eliminar el hidrogeno en la superficie de estas junto con otros gases, se pesan con una precisión de 0,1gramos como mínimo y se les da un baño en acetona (Matsushuita & Liu, 2000).

Las varillas de soldadura utilizadas deben tener un diámetro de 4,0 mm y deben ser secadas en un horno para eliminar contaminantes e hidrogeno en las mimas, no se deben usar varillas de soldadura con el recubrimiento dañado se ha de usar diferente varilla de soldadura por prueba a realizar y la velocidad de soldadura debe ser de 10mm para 12 a 13 mm de varilla de soldadura (JIS, 2007).

En el caso de soldadura (MIG/MAG) el diámetro del cable debe ser de 1,2 mm y el gas protector debe fluir a 25l/min.

Al momento de realizar el proceso de soldadura las piezas se deben sujetar en una superficie de cobre con el fin de mejorar la transferencia de calor y este debe estar a una temperatura ambiente 25° C o menos.

Bajo ninguna circunstancia se debe interrumpir el arco en el proceso de soldadura de llegar a suceder se debe realizar la prueba de nuevo con diferentes muestras, una vez terminado el proceso inmediatamente se sumerge en agua con hielo durante 5 segundos agitando la muestra, luego se procede a separar las piezas de manera mecánica siendo la pieza centrar la única con importancia para la prueba, luego de eso se limpia con argón durante 30 segundos y luego se procede a realizar el proceso dependiendo del método que desea realizar (JIS, 2007).

En caso de no contar con los implementos a la mano para inmediatamente iniciar el método deseado para realizar la prueba de hidrogeno difusible o cuenta con un lapso de 120 segundos para sumergir la pieza en nitrógeno licuado o alcohol saturado de hielo seco y podrá mantener la pieza en ese estado con un plazo máximo de 72 horas antes de continuar con el proceso indicado para el método a usar (AWS, 2002).

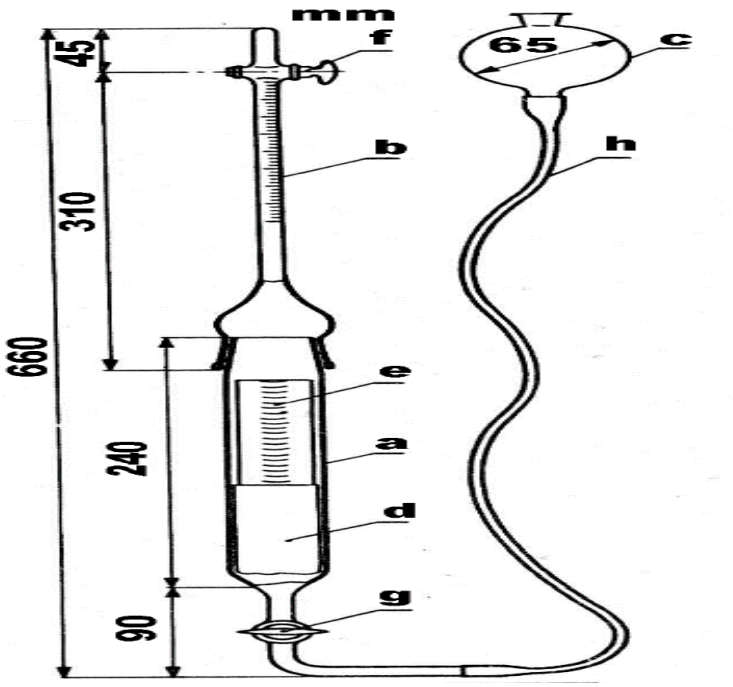
Método de deslizamiento de glicerol o método de glicerina. Este método es considerado el más antiguo y a su vez el más sencillo de realizar en comparación a los otros métodos (Kong, Li, Zou, Zang, Hu & Wang, 2016).

Este método fue normalizado en una primera instancia por Spawania & Lutowania (1966), Donde estableció el procedimiento a seguir para este método, el montaje se ha de realizar como se muestra en la Figura 3. Para aplicar el método se lleva la muestra (e) al cilindro(a) se abre la válvula inferior (g) y se llena con una solución de glicerina en alcohol propílico hasta el punto que la glicerina alcance unos 10 mm sobre la válvula superior (f), el recipiente cilíndrico

de equilibrio debe permanecer lleno en un 50% de glicerina y una vez se estabilice el nivel y la solución sobrepase la válvula superior (f) por encima de 2 mm se cierran las válvulas (f) y (g) y se lleva todo el montaje de la Figura 33 a una temperatura de 50°±20°C dentro de un termostato dejándose en reposo por 48 horas, una vez pasadas las 48 horas se observa el recipiente cilíndrico (a) y si el mismo contiene burbujas se inclina hacia los lados para separarlas de las paredes y posterior a eso se abre la válvula inferior (g) y se inserta de nuevo en el termostato esta vez sin calentar hasta que las temperaturas se equipare con la del entorno y una vez que la medida de (b) y (c) sean iguales entonces se toma la medida de volumen la bureta de gas (b) así como la temperatura ambiente y la presión barométrica del momento luego se abre la válvula superior (f) y se retira, se vacía el recipiente cilíndrico (a) y se extrae la muestra (e) con pinzas, se lava en agua corriente y luego en alcohol, es secado con aire tibio y se procede a pesar con una exactitud no menor a 0.01gramos.

Figura 33

Montaje para determinar el hidrogeno difusible por el método de glicerina.



Nota. Tomado de Norma Branżowa: BN-64 4130-01.

Donde: Montaje para determinar el hidrogeno difusible por el método de glicerina. (a) recipiente cilíndrico de vidrio con junta esmerilada (b) bureta de gas (c) recipiente cilíndrico de equilibrio lleno en un 50% por glicerina (d) cojín de goma (e) muestra (f) válvula superior unidireccional (g) válvula inferior unidireccional (h) manguera de goma.

Peso de la muestra con el material aplicado

a=m-n

Donde:

m=peso de la muestra antes de la soldadura

n=peso de la muestra con el consumible aplicado y método de glicerina.

Procedimiento para resultado de hidrogeno difusible.

$$V_{H_2}d = 0{,}3592\frac{V*p_b*100}{T*a} \qquad (1)$$

Donde V es el volumen de hidrogeno medido en la bureta, $p_b$la presión barométrica expresada en $mmhg$, T es la temperatura expresada en K y a la masa de la fundente aplicada a la muestra. Cabe destacar que el método se ha de aplicar a 3 piezas en las mismas condiciones y la medida será considerada correcta si y solo si el valor determinado no excede el margen de la media de las 3 medidas tomadas en las muestras según la tolerancia expresada en la tabla 5.

Figura 34

Tolerancia aceptable entre los resultados de hidrogeno difusible en las pruebas.

Contenido de hidrogeno en la muestra ml/100g	**Tolerancia permitida entre los 3 resultados.**
hasta 5	0,5
5-10	1,0
10.1-15	1,5
15.1-20	2,5
20.1-25	3,0
25.1-30	4,0
30.1-40	5,0

Nota. Tomado de Norma Branżowa: BN-64 4130-01.

Referencias

American Welding Society, (2012). Standard Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen Content of Martensitic, Bainitic, and Ferritic Steel Weld Metal Produced by Arc Welding,

American Welding Society. (s.f). Definición de soldadura. Recuperado el 12 de marzo del 2023: https://www.aws.org/.

Andrade, L. (1995). Soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular. Disertación de maestría. Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

Araque, O., & Arzola, N. (2013). Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 21(2), 279-292. https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000200011

Arata, Y., Skakibara, J. (1977). Water Curtain Type Underwater MIG Arc Welding (The 2nd Report): Effect of Water Pressure on Chemical Composition and Strength of Weld Metal. Journal of the Japan Welding Society, 46(10), 728-734.

Bailey, N. (1981). Residual Stresses, Welding Institute, Cambridge.

Bailey, N., Coe, F.R., Gooch, T.G., Hart, P.H.M., Jenkins, N. & Pargeter, R. J. (1993). Welding Steels Without Hydrogen Cracking, 2da Ed. England: Woodhead.

Bracarense A, Pessoa, E., dos Santos, V., Monteiro, M., Rizzo, F., Paciornik, S., Reppold, R., Domingues, J. & Vieira, L. (2010) Estudo comparativo de eletrodos comerciais para soldagem subaquática molhada, Soldagem & Inspeção, 15(4), 328-335.

Calzada, A. (2008). Definición y desarrollo de procedimientos de soldadura en tuberías de acero inoxidables para un proyecto offshore. Universidad de Cádiz, España

Campos Amaral, E. (2019). Desenvolvimento de arame tubular com polímero na composição do fluxo para soldagem subaquática molhada. Tesis de doctorado. Doctor en Ingeniería Mecánica. Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

Campos Amaral, E., Moreno-Uribe, A.M. & Bracarense A., (2021). Effects of PTFE on operational characteristics and diffusible H and O contents of weld metal in underwater wet welding, Journal of Manufacturing Processes, 61, 270-279.

Castellanos, G.O.M. (2020). Manufactura de alambre tubular autoprotegido y evaluación de condiciones operacionales en soldadura submarina húmeda. Trabajo de grado. Ingeniero Industrial. Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Chen, H., Guo, N., Zhang, X., Cheng, Q., Zhou, L., & Wang, G. (2020). Eff ect of water fl ow on the microstructure, mechanical performance, and cracking susceptibility of underwater wet welded

Q235 and E40 steel, J. Mater. Process. Tech., 277(2), 116435. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116435.

Chen, H., Guo, N., Liu, C., Zhang, X., Xu, C. &Wang, G. (2020). Insight into hydrostatic pressure effects on diffusible hydrogen content in wet welding joints using in-situ X-ray imaging method, International Journal of Hydrogen Energy, 45(16), 10219-10226.

Cheng, F., Hu, S. Gao, W., Deng, C., Wang, D. & Jing, H. (2014) Diffusible hydrogen content and microstructure characteristic in the joint by underwater shielded metal arc welding. Materials Science, 35(9), 45-48.

Da Silva, W., Bracarense, A. & Pessoa, E. (2012). Efeito da Profundidade de Soldagem no Hidrogênio Difusível de Soldas Molhadas, Soldagem & Inspeção, 17(4), 298-305.

Del castillo, F. (2018). Uniones soldadas y su simbología según AWS.

Duplessis, J. & Dutoit, M. (2006). Reducing Diffusible Hudrogem contents of shielded Metal Arc Welds Through Addition of Flux-Oxidizing Ingredients. Journal of Materials Engineering and Performance, 50-56.

Dutra, J., Andrade, L., Alves, A., Santos, V. & Teixeira, J. (1993, septiembre). Alternativas para melhorar a estabilidade do arco na soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular.

Documento presentado en el décimo noveno Encuentro Nacional de Tecnología de Soldadura, Brasil: Asociación Brasilera de Soldadura.

Esmerio, J. (1998). Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Subaquática com Eletrodos Revestidos. Ministério da educação e do desporto, Universidad Federal do Rio Grande do Sul.

Ferreira, F., Paciornik, S., Dos Santos, V. & Bracarense, A. (2010). Evaluation of the effects of replacement of hematite by wustite on oxidizing electrodes coating for underwater wet welding.

Fichel, I., Dalla, A., Ros, D.A., Felizardo, I, Turani, C., González, L.P., Pérez, M.R., Puchol, R.Q., Pessoa, E.C.P., Bracarense, A.Q. (2009). Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos Impermeáveis. In: XXXV Congresso Nacional de Soldagem, Piracicaba, SP.

Fydrych, D., Łabanowski, J., & Rogalski, G. (2013). Weldability of high strength steels in wet welding conditions. Polish Maritime Research, 20(2), 67–73. doi:10.2478/pomr-2013-0018.

Fydrych, D. & Rogalski, G. (2013). Effect of underwater local cavity welding method conditions on diffusible hydrogen content in deposited metal, Welding International, 27:3, 196-202, doi:10.1080/09507116.2011.600033

Garzón, P., & Xavier, V. (2020). Análisis y evaluación de penetración de soldadura GMAW mediante ensayos metalográficos en autopartes rieles de chasis y barra de tablero producidos por la

empresa METALTRONIC S.A. Recuperado el 15 d3e abril de 2022: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18554.

Grubbs, C. E., Bertelmann, A. E., Ibarra, S., Liu, S., Marshall, D. J. & Olson, D. L. (2011). Welding Handbook Material and Applications [Manual de soldadura Materiales y aplicaciones]. Miami, Estados Unidos: AWS.

Hugo, G. S. & Santos Becho, J. (2010, agosto). Desenvolvimento de eletrodo revestido impermeável para soldagem subaquática molhada. Documento presentado en el décimo séptimo Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Mecánica, Brasil: Asociación Brasilera de Ingeniería Mecánica. Recuperado el 12 de marzo del 2023: http://abcm.org.br/anais/creem/2010/TRABALHOS/FP/FP-05.pdf.

Ibarra, S., Grupps, C. E., Liu, S. (1994) "State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel". Proceedings: International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans: Estados Unidos. 49- 67.

Ibrahim, I. A., Mohamat, S. A., Amir, A., & Ghalib, A. (2012). The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Processes on Different Welding Parameters. Procedia Engineering, 41, 1502-1506. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.342.

ISO 3690. 2018. "Welding and allied processes — Determination of hydrogen content in arc weld metal," [Online]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/72150.html.

Jeffus, L. (2016). Welding: Principles and Aplications [Soldadura: Principios y aplicaciones] (8va Ed.). New York, Estados Unidos: Delmar.

JIS Z 3118. 2007. Método para medir el contenido de hidrógeno en soldaduras de acero, [Online]. Disponible: https://kikakurui.com/z3/Z3118-2007-01.html.

Klett, J., Mattos, I., Hans, J., Silva, R. & Hassel, T. (2020). Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. Materials and corrosion, 72(2), 504-516. doi: https://doi.org/10.1002/maco.202011963.

Klett, J., Hassel, T. (2020). Reducing the risk of hydrogen-induced cold cracks in hyperbaric wet welding of high-strength steels by using austenitic welding consumables, Welding and Cutting, 19(1), 54-60.

Klett, J., Oliver, G., Schmidt, E. & Linowitzki, V. (2020). Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints. Springer.

Kojiam, T., Owaki, K. Tsuchiya, K. & Katayama, H. (1997). Development of underwater welding with high power YAG laser. Ishikawajima–Harima Eng. Rev., 37(4), pp. 303-308

Kong, X., Li, C., Zou, Y., Zhang, J., Hu, Y. & Wang, J. (2016). Measurement and Analysis of the Diffusible Hydrogen in Underwater Wet Welding Joint, MATEC Web of Conferences.

Kou, S. (2003). Welding Metallurgy, 2da Ed. Estados Unidos: Wiley-Interscience Publication.

Labanowski, J., Fydrych, D. & Rogalski, G. (2008). Underwater Welding - A Review. Revista Advances in Materials Sciences, 8(3), 11-22. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.researchgate.net/publication/250166825_Underwater_Welding_-_A_Review.

Laboratorio LRSS. (s. f.). Somos UFMG. Recuperado 16 de marzo del 2023, de http://somos.ufmg.br/

Larry, J. (2009). Soldadura. Principios y aplicaciones. Editorial Paraninfo.

Li, H.L, Liu, D., Yan, Y.T., Guo, N. & Feng, J. C. (2016). Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Underwater Wet Flux-Cored Wire Welded 316L Stainless Steel joints. Journal of Materials Processing Technology, 1(238), 423-430. Recuperado 16 de marzo del 2023: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616302709.

Matsushuita, M & Liu, S. (2000). Hydrogen Control in Steel Weld Metal by Means of Fluoride Additions in Welding Flux. Welding Journal, 79(10), 295-303.

Liu, S., Olson, D.L. & Ibarra, S. (1994). Electrode formulation to reduce Weld metal hydrogen and porosity. Documento presentado en el OMAE, Estados Unidos: ASME.

Liu, S., Pope, A. M. & Daemen, R. (1994). Welding Consumables and Weldability. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, Lousiana, Estados Unidos.

Martin, M., Weber, S., Izawa, C., Wagner., S., Pundt, A. & Theisen, W. (2011). Influence of Machining-Induced Martensite on Hydrogen-Assisted Fracture of AISI Type 304 Austenitic Stainless Steel. International Journal of Hydrogen Energy, 36(17), 11195-11206.

Meneses, P. M. (2017). Estudo Comparativo Entre Eletrodos E7018 Convencional E Aglomerados Com Polímeros Em Soldagem Subaquática Molhada. Trabajo de grado. Ingeniero mecanico. Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

Muhayat, N., Matien, Y., Sukanto, H., & Saputro, Y. Heliyon Fatigue life of underwater wet welded low carbon steel SS400, Heliyon, 6, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03366.

Nakata, K. & Oishi M. (1998). Repair-welding technology of irradiated materials-WIM Project Proceedings of International Conference on Environment Degradation of Materials in Nuclear Power System.

Neeraj, T., Srinivasan, R. & Li, J. (2012) Hydrogen Embrittlement of ferritic Steels: Observations on Deformation Microstructure, Nanoscale Dimples and Failure by Nanovoiding. Acta Materialia. 5160-5171.

Nixon, J. & Billingham, J. (1987). A survey of underwater welding techniques. Revista Endeavour, 11(3), 143-148. Recuperado el 10 de enero del 2023: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0160932787902031.

Omajene, J. E., Kah, P., Wu, H., Martikainen, J. & Izelu, C. O. (2015). Intelligent Control Mechanism for Underwater Wet Welding. Revista International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 3(4), 50-56. Recuperado el 20 de diciembre del 2019: https://www.researchgate.net/publication/281615819_Intelligent_Control_Mechanism_for_Underwater_Wet_Welding.

Ozaki, H., Naiman, J. & Masubuchi, K. A. (1977). Study of Hydrogen Cracking in Underwater Steel Welds. Welding Research Supplement, Pennsylvania, 231-237.

Parshin, S., Levchenko, A. & Maystro, A. (2020) Metallurgical Model of Diffusible Hydrogen and Non-Metallic Slag Inclusions in Underwater Wet Welding of High-Strength Steel, Metals, 10(11). 1498.

Payão F., J. C., Mello, R., Medeiros, R. C. & Paranhos, R. (2004). Histórico Recente da Soldagem Subaquática Molhada. Recuperado el 12 de marzo del 2023: https://infosolda.com.br/wpcontent/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/historico-recente-da-soldagem-subaquatica-molhada.pdf.

Payão, J. D. C. (2003). Reaçoes metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada. Soldagem & Inspeção, 94-102.

Perez, F. (2007). The Mechanism of Porosity Formation in Underwater Steel Welds using SMAW Process. Tesis de Doctorado, Colorado School of Mines, Estados Unidos.

Pérez, O. H. R. (2020). Metalurgia de la soldadura. Editorial Universitaria (Cuba)

Perng, T. & Altstetter, C. (1988). Hydrigen Transport, Microstructure, and Hydrogen-Induced Cracking in Austenitic Stainless Steels. American Society for Testing and Mateials. Philadelphia, 403-416.

Pett, M. A. (1998). Wet (underwater) welding becomes a viable option, Welding Metal fabrication.

Pinto, G., & Francisco, J. (2018). Determinación de la altura capilar óptima para un proceso de soldadura fuerte con metal de aporte BAg-1 aplicado a la soldadura indirecta de tubería de acero inoxidable AISI 304. Recuperado el 12 de marzo del 2023: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19130

Pope, A.M. (1995). Oxygen and Hydrogen Control in Shielded Metal Underwater Wet Welding. Tesis de Doctorado, Colorado School of Mines, Estados Unidos.

Pope, A.M. & Liu, S. (1996). Hydrogen Content of Underwater Wet Welds Deposited by Rutile and Oxidizing Electrodes, OMAE, Volume III, Mechanical Engineering.

Ribeiro, P., Pessoa, E. & Bracarense, A. (2019). Comparison of underwater wet welding performed with silicate and polymer agglomerated electrodes. Journal of Materials Processing Technology, 63-72.

Rowe, M. & Liu, S. (2001). Recent developments in underwater wet welding. Science and Technology of Welding and Joining, 6 (6), 387–396.

Sanchez-Osio, A., Liu, S. Olson, D. L. & Ibarra, S. (1993). Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications Preceedings. OMAE, Vol.III-A.

Santos, V., Monteiro, M., Rizzo, F. & Bracarense, A. (2012). Development of an oxyrutile electrode for wet welding. Welding Journal. 91(12), 319-328.

SCOPUS (s.f). Análisis de datos: Instituciones que investigan sobre, sobre hidrogeno difusible en soldadura submarina. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sot=b&sdt=b&origin=searchbasic&rr=&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY(Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding)&searchterm1=Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding&searchTerms=&connectors=&field1=TITLE_ABS_KEY&fields=.

SCOPUS (s.f). Análisis de datos: Investigación de Hidrogeno difusible a través de los años. Recuperado el 16 de marzo del 2023:

https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sot=b&sdt=b&origin=searchbasic&rr=&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY(Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding)&searchterm1=Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding&searchTerms=&connectors=&field1=TITLE_ABS_KEY&fields=.

SCOPUS (s.f). Análisis de datos: Principales investigadores en el estudio del hidrogeno difusible en soldadura submarina. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sot=b&sdt=b&origin=searchbasic&rr=&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY(Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding)&searchterm1=Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding&searchTerms=&connectors=&field1=TITLE_ABS_KEY&fields=.

SCOPUS (s.f). Análisis de datos: Principales países en los cuales se investiga sobre hidrogeno difusible en soldadura submarina. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sot=b&sdt=b&origin=searchbasic&rr=&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY(Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding)&searchterm1=Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding&searchTerms=&connectors=&field1=TITLE_ABS_KEY&fields=.

SCOPUS (s.f). Análisis de datos: Principales patrocinadores de estudios de Hidrogeno difusible en soldadura submarina. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sot=b&sdt=b&origin=searchbasic&rr=&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY(Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding)&searchterm1=Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding&searchTerms=&connectors=&field1=TITLE_ABS_KEY&fields=.

SCOPUS (s.f). Análisis de datos: Tipos de documento en los cuales se registran los estudios de Hidrogeno difusible en Soldadura submarina. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sot=b&sdt=b&origin=searchbasic&rr=&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY(Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding)&searchterm1=Hydrogen%20diffusible%20in%20underwater%20welding&searchTerms=&connectors=&field1=TITLE_ABS_KEY&fields=.

Sato, K., Kobayashi, M., Sano, Y. & Kimura, S. (2000) Maintenance technologies for reactor internas, Toshiba Rev., 55(10),37-41.

Silva, W., Bracarense, A. & Pessoa, E. (2012). Efeito da profundidade de soldagem no hidrogênio difusível de soldas molhadas. Soldagem & Inspeção, 17(4), 298–305.

Spawania, D. O. & Lutowania, I. (1966) “Bn-64 4130-01, ” no. 67, pp. 2–7.

Suga, Y. (1985), Effect of Diffusible Hydrogen on Mechanical Properties of Underwater Welded Joints – Study on Improving the Mechanical Properties of Underwater Welded Joints (The 1st Report)- Transactions of the Japan Welding Society, vol.16, no. 2.

Suga, Y. (1988). On Prevention of Cracks in Underwater Wet Welds by Postheating: —Study on Improving the Mechanical Properties of Underwater Welded Joints (The 2nd Report)

Suga, Y. & HasuI, A. (1986). On formation of porosity in underwater weld metal. Transactions of the Japan Welding Society, 17(1).

Suga, Y., Hasui, A. (1988). Underwater gravity pulsed arc welding. Welding International, 2(9), 802-807.

Tomków, J. & Janeczek, A. (2019). The influence of the welding environment on the properties of Tekken joints made from S355J2C+N steel. Revista Welding Technology, 91 (1), 231-246. Recuperado el 12 de marzo de 2023: https://www.researchgate.net/publication/331484563_The_influence_of_the_welding_environment_on_the_properties_of_Tekken_joints_made_from_S355J2CN_steel.

Turani, C., Bracarense, A., Felizardo, I. & Pessoa E. (2012). Impermeable Low Hydrogen Covered Electrodes: Weld Metal, Slag, and Fumes Evaluation. Journal of Materials Research and Tecnology, 1(2), 64-70.

Trevisan, R. E., Schwemmer, D. D. & Olson, D. L. (1990). The Fundamentals of Weld Metal Pore Formation, Welding: Theory and Practice, Ed., Elsevier Science.

Tsai, C. L. & Masubuchi, K. (1977). Interpretive Report on Underwater Weldng. Welding Research Council Bulletin.

UFMG. (s. f.). Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.ufmg.br/espanol/

Underwater welding code. (s, f.). Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://pubs.aws.org/Download_PDFS/D3.6M-2017PV.pdf

Uribe, A.M.M, Bracarense, A.Q., Pessoa, E.C.P. & dos Santos, V.R. (2017). Influence of polarity on the stability of underwater wet welding process with coated electrode. Soldagem e Inspeção, 22(4), 429-441.

Wang, J., Li, Y., Lu, S. & Hu, Q. (2017). Cold Cracking Sensitivity of a Newly Developed 9Cr2WVTa Steel. Jounal of Materials Engineering and Performance, 26(1) 258-267.

Xu, C., Guo, N, Zhang, X., Jiang, H., Tan, Y. & Zhou L. (2020). Influence of welding speed on weld pool dynamics and welding quality in underwater wet FCAW, Journal of Manufacturing Processes, 55, 381-388.

Zhang X., Ashida E., Shono S. & Matsuda F. (2006). Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd:YAG laser welding. J Mater Process Technol. 174.

Zhang, Y., Jia, C., Zhao, B., Hu, J. & Wu, C. (2016). Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW. Revista Journal of Materials processing Technology, 238 (1), 373-382. Recuperado el 16 de marzo del 2023: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013616302503.