

# Características microestructurales y en la resistencia a la corrosión en soldaduras de acero AISI 304 con INCONEL 625 expuestas a radiación ionizante (radiación X)



MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS AND RESISTANCE TO CORROSION IN WELDS OF STEEL AISI 304 WITH INCONEL 625 EXPOSED TO IONIZING RADIATION (RADIATION X)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7075> | Recibido: 13/01/2014 • Aceptado: 21/05/2014

Manuel Pascual-Guillamón, F. Javier Cárcel-Carrasco, M. Angel Pérez-Puig

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Instituto de tecnología de materiales. Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia. Tfno: (+34) 963 877000. fracarc1@csa.upv.es

## ABSTRACT

- In radioactive environments, it is vital to know resistant properties of welds performed and their behavior when they are subjected to different doses of radiation. This article has analyzed the influence that has the ionizing radiation of low intensity, in particular the X-radiation, resistant, microstructural characteristics and corrosion resistance on the weldability of stainless steel austenitic AISI 304, soldier by TIG process and using as input materials INCONEL 625. Unions have been in two different atmospheric conditions: the first in environmental conditions, and the second in an inert Chamber with argon supply. For each environment is analyzed the influence of radiation on resistant characteristics and corrosion in different doses with both atmospheres.
- **Key Words:** AISI 304, Inconel 625, welding, ionizing radiation.

## RESUMEN

En entornos radioactivos es vital conocer las características resistentes de las soldaduras realizadas y su comportamiento cuando están sometidas a diferentes dosis de radiación. En este artículo se ha analizado la influencia que ejerce la radiación ionizante de baja intensidad, en concreto la radiación X, en las características microestructurales, resistentes y resistencia a la corrosión en la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304, soldado mediante procedimiento TIG y empleando como materiales de aporte INCONEL 625. Las uniones se han realizado en dos condiciones atmosféricas distintas: la primera de ellas en condiciones ambientales, y la segunda en una cámara inerte cerrada con suministro de argón. Para cada ambiente se analiza la influencia de la radiación sobre sus características resistentes y a la corrosión en diferentes dosis con ambas atmósferas.

**Palabras Clave:** AISI 304, Inconel 625, soldadura, radiación ionizante.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo es determinar la influencia de la radiación ionizante de baja intensidad en la soldadura de acero inoxidable AISI 304 con aporte INCONEL 625 a partir de sus características mecánicas y microestructurales, evaluando cuáles son los efectos en este tipo de soldadura en función de la dosis de radiación. Las aplicaciones típicas para Inconel 625 incluyen los escudos de calor del horno, el hardware, los motores de turbina de gas, revestimientos de la cámara de combustión y las boquillas, la producción química y aplicaciones especiales en el agua de mar. El Inconel puede encontrarse frecuentemente en entornos extremos. Es común en aspas, sellos y quemadores de turbinas de gas, así como en rotores y sellos de turbocompresores, sujeciones de alta temperatura, naves a presión, tubos de intercambiadores de calor, generadores de vapor en reactores nucleares de agua presurizados. Así mismo es ampliamente utilizado en instalaciones de fluidos en sistemas afectados por la radiación, como puede ser centrales nucleares o en entornos radioactivos de la industria sanitaria y agroalimentaria.

Los cambios en la microestructura de la soldadura pueden modificar su comportamiento [1-3]. En el presente artículo se investigan las características mecánicas, frente a la corrosión, microestructurales y de soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 con electrodo de tungsteno y material de aporte INCONEL 625, el cual va a ser sometido a radiación ionizante. Se realizó el estudio obteniendo una comparación con las principales diferencias entre las distintas uniones soldadas, así como entre dos procesos distintos de soldadura y con tres cantidades de dosis de radiación ionizante diferentes: con atmósfera inerte de argón y sin dicha atmósfera inerte, y sometido a diferentes dosis de radiación: 200, 700 y 1000 Gy.

La aplicación de este estudio es analizar los efectos que produce la radiación en los elementos soldados de acero inoxidable utilizados en diversas aplicaciones, tales como los mismos aparatos que producen la radiación, elementos sometidos a radiación fuera de nuestra atmósfera terrestre como satélites y cohetes espaciales y depósitos contenedores de residuos nucleares.

Las características mecánicas para las diferentes uniones soldadas se han evaluado mediante ensayos destructivos de tracción, flexión y corrosión según las correspondientes metodologías, así como también mediante ensayos de microdurezas en las diferentes zonas: interfase, en la soldadura y en el metal base.



Figura 1: Dispositivo para la soldadura TIG con cámara inerte

Se diseñó y construyó un dispositivo para la soldadura en cámara inerte (Figura 1). En el interior se colocan las piezas que deseamos soldar. Colocamos sobre el hueco la tapa, es decir, una lámina de metacrilato con un orificio en forma de cerradura de aproximadamente 50 mm de diámetro, a través del cual se introduce el electrodo y la varilla de aporte y se realiza la soldadura. A continuación se abre la llave de la botella de gas argón y éste llena todo el espacio alrededor de las piezas a unir. Tras unos minutos, cuando ya no queda oxígeno en el interior del dispositivo y se ha conseguido la atmósfera inerte, se puede empezar a soldar. La tapa se va desplazando a medida que el cordón de soldadura avanza.

Cabe mencionar que en el proceso de soldeo se han tenido en cuenta dificultades tales como falta de penetración, tensiones internas de la probeta debido al gradiente de temperatura, excesiva intensidad de corriente, discontinuidades del cordón de soldadura y muescas en los rebordes de las probetas debido a la problemática del proceso.

Existen numerosas variedades de cambios microestructurales producidas en los aceros austeníticos dependiendo del material y de diversas condiciones de ensayo [4,5]. En la literatura se pueden encontrar diversos estudios donde se ha logrado resultados significativos en análisis de microestructura por TEM [4,6]. La temperatura de la prueba, el rango de tensiones estudiado, y la cantidad de irradiación son parámetros que afectan directamente al mecanismo de modificación de los aceros austeníticos [7, 8].

Asimismo se ha determinado en diversos estudios el cambio de las propiedades mecánicas de los materiales en medios altamente radioactivos [9-10]. La irradiación a altas intensidades de un material metálico provoca su endurecimiento, produciéndose pequeños defectos y propiciándose dislocaciones en su estructura durante la deformación plástica [11-15]. Estas propiedades son fundamentales para establecer los métodos de soldadura utilizados [16], que pueden marcar la fiabilidad y mantenibilidad de las instalaciones [17].

Se muestra que el incremento de radiación viene frecuentemente acompañado por cambios en la curva tensión-deformación con una variación del módulo de elasticidad y de la capacidad de endurecimiento por deformación. [10]. No

Propiedades Físicas	
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	7,93
Punto de Fusión (C°)	1400-1455
Propiedades Mecánicas	
Alargamiento (%)	<60
Dureza Brinell	160-190
Impacto Izod (J m <sup>-1</sup> )	20-136
Módulo de Elasticidad (GPa)	190-210
Resistencia a la Tracción (MPa)	460-1100
Propiedades Térmicas	
Coefficiente de Expansión Térmica @20-100C (x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	18,0
Conductividad Térmica a 23C (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	16,3

Tabla 1: Propiedades físico-químicas del acero AISI 304

obstante, son resultados para irradiación por neutrones, no habiendo podido determinarse todavía los resultados que se obtendrían al irradiar rayos X, siendo este último el objeto del presente estudio.

## 2. MATERIALES UTILIZADOS Y PROCESOS EXPERIMENTALES

### 2.1 MATERIALES UTILIZADOS

El acero AISI 304 es el austenítico más popular, el cual contiene básicamente 18 % de cromo y 8 % de níquel, con un contenido de carbono limitado a un máximo de 0,08 %. Tiene gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, nuclear, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte. Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones. Sus propiedades están expuestas en la Tabla 1, y su microestructura puede observarse en la micrografía a 200 aumentos de la Figura 2.

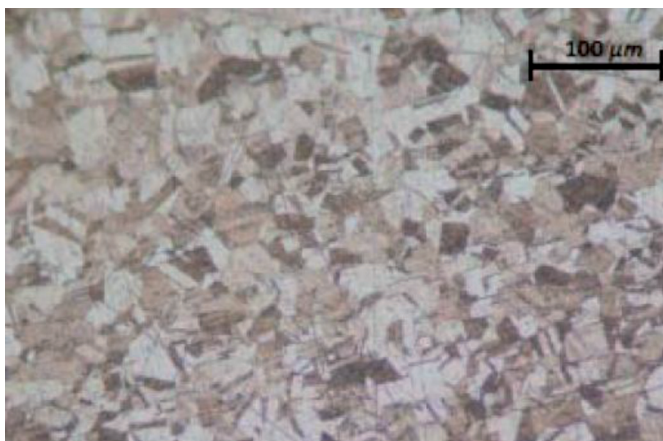


Figura 2: Microestructura (a 200 aumentos) del acero inoxidable 304

El Inconel es una marca registrada que abarca aleaciones a base de níquel-cromo, cubriendo un amplio espectro de composiciones y de propiedades. La combinación de níquel y cromo en estas aleaciones provee resistencia tanto a soluciones corrosivas reductoras como oxidantes. El níquel y el cromo actúan también en conjunto para resistir oxidación, carburización y otras formas de deterioro a altas temperaturas.

Estas aleaciones no se tornan quebradizas a temperaturas

criogénicas, poseen buena resistencia a la tracción y a la fatiga a temperaturas moderadas, y presentan excelentes propiedades de resistencia al flujo y rotura a altas temperaturas.

En la mayoría de las aleaciones Inconel las características básicas del sistema níquel-cromo son aumentadas mediante la adición de otros elementos. Algunas de las aleaciones aumentan su resistencia mediante la adición de aluminio, titanio y niobio (columbio). Otras contienen cobalto, cobre, molibdeno o tungsteno para mejorar atributos específicos de resistencia mecánica o a la corrosión. Las aleaciones también contienen hierro en cantidades que varían desde 1 % a más del 20 %. En la mayoría de los casos los efectos dominantes en las propiedades se deben a los aleantes, salvo el hierro.

Las aplicaciones de estas aleaciones son muy amplias: recipientes para tratamiento térmico, turbinas, aviación, plantas nucleares generadoras de energía, etc. Sus propiedades mecánicas y su composición son expuestas en la Tabla 2.

Las probetas utilizadas son chapas de acero inoxidable AISI 304 de 180 mm de largo, 75 mm de ancho y 1,5 mm de espesor, con unas dimensiones de 180 mm de largo, 150 mm de ancho y 1,5 mm de espesor, una vez soldadas en bloques de 2 chapas. La soldadura se realizó antes de la aplicación de las diversas dosis de radiación.

En primer lugar se realizó la soldadura sin atmósfera inerte de argón, y posteriormente con atmósfera inerte de argón (se ha controlado el flujo de Argón a través de caudalímetro sobre los 12 l/min; los parámetros de soldadura utilizados han sido de 75 a 80 A y un voltaje de 22V CC), para realizar ensayos, primero sin radiación y posteriormente a 200 Gy, a 700 Gy y a 1000 Gy. La dosis de radiación captada en cada caso se mide en J/Kg (En el sistema internacional llamadas Sievert “Sv” cuando se referencia a dosis absorbida por materia viva, o Gray “Gy” para cualquier otro tipo de material. 1Sv=1Gy para radiaciones X).

Para soldar las probetas con atmósfera de gas inerte, se soldaron planchas de acero inoxidable, con un único cordón, facilitando el proceso, y tras el lijado del cordón, se cortaron las diferentes probetas con la cizalla. De este modo se realizaron 3 probetas por cada una de las pruebas a realizar, obteniéndose 24 probetas en total, cada una con unas dimensiones de 150 mm de largo, 20 mm de ancho y 1,5 mm de espesor según las Normas UNE-EN para cada proceso de ensayo.

Las dimensiones de las probetas cumplen los requisitos que establece la norma UNE-EN 10002-1 correspondiente a “Materiales Metálicos. Ensayos de tracción. Parte 1: Métodos de ensayo a temperatura ambiente” y la norma UNE-EN ISO 7438 correspondiente a “Materiales metálicos. Ensayo de flexión” según Norma UNE-EN ISO 7348.

Varillas Inconel 625	Metal depositado						
	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Nb - Ta	Mo
Inconel 625 ( Composición )	5	20 - 23	58	0,5	0.5	3,15 - 4,15	8 - 10
Alargamiento ( % )	<40						
Dureza Brinell	175-240						
Módulo de Elasticidad ( GPa )	147-210						
Resistencia a la Tracción ( MPa )	950						

Tabla 2: Composición del Inconel 62. Propiedades mecánicas y composición

## 2.2. PROCESOS EXPERIMENTALES

En el presente estudio se ha realizado una comparación de las características de la soldadura de acero AISI 304 con aporte INCONEL 625. Las diversas soldaduras de las probetas fueron realizadas en atmósfera inerte de argón y en ambiente natural sin uso de la cámara inerte, siendo sometidas cada una de ellas con tres dosis diferentes de radiación 200, 700 y 1000 Gy, quedando así un total de 24 casos de estudio.

Para llevar a cabo el presente estudio, se han sometido las probetas a irradiación en un búnker específicamente preparado para ello, con el fin de prevenir contaminaciones indeseables. Dentro del búnker se ha procedido a la irradiación de las chapas soldadas, mediante un emisor de rayos X (Figura 3).



Figura 3: Aparato de rayos X y sistema de control de dosis de radiación

Tras el mecanizado de las diferentes probetas e irradiación con las diversas dosis, se han realizado los siguientes ensayos:

- Ensayo de tracción: Este ensayo tiene como objetivo determinar propiedades de los materiales que son importantes para el diseño: la tensión de rotura, el límite elástico y la deformación del material, para ello se ha seguido la Norma de ensayo UNE-EN 10002-1.
- Ensayo de flexión: El objetivo de este ensayo es determinar cierta propiedad de los materiales que también es importante para el diseño. Esta propiedad es el ángulo máximo de doblado que soporta un material cuando está sometido a una flexión. Según la norma UNE-EN ISO 7438, la probeta se sitúa sobre dos apoyos giratorios y se aplica con un punzón una carga que aumenta de forma gradual y progresiva hasta que se produce la fractura. Dicho punto se puede caracterizar bien por el ángulo máximo de doblado o bien por la flecha máxima alcanzada por la probeta.
- Ensayo de microdureza: Con el fin de caracterizar el comportamiento de las estructuras cristalinas debemos recurrir al ensayo de microdureza. Este ensayo se diferencia de otros en la magnitud de la superficie afectada por el ensayo. En efecto, los ensayos de dureza Brinell, Vickers, Rockwell o Shore afectan usualmente a la superficie ocupada por varios granos o compuestos. Por contra, el ensayo de microdureza puede afectar sólo a un grano monofásico, o compuesto homogéneo. En cualquier caso, si la huella ha afectado a uno o varios granos es una cuestión que queda despejada en el proceso de medición de la huella y comprobación de su ubicación. Norma UNE-EN 1043-2.

El equipo empleado en este ensayo es un Microdurómetro. El ensayo se inicia, localizando con el objetivo del microscopio la zona donde se desea aplicar la carga y medir la microdu-

reza. Una vez seleccionada esta zona, se sustituye el objetivo por una pieza que sostiene el penetrador, coincidiendo el eje de la pirámide del mismo con el eje óptico del microscopio.

-Ensayo de corrosión: Se ha realizado según la norma ASTM G48-11 para corrosión por picaduras. Las soldaduras se han preparado mediante corte y mecanizando las probetas normalizadas seleccionando un primer grupo de ellas para determinar las características mecánicas según normas UNE-EN ISO 7348:2006 y UNE 112-029. Se ha tomado un segundo grupo de probetas de las que se han obtenido las micrografías correspondientes. Es tercer grupo de probetas ha sido dispuesto en una solución de Cloruro férrico al 10% durante 78 horas, observándose el grado de degradación por corrosión que han sufrido las distintas soldaduras realizadas.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para verificar el comportamiento de las soldaduras de acero inoxidable AISI 304 con aporte de varilla desnuda ER Inconel 625 y procedimiento TIG para probetas soldadas con cámara inerte y al ambiente y posteriormente sometidas a distintas radiaciones ionizantes expuestas en el apartado anterior, se ha realizado un análisis comparativo según los ensayos descritos en el apartado anterior (2) siguiendo la normativa UNE-EN vigente y evaluando los resultados que nos definen el comportamiento resistente y microestructural además de la resistencia a corrosión por picaduras que puede darse en este acero y sobre todo en la soldadura cuando pueda estar sometido a distintos esfuerzos y electrolitos. En primer lugar analizar las características resistentes que permitirán evaluar que proceso presenta mejores propiedades estructurales. En segundo lugar evaluar el comportamiento ante la corrosión para evitar el deterioro del material en ambientes agresivos.

### 3.1. CARACTERÍSTICAS RESISTENTES

Se han realizado los ensayos de tracción para cada probeta según Norma UNE- EN 10002-1 para ensayos en frío y a flexión para cada probeta, teniendo en cuenta la cantidad de Sieverts irradiados en cada probeta y el tipo de aporte dado con la soldadura. En la tabla 3 se muestran los valores medios para cada grupo de 3 probetas en relación a los ensayos de tracción para diferentes dosis de radiación y según sean los tipos de soldadura, con atmósfera inerte de argón o en atmósfera normal. De igual manera las Figuras 1 y 2 muestran la evolución de los esfuerzos para los ensayos de tracción dependiendo de la atmósfera de soldadura, en estos casos para radiaciones de 1000 Gy. En los ensayos de flexión según Norma UNE- EN ISO 7348 no se llegó la rotura de las probetas.

Los resultados obtenidos muestran que la evolución con la radiación de la resistencia mecánica de soldaduras tiende a ser una función que decrece hasta llegar a un valor mínimo cuando la irradiación llega a 700, Tabla 3 y que aumenta para irradiaciones de 1000 Gy en la tensión a rotura y se verifica en todas las probetas en general, siendo los constituyentes estructurales obtenidos similares cuando han sido soldadas en ambiente natural sin irradiar e irradiadas, ya que la radiación no ha afectado significativamente a dichos constituyentes obtenidos al unir por fusión el material base mediante el proceso de soldeo, e igualmente a sucedido con las que han sido uni-

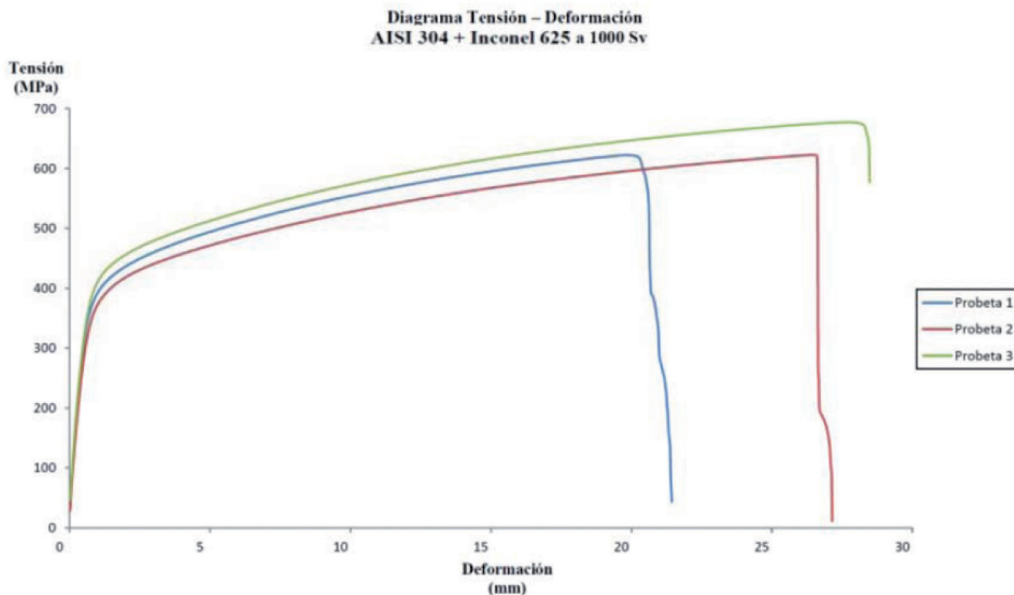
das mediante aplicación de cámara inerte, se puede definir que estos valores mínimos a menores irradiaciones han producido vibraciones interatómicas ocasionando defectos en la red que han influido en la disminución de las características mecáni-

cas y que a mayores dosis se ha producido un arranque de átomos que han bloqueado en parte las dislocaciones existentes en la estructura aumentando con ello la carga de rotura y la fragilidad al ser sometidas a un esfuerzo de deformación plás-

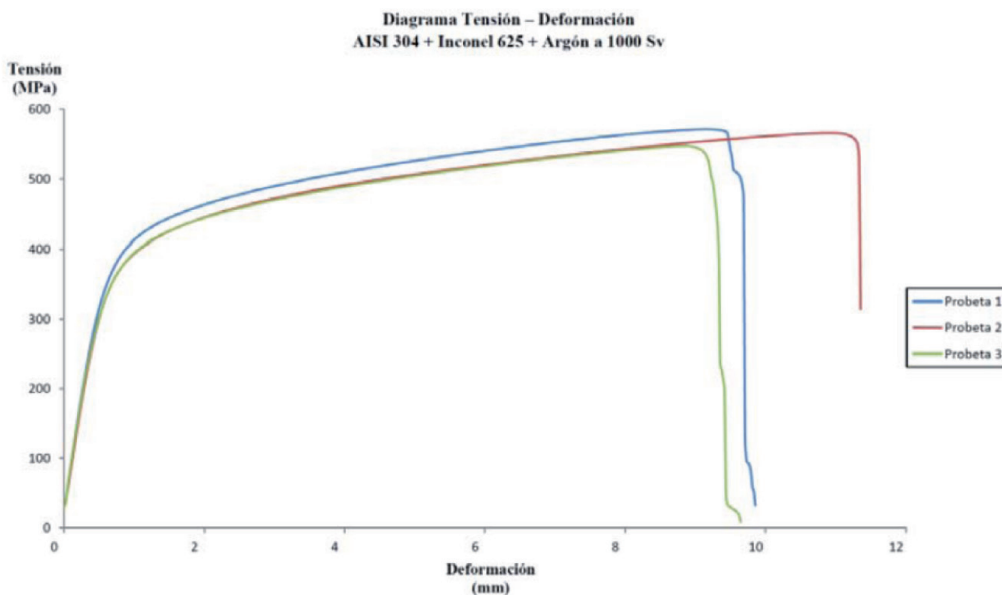
**ENSAYOS DE TRACCIÓN**

	s <sub>máx</sub> (MPa)		Límite Elástico (MPa)	
	Sin cámara inerte	Con cámara inerte	Sin cámara inerte	Con cámara inerte
Soldadura 304 + INCONEL	468,53	509,74	364.73	348.49
Soldadura 304 + INCONEL + 200 Gy	448,67	496,47	350.20	329.77
Soldadura 304 + INCONEL + 700 Gy	428,18	492,10	344.14	318.86
Soldadura 304 + INCONEL + 1000 Gy	519,81	521,42	394.05	366,49

Tabla 3: Valores medios de las probetas en los ensayos de tracción para diferentes dosis de radiación y tipo de soldadura



Gráfica 1: Ensayos de probetas 304 con aporte INCONEL 625 sin cámara de atmósfera inerte a tracción a 1000 Gy



Gráfica 2: Ensayos de probetas 304 con aporte INCONEL 625 con cámara de atmósfera inerte de argón a tracción a 1000 Gy

tica. A altas irradiaciones se puede apreciar una leve tendencia a una convergencia en los valores de cargas de rotura.

Las variaciones en el límite elástico suceden de forma similar siguiendo el mismo comportamiento que lo que sucede para la tensión a tracción así como se puede observar en la Tabla 3. Se puede observar la relación entre tensión deformación para dos lotes de soldaduras un lote de probetas que han sido soldadas al ambiente natural y sometidas a 1000 Gy, Gráfico 1 y otro lote de probetas que han sido soldadas en cámara inerte y también sometidas a irradiación a 1000 Gy.

Para evaluar las características resistentes de esta soldadura, se ensayaron en grupos de tres probetas para cada una de las dosis de radiación (200, 700 y 1000 Gy).

Cada una de las piezas se ensayó hasta la rotura en una Máquina Universal de Ensayos, la cual registro los datos de tensión máxima, tensión de rotura, límite elástico y alargamiento en mm.

Las roturas han sido

dúctiles rompiendo en general por la interfase en la zona correspondiente a la ZAT (zona afectada térmicamente) en la unión entre la chapa de acero AISI 304 y el material de aporte INCONEL 625. Las roturas se han producido por esta zona debido a que es donde se pueden producir cambios de la estructura del grano que facilita la rotura como consecuencia de precipitados de carburo de cromo.

Como se ha explicado anteriormente, se ensayaron tres probetas para evaluar la resistencia del cordón de soldadura a esfuerzos de flexión siguiendo la norma correspondiente. No se produjo la rotura en ningún ensayo, por tanto no tendremos en cuenta la tensión de rotura, como en el ensayo de tracción, ni tampoco el ángulo de doblado de fractura.

### 3.2. RESULTADOS DE ENSAYO DE MICRODUREZA

Se han impreso las marcas con una fuerza de 300 gramos, y las durezas en cada zona de esta probeta resultaron los indicados en la Tabla 4, según Norma UNE- EN 1043-2.

Observamos que la máxima dureza se da en la interfase de la soldadura con una dosis absorbida de 1000 Gy. En las tres zonas se aprecia una similar microdureza. Se evidencia que la zona de metal base 304 es de mayor dureza que el metal de aporte de la soldadura INCONEL 625.

Este valor justifica junto con el valor de la tensión de rotura y el límite elástico, que esta soldadura ha sido la que más ha fragilizado de las cuatro disponibles con este mismo material de aporte y sin cámara inerte de Argón.

	ENSAYOS DE MICRODUREZA					
	Sin cámara inerte			Con cámara inerte		
	Metal base	Interfase	Soldadura	Metal base	Interfase	Soldadura
Soldadura 304 + INCONEL	184,1	176,8	169,5	195,3	181,4	167,6
Soldadura 304 + INCONEL + 200 Gy	179,5	170,1	159,9	191,4	175,7	161,7
Soldadura 304 + INCONEL + 700 Gy	171,6	165,3	154,5	185,1	171,5	155,6
Soldadura 304 + INCONEL + 1000 Gy	201,1	188,9	182,7	207,6	189,3	176,4

Tabla 4: Resultados de ensayo de dureza para diferentes dosis de radiación y tipo de soldadura

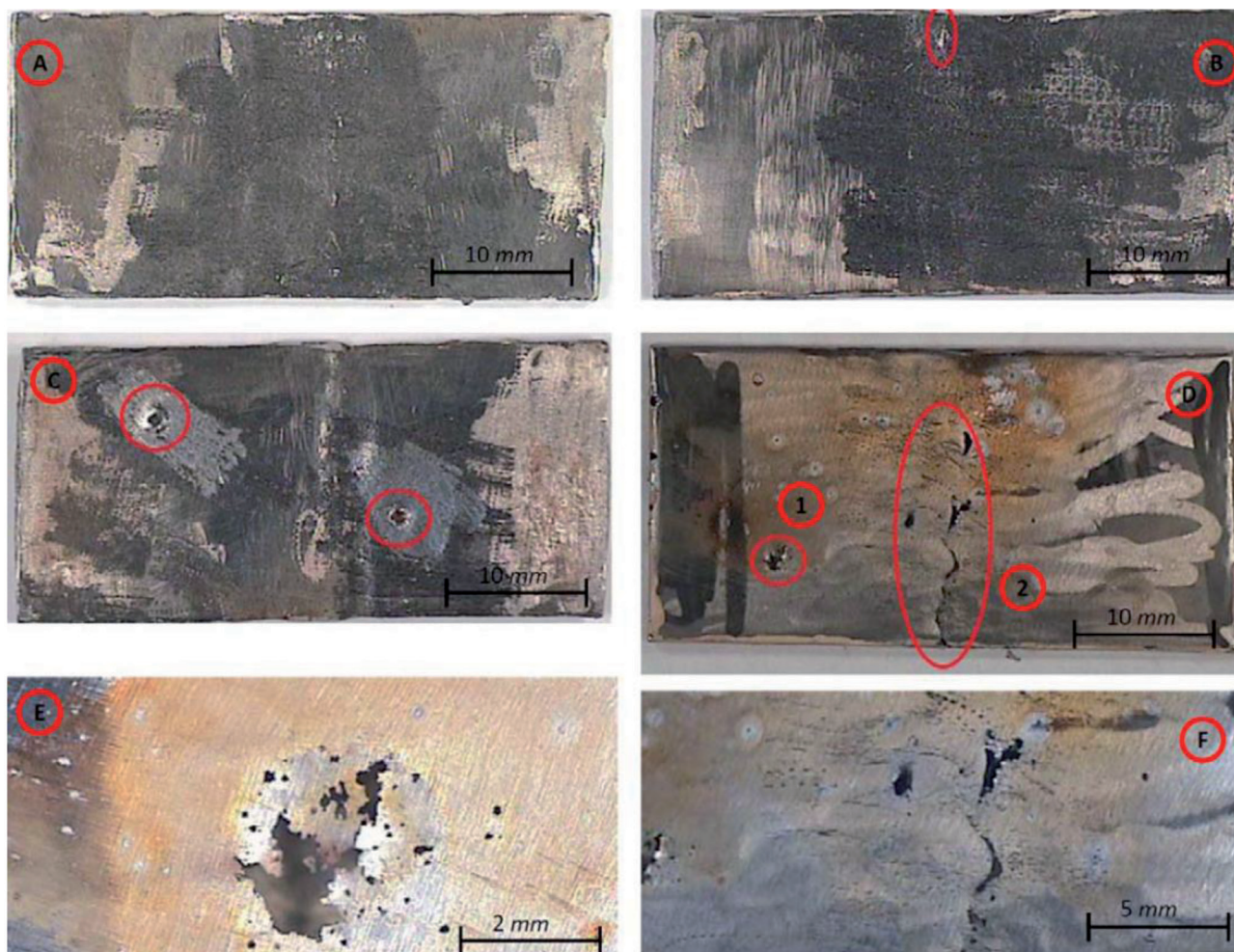


Figura 4: Imágenes de las probetas 304 con aporte INCONEL 625 sin atmósfera inerte de argón en ensayo de corrosión por picaduras: A) Probeta sin radiación; B) Probeta con radiación a 200 Gy; C) Probeta con radiación a 700 Gy; D) Probeta con radiación a 1000 Gy; E) Ampliación de defecto 1 en imagen D; F) Ampliación de defecto 2 en imagen D



Figura 5: Imágenes de las probetas 304 con aporte INCONEL 625 con atmósfera inerte de argón en ensayo de corrosión por picaduras: A) Probeta sin radiación; B) Probeta con radiación a 200 Gy; C) Probeta con radiación a 700 Gy; D) Probeta con radiación a 1000 Gy; E) Ampliación de defecto 1 en imagen D; F) Ampliación de defecto 2 en imagen D.

Los resultados obtenidos, muestran que el aumento en las características mecánicas y resistentes en la irradiación a 1000 Gy produce una progresiva fragilización, lo que puede ser consecuencia del aumento de corrosión como puede observarse en las micrografías, siendo más significativas en aquellas piezas que han sido soldadas sin cámara de gas inerte.

### 3.3. CARACTERÍSTICAS A LA CORROSIÓN POR PICADURAS

Como el nombre indica, la corrosión por picaduras toma la forma de pequeños hoyos localizados producida por un ácido, particularmente cloruro férrico. Se dejaron durante 72 horas las probetas soldadas en una solución de cloruro férrico al 10% y se evaluó la corrosión una vez finalizado el proceso. Se ha hecho el proceso para todas las probetas, mostrándose en la Figura 4 los resultados con las probetas 304 con aporte INCONEL 625 sin atmósfera inerte de argón, y en la Figura 5, las probetas 304 con aporte INCONEL 625 con atmósfera inerte de argón, donde se puede observar la evolución de la corrosión en función de la dosis de radiación de las probetas.

En los ensayos de corrosión se han obtenido resultados interesantes. En el material soldado con cámara inerte, existe

menos corrosión a irradiaciones de 200 y 700 Gy, sin embargo a 1000Gy, se producen defectos elevados en la pieza a causa de la posible fragilización que afecta a la estructura del grano del material. Existe poca corrosión a bajas irradiaciones, no obstante se acentúa de una forma muy significativa a altas irradiaciones y se observa la correlación con los resultados de los ensayos de las características mecánicas.

Para cuantificar los resultados obtenidos de las piezas a corrosión, se han pesado las probetas antes y después de ser sometidas a corrosión, los resultados mostraron que en las piezas irradiadas con 1000 Gy, se pudo apreciar una corrosión significativa de 0.0034 gr/h. Con ello se realizó una comparación de pérdida de masa para las probetas irradiadas a 1000 Gy tras 72 horas sometidos a corrosión.

En las probetas soldadas sin cámara inerte, se cumple también que la corrosión va aumentando conforme aumenta la energía irradiada en las piezas a 200 es menor que a 700 Gy, y ambas menores que a 1000 Gy. Se ha analizado que esta irradiación produce una corrosión mayor que en las probetas que han sido irradiadas con cámara inerte, como posible consecuencia de una velocidad de enfriamiento más uniforme que las que han sido enfriadas en ambiente natural.

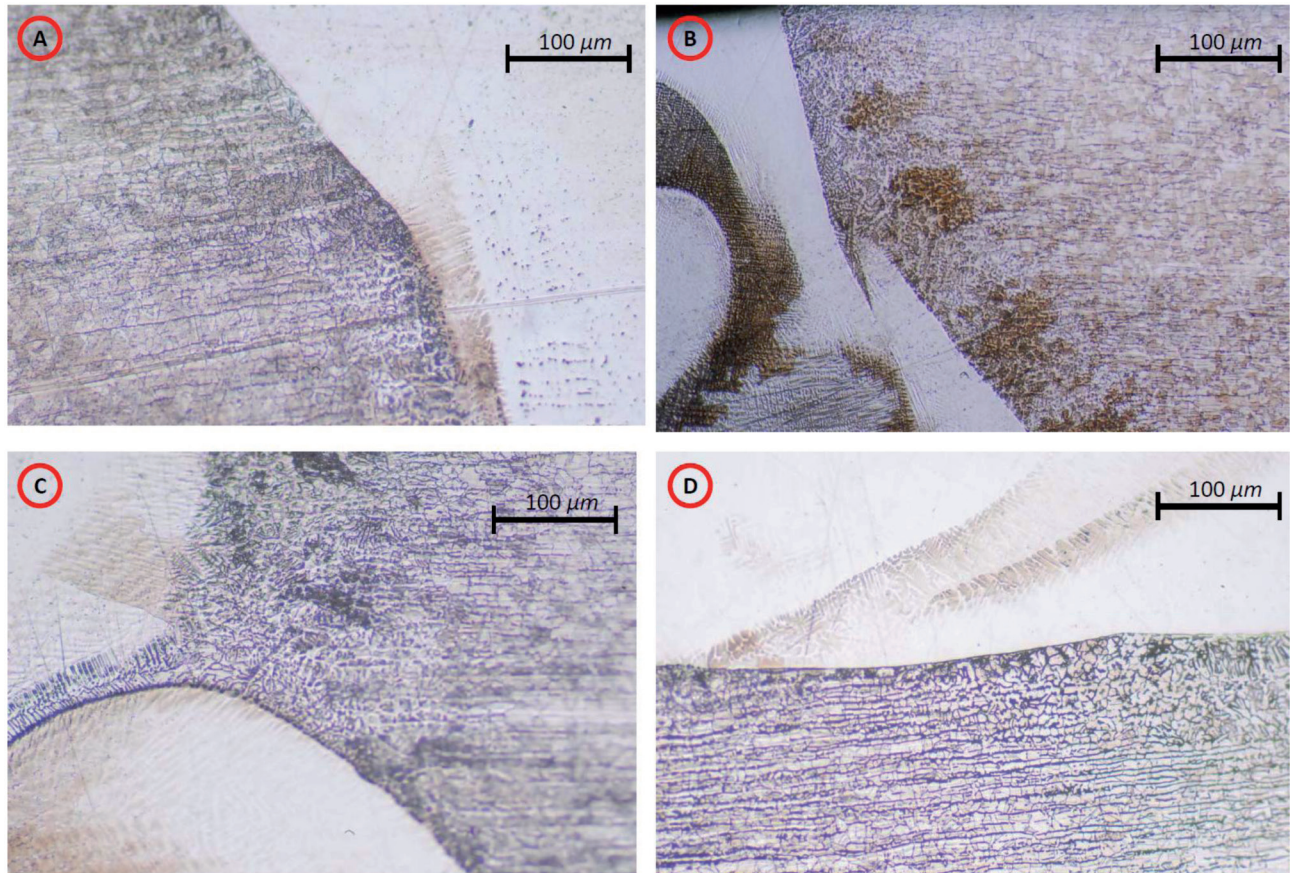


Figura 6: Microestructura de la unión soldada sin cámara inerte en la zona interfase x100: A) Probeta sin radiación; B) Probeta con radiación a 200 Gy; C) Probeta con radiación a 700 Gy; D) Probeta con radiación a 1000 Gy

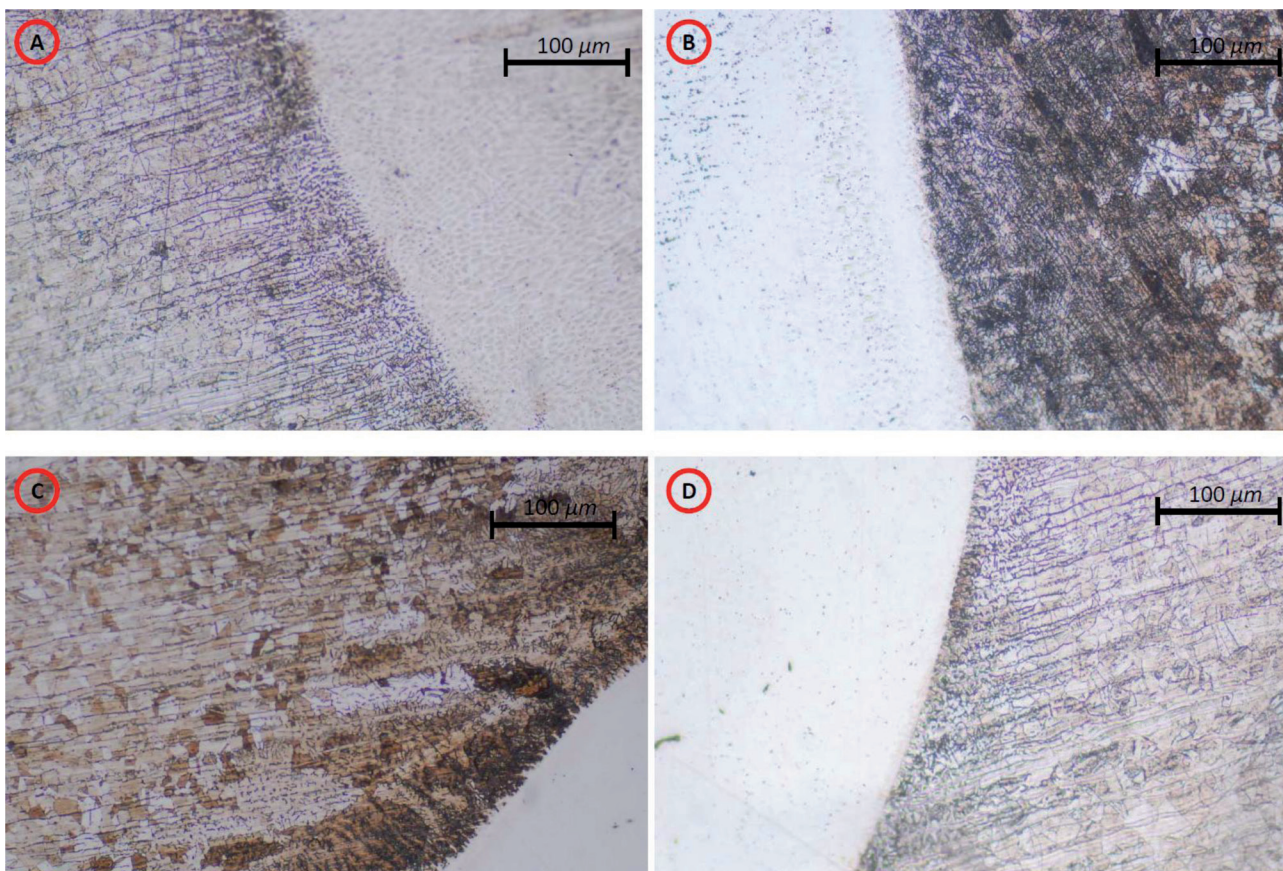


Figura 7: Microestructura de la unión soldada con atmósfera de argón en la zona interfase x100: A) Probeta sin radiación; B) Probeta con radiación a 200 Gy; C) Probeta con radiación a 700 Gy; D) Probeta con radiación a 1000 Gy



Se observa además que la corrosión va aumentando con la irradiación absorbida por las muestras a 200 y 700 Gy, y que es mayor en piezas soldadas sin cámara inerte, pero a 1000 Gy la corrosión en las piezas soldadas con cámara inerte aumenta considerablemente, siendo superior a la obtenida en la soldada en ambiente natural, las consecuencias en general son similares en los dos procesos de soldadura.

### 3.4. ANÁLISIS DE LAS MICROESTRUCTURAS SOLDADAS

Después de la observación al microscopio, se han realizado fotografías a 50, 100, 200 y 400 aumentos en la zona de interfase, para poder comparar con otros tipos de soldaduras los resultados obtenidos. En las figuras 6 y 7 se muestran las fotografías a 100 aumentos para diferentes dosis de radiación y según el tipo de atmósfera de soldadura.

Las Figuras 8 y 9 muestran la micrografía y espectros obtenidos por SEM de dos muestras de las soldaduras, una sin irradiar e la otra muestra irradiada con la dosis más elevada de 1000 Gy.

En todas las micrografías se pueden observar tres zonas diferenciadas, la zona de material base con un tipo de grano austenítico (característico del acero inoxidable), la zona interfase en la cual se combina el grano austenítico con dendrítico, siendo el grano austenítico de mayor tamaño que el de

material base en la zona afectada térmicamente. En la zona de soldadura el grano a solidificado de forma dendrítica, apareciendo pequeños precipitados en borde de grano de carburo de Cromo.

En las micrografías obtenidas con estos aumentos no se puede observar una fragilización en la estructura del grano como consecuencia de la radiación, mostrándose esta, en la variación de las características resistentes.

En la soldadura de acero AISI 304 con aporte de INCONEL 625 sin cámara inerte de Argón, se observa también que la dosis de radiación absorbida por el material afecta tanto en las características mecánicas como a las características ante la corrosión.

En la soldadura de acero AISI 304 + INCONEL 625 a 200 Gy se muestra la mínima fragilización del material ya que aparece la mínima tensión de rotura y límite elástico así como la mínima dureza obtenida en el ensayo de microdureza Vickers.

En cambio la máxima corrosión del material tanto superficial como intergranularmente aparece en la dosis absorbida de 1000 Gy debido seguramente a una variación en la fragilización en los límites de bordes de grano.

Esto confirma que la radiación cambia las propiedades del material y por la progresión que se observa, se puede llegar a la conclusión de que a más dosis de radiación absorbida, es más fragilizante y corrosiva en el material y en la soldadura.

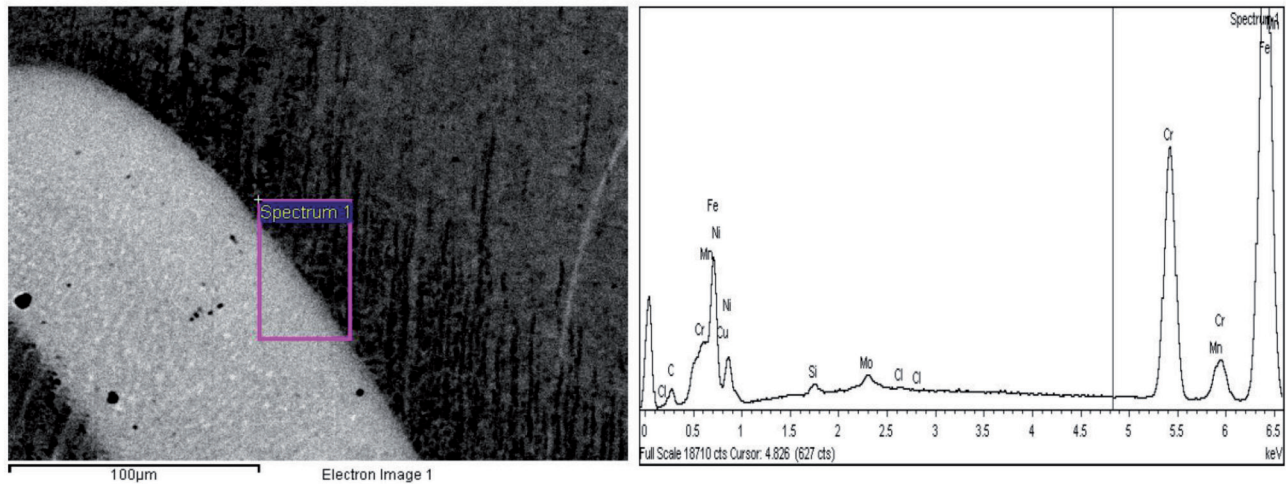


Figura 8: Micrografía y espectro SEM de la unión soldada sin atmósfera de argón en la zona interfase sin irradiar

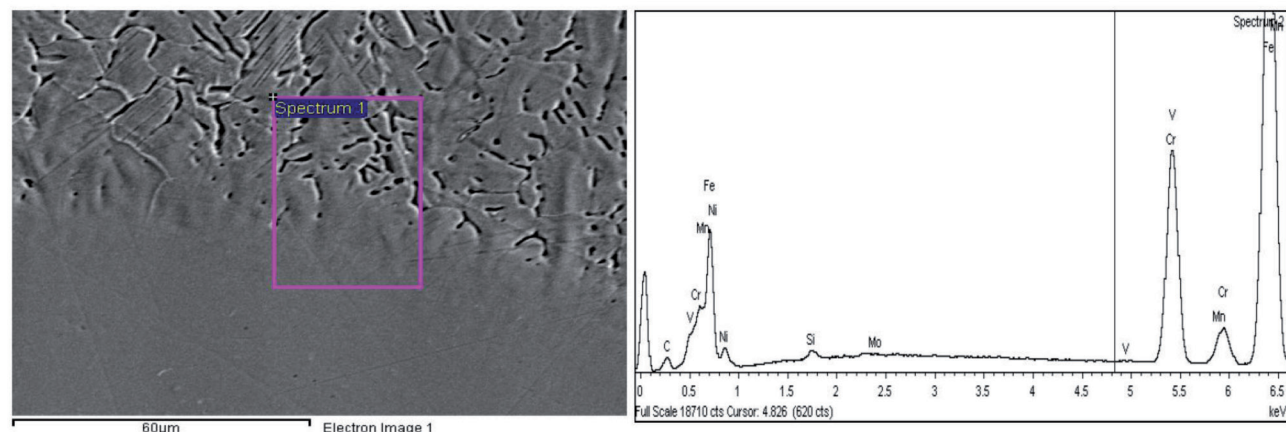


Figura 9: Micrografía y espectro SEM de la unión soldada sin atmósfera de argón en la zona interfase irradiada a 1000 Gy

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio se ha observado que la radiación ionizante varía las propiedades mecánicas y estructurales de las soldaduras de acero AISI 304 con aporte INCONEL 625 y dos atmósferas diferentes, una inerte de argón y otra de aire natural.

En cuanto a características mecánicas de las soldaduras, se concluye que la fragilización del material significativa en una dosis de 1000 Gy, pudiendo ser debido a la ausencia de una velocidad de enfriamiento constante que permita que la estructura del grano sea más estable. Una solución para ello podría ser añadir una cámara inerte para proteger la soldadura de cambios bruscos de temperatura. En las realizadas en cámara inerte no se observa tanta diferencia de valores en corrosión y características resistentes, debido a que la atmósfera inerte mantiene una velocidad de enfriamiento más constante. Y ello puede influir en que la estructura del grano tenga más uniformidad y al ser irradiada influya en la consecuencia de la fragilización en bordes de grano, obteniendo más estabilidad.

En general, las soldaduras con las distintas dosis de radiación ionizante, disminuyen su capacidad frente a la corrosión, en especial la soldadura sin cámara inerte de argón. Conforme se aumenta la dosis de radiación absorbida se observa un aumento de la corrosión, de forma más especial cuando la dosis es de 1000 Gy.

Referente al proceso de corrosión, como se observa en las micrografías y espectro tomadas en SEM (Fig 8 y 9) de dos muestras, una de ellas la soldadura sin cámara inerte del acero y sin exposición a radiación y la otra muestra igualmente soldada sin cámara inerte pero irradiada a 1000 Gy para que haya mayor diferencia energética entre ellas y observar posibles variaciones en los procesos químicos de las soldaduras, así como posibles variaciones en cuanto al contenido de los componentes una vez efectuada la unión soldada. En el espectro analizado de los componentes que aparecen, se puede concluir que las variaciones obtenidas en ambas muestras son mínimas, lo que puede afirmarse que la radiación en cuanto a la composición no ha afectado significativamente, lo que muestra que la corrosión es debida a que la energía irradiada ha generado defectos atómicos en la red, desplazando los átomos de sus posiciones de equilibrio y generando defectos de huecos e intersticios por donde va generalmente a iniciarse un proceso corrosivo muy superior al ocasionado cuando la estructura de la red esta en equilibrio, es decir cuando no está irradiada.

La soldadura de acero AISI 304 + INCONEL 625 con atmósfera natural es la que más sufre los efectos de la corrosión.

Debido a las convergencias a altas irradiaciones, en futuros estudios sería interesante continuar los ensayos a más altas irradiaciones.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo, quieren mostrar su agradecimiento al editor y los revisores anónimos del presente artículo, por sus excelentes recomendaciones y consideraciones, que sin duda han ayudado a sintetizar y mejorar el artículo de una manera sustancial.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lee, D. J., Byun, J. C., Sung, J. H., & Lee, H. W. The dependence of crack properties on the Cr/Ni equivalent ratio in AISI 304L austenitic stainless steel weld metals. *Materials Science and Engineering: A*, (2009), vol. 513, p. 154-159. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.049>.
- [2] Lee, D. J., Jung, K. H., Sung, J. H., Kim, Y. H., Lee, K. H., Park, J. U. & Lee, H. W.. Pitting corrosion behavior on crack property in AISI 304L weld metals with varying Cr/Ni equivalent ratio. *Materials & Design*, (2009), vol. 30, no 8, pp. 3269-3273. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.023>
- [3] Gill, T.P.S., Shankar, V., Pujar, M.G., Rodriguez, P., "Effect of composition on the transformation of ferrite in type 316 stainless steel weld metals", *Scripta Metallurgica et Materialia*, (1995) Vol. 32, No.10, pp. 1595-1600. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X\(95\)00242-N](http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X(95)00242-N)
- [4] Lee, E. H., Byun, T. S., Hunn, J. D., Yoo, M. H., Farrell, K. and Mansur, L. K. On the origin of deformation microstructures in austenitic stainless steel: part I—microstructures, *Acta Materialia*, (2001), Volume 49, Issue 16, PP 3269-3276, [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00193-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00193-8).
- [5] Lee, E. H., Byun, T. S., Hunn, J. D., Farrell, K., & Mansur, L. K. On the origin of deformation microstructures in austenitic stainless steel: Part II—Mechanisms, *Acta Materialia*, (2001) Volume 49, Issue 16 PP 3277-3287, [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00194-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00194-X).
- [6] Lee, E. H., Byun, T. S., Hunn, J. D., Farrell, K., & Mansur, L. K. Origin of hardening and deformation mechanisms in irradiated 316 LN austenitic stainless steel. *Journal of nuclear materials*, (2001). 296(1), 183-191. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115\(01\)00566-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115(01)00566-9)
- [7] Hertzberg, R. W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials* (2nd ed.), John Wiley & Sons, 1983.
- [8] S.M. Copley, B.H. Kear, The dependence of the width of a dissociated dislocation on dislocation velocity, *Acta Metallurgica*, (1968) Volume 16, Issue 2, Pp 227-231, [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(68\)90118-1](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(68)90118-1).
- [9] Dai Y, Egeland GW, Long B, Tensile properties of ferritic/martensitic steels irradiated in STIP-I. *J. Nucl. Mater.* (2008); 377;115-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.035>
- [10] Farrell, K. Byun, T.S. Hashimoto, N. Deformation mode maps for tensile deformation of neutron-irradiated structural alloys, *Journal of Nuclear Materials*, (2004) Volume 335, Issue 3, 1, Pp 471-486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.08.006>.
- [11] Wechsler, M.S. *The Inhomogeneity of Plastic Deformation*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1971 (Chapter 2).
- [12] Smidt Jr., F.A. *Dislocation channeling in irradiated metals*, NRL Report 7078, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20390, June 3, 1970.
- [13] Lu, B. T. Pitting and stress corrosion cracking behavior in welded austenitic stainless steel. *Electrochimica acta*, (2005), vol. 50, no 6, p. 1391-1403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2004.08.036>
- [14] Nishimoto, K.; Ogawa, K. Corrosion properties in weldments of stainless steels (1). *Metallurgical factors affecting corrosion properties*. *Welding international*, (1999), vol. 13, no 11, p. 845-854. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09507119909452061>
- [15] Gooch, T. G. Corrosion behavior of welded stainless steel. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, (1996), vol. 75, no 5, p. 135s. [http://www.americanweldingsociety.org/wj/supplement/WJ\\_1996\\_05\\_s135.pdf](http://www.americanweldingsociety.org/wj/supplement/WJ_1996_05_s135.pdf)
- [16] Pascual, M., Salas, F., Cárcel, F. J., Perales, M., & Sánchez, A.. TIG AISI-316 welds using an inert gas welding chamber and different filler metals: Changes in mechanical properties and microstructure. *Revista de Metalurgia*, (2010), 46(6), 493-498. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalmadrid.1005> .
- [17] Cárcel-Carrasco F, Roldan-Porta C, Grau-Carrion J. "La sinergia entre el diseño de planta industrial y mantenimiento-explotación eficiente. un ejemplo de éxito: el caso martínez loriente S.A. " *DYNA*. (2013). Vol.88 (6), 286-291. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5856>.