

Calificación del Proceso de Reconstitución del Programa de vigilancia de CLV

Romero Jesús, Hernández Rogelio, Fernández Filiberto
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México
Km. 36.5 Carretera México-Toluca
Apartado Postal 18-1027 México, DF 11801 México
jrc@nuclear.inin.mx.; rhc@nuclear.inin.mx; fili613@hotmail.com

Resumen

El programa de vigilancia de la vasija del reactor de la central nucleoelectrónica de México, evalúa el estado mecánico de la vasija, para ello se tienen cápsulas de vigilancia con una serie de probetas testigo, sometidas a un flujo neutrónico similar o mayor al de la vasija. El objetivo es evaluar con anticipación el grado de fragilización de la vasija en su vida de diseño. Sin embargo el número de cápsulas con las probetas testigo es solo para la vida de diseño de la planta y actualmente las plantas nucleoelectricas gestionan una extensión de vida de éstas, hasta por 20 años mas, de ahí la importancia de este material testigo que almacena la información del daño acumulado por irradiación. Este material requiere ser aprovechado después de ser ensayado y la normativa establece como obligatorio calificar el proceso de reconstitución para obtener otras “nuevas” probetas Charpy que sean nuevamente introducidas en el reactor, reutilizando este material, tanto para el programa de vigilancia como para la extensión de vida de la planta. En este trabajo se describe la calificación del proceso de soldadura por “Stud Welding” para la reconstitución de probetas Charpy del programa de vigilancia del reactor BWR de la Unidad 2 de la Nucleoelectrónica de Laguna Verde, Veracruz, México.

1. INTRODUCCIÓN

Se requiere calificar el proceso de soldadura de reconstitución con todos los requisitos establecidos en la norma ASTM Designation: E 1253-99 “Standard Guide for Reconstitution of Irradiated Charpy-Sized Specimens”, el principal requisito es no alterar las propiedades de las mitades de probetas Charpy en un volumen mínimo de 1 cm³ al soldarse dos implantes en los extremos de estas mitades de probetas. Al reconstituirse las mitades de las probetas originales se puede obtener el doble de probetas Charpy reconstituidas. Con las probetas excedentes, actualmente se puede determinar la Tenacidad a la Fractura propiedad del material empleada para sustentar la extensión de vida de la vasija de una nucleoelectrónica de 40 a 60 años. [1].

2. RECONSTITUCIÓN

A grandes rasgos la reconstitución consiste en:

- a) Las mitades de probeta Charpy que ya fueron ensayadas, se maquinan a una longitud mínima de 18 mm., para eliminar la parte deformada por el ensayo de impacto. Con lo anterior se obtiene un volumen útil y representativo del material (INSERTO).
- b) Se suelda por “Stud Welding” dos implantes (Extensiones metálicas cilíndricas) un implante

por cada cara de 1cm² de las mitades de probetas maquinadas.

Se maquina hasta obtener una probeta Charpy – V estándar de acuerdo a la norma ASTM-E23 “Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”[2].

El término “Stud Welding” se utiliza en general para la unión de un implante metálico a otra pieza metálica similar. La soldadura puede ser por arco eléctrico, resistencia, fricción, rayo Laser, haz de electrones u otro proceso, con o sin gas inerte de protección. En nuestro caso el equipo utilizado es de Arco Eléctrico con compresión y utilizando Helio de Alta Pureza como gas Inerte de protección. Este proceso de soldadura tiene requisitos y particularidades específicas como las siguientes:

1. Protección y Seguridad Radiológica. El material se encuentra activado con una emisión de radiación Gamma entre 60 y 100 mR/h por probeta, por lo tanto la manipulación, manejo y maquinado, debe de ser de tal modo que asegure una adecuada protección al personal.
2. No alterar las propiedades del material. Al soldarse los implantes al inserto el Aporte de Calor podría ocasionar recocidos locales y por tanto cambiar las propiedades mecánicas a evaluar. Lo anterior nos limita a que la zona soldada sea pequeña y una Zona Afectada por el Calor (ZAC) reducida.
3. Calificación del Proceso. El proceso de soldadura por Stud Welding debe ser calificado de acuerdo a la Norma ASTM Designation: E 1253-99 “Standard Guide for Reconstitution of Irradiated Charpy-Sized Specimens”. Con la calificación también garantizamos repetibilidad y definimos los parámetros que se usarán en producción además de los requisitos dimensionales, el Aporte de Calor y Zona Afectada por el Calor que establece la norma.
4. Programa de Garantía de Calidad. En este proceso se aplica un Programa de Garantía de Calidad compatible con los 18 Criterios establecidos en el Code of Federal Regulations 10CFR50 Apéndice B y con los requisitos que exige la Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz, México.

2.1. Sistema de Soldadura.

El equipo de soldadura utilizado es de fusión, por medio de un arco eléctrico, que se establece entre la cara del inserto y la cara del implante a soldar. Inmediatamente después de la fusión se realiza una presión de forja entre las caras a soldar por medio de un pistón neumático. El sistema de soldadura se compone de:

- 1) Equipo de Soldadura. Con Fuente de Potencia, Plataforma de soldadura y Programador lógico computarizado (PLC).
- 2) Controlador de Flujo de Helio.
- 3) 2 Osciloscopios Digitales.
- 4) Computadora Portátil.

2.1.1. Proceso de soldadura

El proceso de soldadura en forma general consta de los 4 pasos que se ilustran en la Figura 1. El paso 1 consiste en bajar el implante para que haga contacto con el inserto, este contacto lo detecta el PLC y la fuente de potencia esta preparada para iniciar el arco de soldadura. El paso 2 es la creación de un pre-arco. En paso 3 se separa el implante y se crea el arco de soldadura. En el paso 4 se presiona el implante sobre el inserto que comprime el fundido.

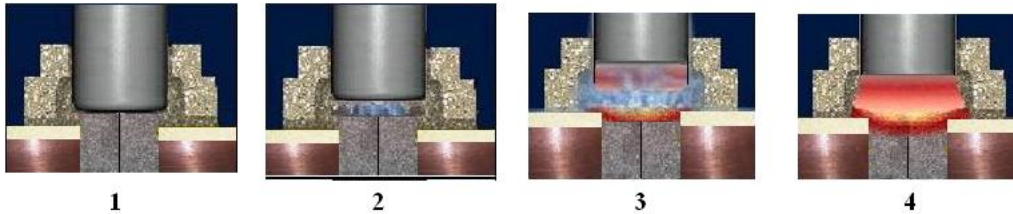


Figura 1. Pasos generales en el proceso de soldadura

El proceso de soldadura se realiza en una atmósfera inerte, creada por un alto flujo de helio (125 LPM). En el proceso se utiliza un cerámico circular plano que esta sobre el inserto, y otro cerámico circular sobre el implante, estos cerámicos tienen la función de mantener el fundido entre ellos. Lo anterior y el dispositivo de flujo se muestra en la Figura 2.

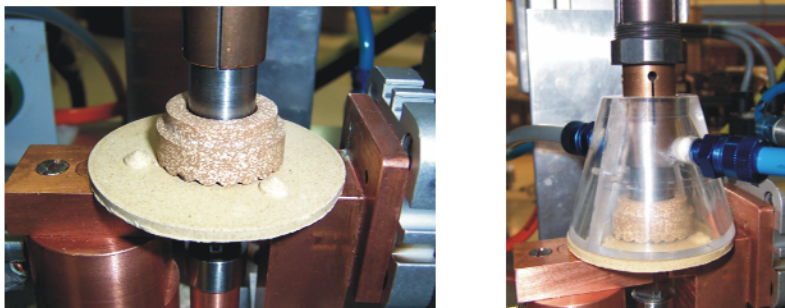


Figura 2. Colocación de cerámicos y dispositivo de flujo.

Al momento en que se suelda se adquieren los datos de amperaje y voltaje con el osciloscopio y computadora para el almacenamiento de gráficas. Las gráficas de Corriente y Voltaje se muestran en la Figura 3. La soldadura del segundo implante se realiza de igual forma a lo descrito anteriormente

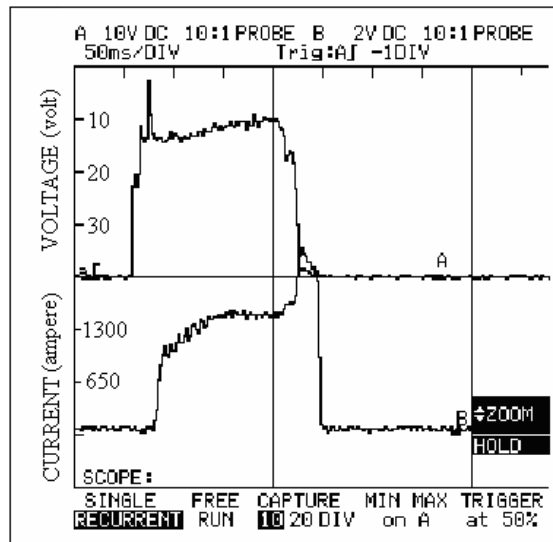


Figura 3. Gráficas de Corriente y Voltaje en el proceso de soldadura

3. CALIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA

Esta calificación se hizo de acuerdo a la Norma ASTM E 1253-99 [3]. El material empleado es JRQ que es un Acero ASTM A533 grado B Clase 1 caracterizado por el OIEA, idéntico al de la vasija [4].

Las dimensiones y tolerancias en milímetros de maquinado con que se realizó la calificación es la siguiente:

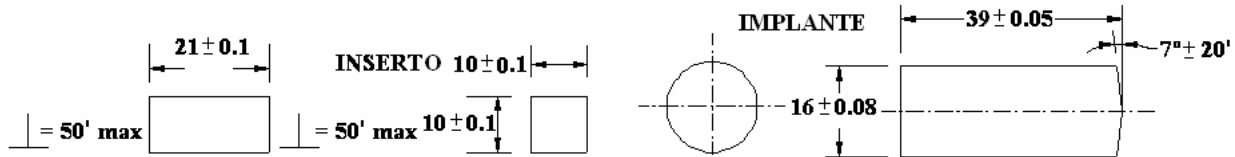


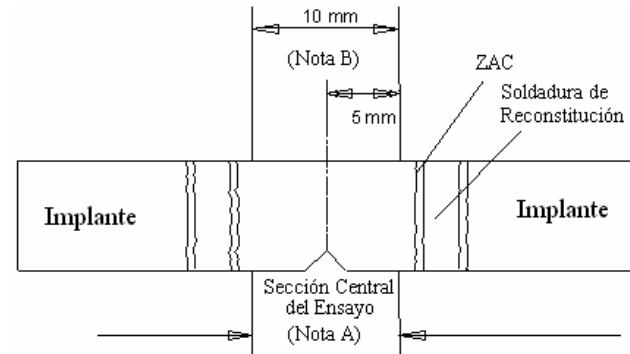
Figura 4. Dimensiones de Inserto e Implante

La limpieza de los implantes e inserto se realizó en una tina ultrasónica, utilizando acetona como solvente.

3.1. Requisitos de Calificación.

Resumiendo la norma, los principales requisitos de calificación son 3:

1).- La temperatura en el volumen central de 1 cm³ del inserto no debe exceder la temperatura de irradiación del reactor (288 °C) en ningún momento en la soldadura, además se debe cumplir lo descrito en la figura 5:



Nota A. - No se permite que ninguna deformación plástica causada por las ZACs de la soldadura de reconstitución se encuentre en la Sección Central del Ensayo
 Nota B. - La temperatura durante la soldadura no debe exceder la temperatura de irradiación

Figura 5. Especificación de soldadura de reconstitución

2).- Con al menos 6 probetas Charpy de material virgen, se debe construir la Curva de Transición Dúctil –Frágil y determinar la Temperatura de Transición, (Temperaturas indexadas a T_{30 pie-lbf} y T_{50 pie-lbf}) Energía de Impacto, Expansión lateral y % Apariencia de Fractura Dúctil. Se reconstituirán una de las mitades del anterior ensayo y se maquinan nuevas probetas Charpy que serán ensayadas a la misma temperatura dirección y orientación, que el primer ensayo, con lo anterior se construye su curva de Transición Dúctil –Frágil y se determina la Temperatura de Transición (Temperaturas indexadas a T_{30 pie-lbf} y T_{50 pie-lbf}), Energía de Impacto, Expansión lateral

y % Apariencia de Fractura Dúctil. Al comparar las dos curvas estas deben ser semejantes, al igual que las temperaturas de transición.

3).-No deben fracturarse las probetas reconstituidas en la soldadura de reconstitución.

3.2. Medición de temperatura máxima alcanzada al soldar.

Antes de iniciar las soldaduras de calificación se realizó la medición de la máxima temperatura alcanzada a 5 mm. de la cara del inserto a soldar, el termopar es tipo K y se coloca al centro del inserto sobre la diagonal. La temperatura máxima es de 225 °C calculada por interpolación, como se muestra en la figura 7.

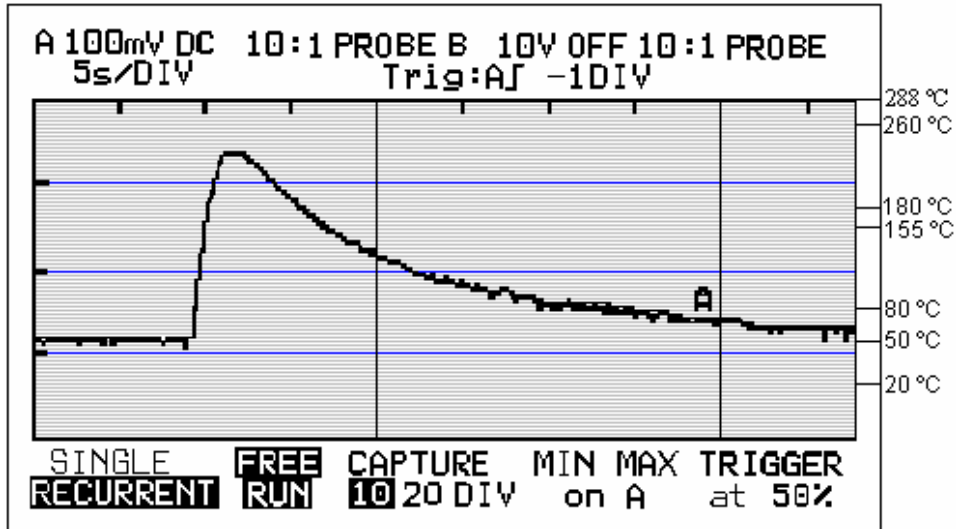


Figura 7.- Temperatura máxima alcanzada a 5 mm de la superficie del inserto

Dado que nuestro inserto mide 21 mm. y a 5 mm. la temperatura máxima alcanzada es de 225 °C, cumplimos con amplio margen que la temperatura en el volumen central de 1 cm³ del inserto no excede la temperatura de irradiación de 288 °C.

3.3. Maquinado, Identificación y Ensayo de Impacto en Probetas Originales.

Se maquinaron 9 probetas Charpy de acero JRQ, de acuerdo a la Norma ASTM E23 (Su identificación fue JRQ-02 ...hasta JRQ-10). Estas probetas son las probetas originales para la calificación.. La identificación de las mitades de los Insertos debe ser la que tiene la probeta original y aumentando la letra “A” o “B” para cada media probeta, con lo anterior se cumple, que la identificación debe permitir remontarse a la probeta original.

Se realizó el ensayo de Impacto de las 9 probetas Charpy de acero JRQ a diferente temperatura de acuerdo a la Norma E23 “Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, se construyó la Curva de Transición Dúctil –Frágil y se determinó la Temperatura de Transición, Energía de Impacto, la Curva de Expansión lateral y la Curva de % Apariencia de Fractura Dúctil. Los datos para obtener las curvas se muestran a continuación:

JRQ ORIGINALES (SIN RECONSTITUIR)

PROBETA	Temperatura		Energía		Expansión Lateral		% FD
	(°C)	(°F)	(Joules)	(ft-lb)	(mm)	(mils)	
JRQ-08	-97.77	-144	8.81	6.5	0.12	4.84	3
JRQ-06	-40	-40	15.73	11.6	0.20	8.03	3
JRQ-10	-20	-4	75.38	55.6	0.82	32.36	10
JRQ-04	0	32	122.70	90.5	1.15	45.47	23
JRQ-02	15	59	210.28	155.1	1.74	68.4	45
JRQ-03	50	122	287.43	212	2.31	90.87	80
JRQ-05	93.33	200	354.00	261.1	1.98	78.03	100
JRQ-09	150	302	328.10	242	2.41	94.84	100
JRQ-07	190	374	351.15	259	2.01	79.22	100

3.4. Soldaduras de Reconstitución

Se realizó las soldaduras de reconstitución de 18 Insertos de acuerdo a los procedimientos, y especificación de soldadura, cuyos parámetros principales son los mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales parámetros de soldadura de reconstitución

Amperaje promedio: 1300 Amperes.	Voltaje promedio: 28 Voltios.
Tiempo de arco eléctrico: 130 milisegundos.	Longitud de Arco: 2.5 mm.
Flujo de Helio de Alta Pureza: 125 LPM.	Aporte de Calor: 4732 Joules

3.5. Ensayo de Impacto de Probetas Charpy Reconstituidas

Se realizó el ensayo de Impacto de las probetas Charpy reconstituidas dadas en la tabla de abajo, cada una se ensayó a la misma temperatura de la probeta original de acuerdo a la Norma ASTM E23 "Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, se construyó las Curvas respectivas. Los datos para obtener las curvas se muestran a continuación:

PROBETA	Temperatura		Energía		Expansión Lateral		% FD
	(°C)	(°F)	(Joules)	(ft-lb)	(mm)	(mils)	
JRQ-08A	-97.77	-144	7.05	5.2	0	0	0
JRQ-06B	-40	-40	52.60	38.8	0.58	23	3
JRQ-10B	-20	-4	84.19	62.1	0.86	34	9
JRQ-04B	0	32	150.76	111.2	1.32	52	23
JRQ-02B	15	59	227.90	168.1	1.65	65	45
JRQ-03A	50	122	280.38	206.8	1.88	74	80
JRQ-05A	93.33	200	350.47	258.5	2.13	84	100
JRQ-09B	150	302	305.05	225	1.90	75	100
JRQ-07A	190	374	319.02	235.3	1.83	72	100

3.6. Comparación del Ensayo de Impacto Charpy en Probetas Originales y Reconstituidas

En la figura 7 se comparan las curvas de energía y las temperaturas indexadas a 30 y 50 pie-lb de Transición Dúctil –Frágil, el USE (Upper Shelf Energy) y se dan las ecuaciones de las curvas.

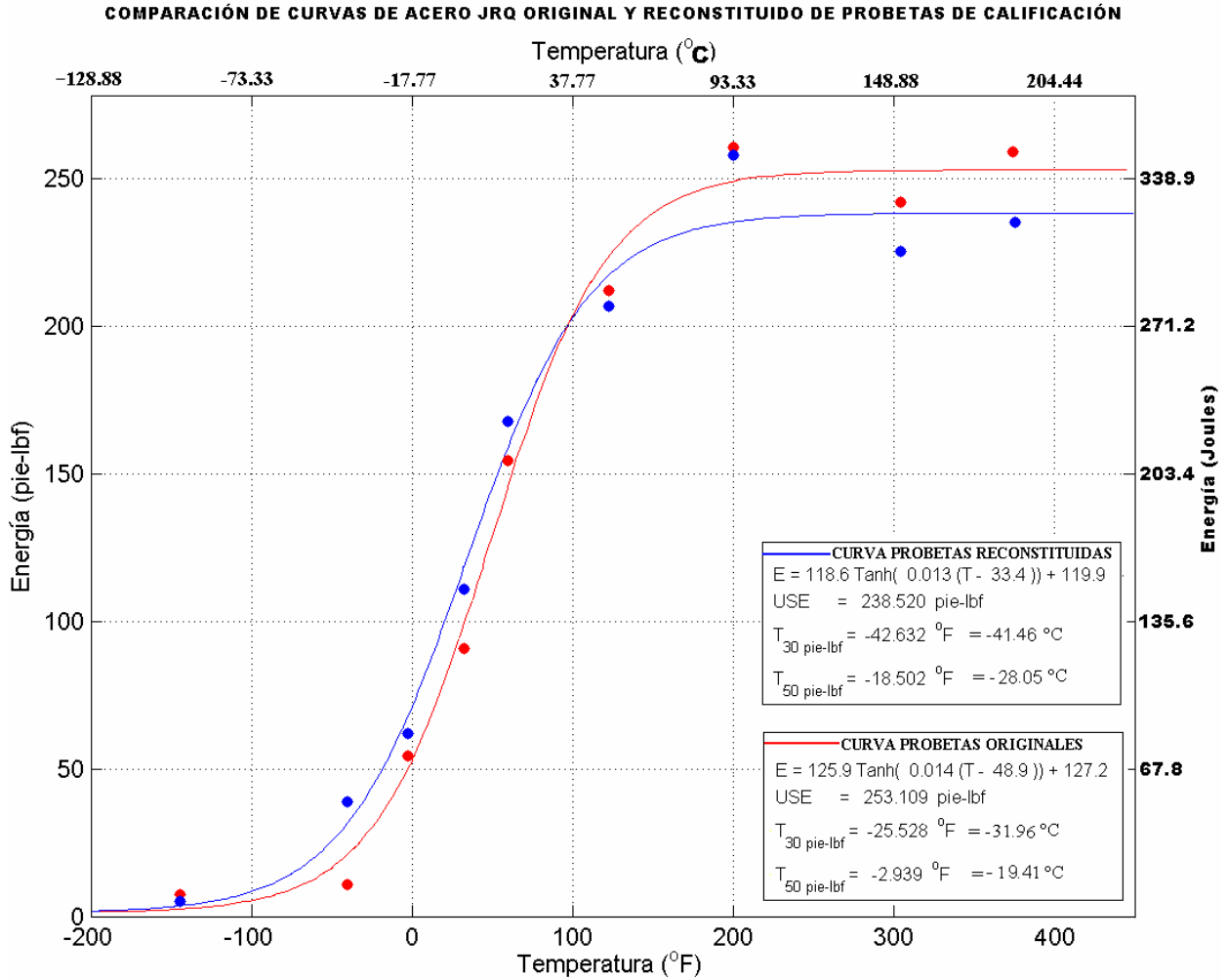


Figura 7. Comparación de curvas de energía entre probetas originales y reconstituidas

En la figura 8 se comparan las curvas de expansión lateral y las Temperaturas a 36 mils y se dan las ecuaciones de las curvas.

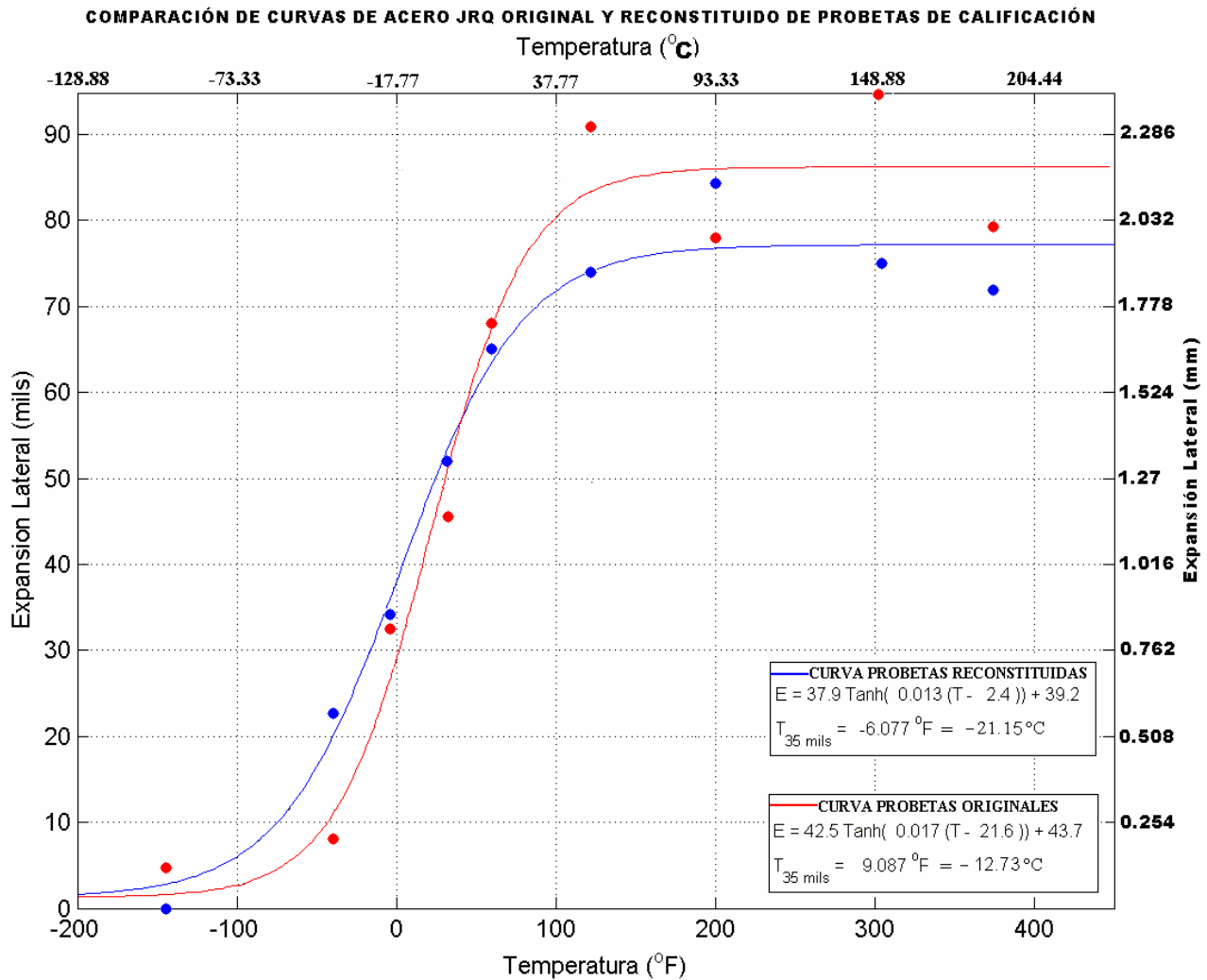


Figura 8. Comparación de curvas de expansión lateral entre probetas originales y reconstituidas

En la figura 9 se comparan las curvas de % de fractura dúctil y las temperaturas indexadas al 50% y se dan las ecuaciones de las curvas.

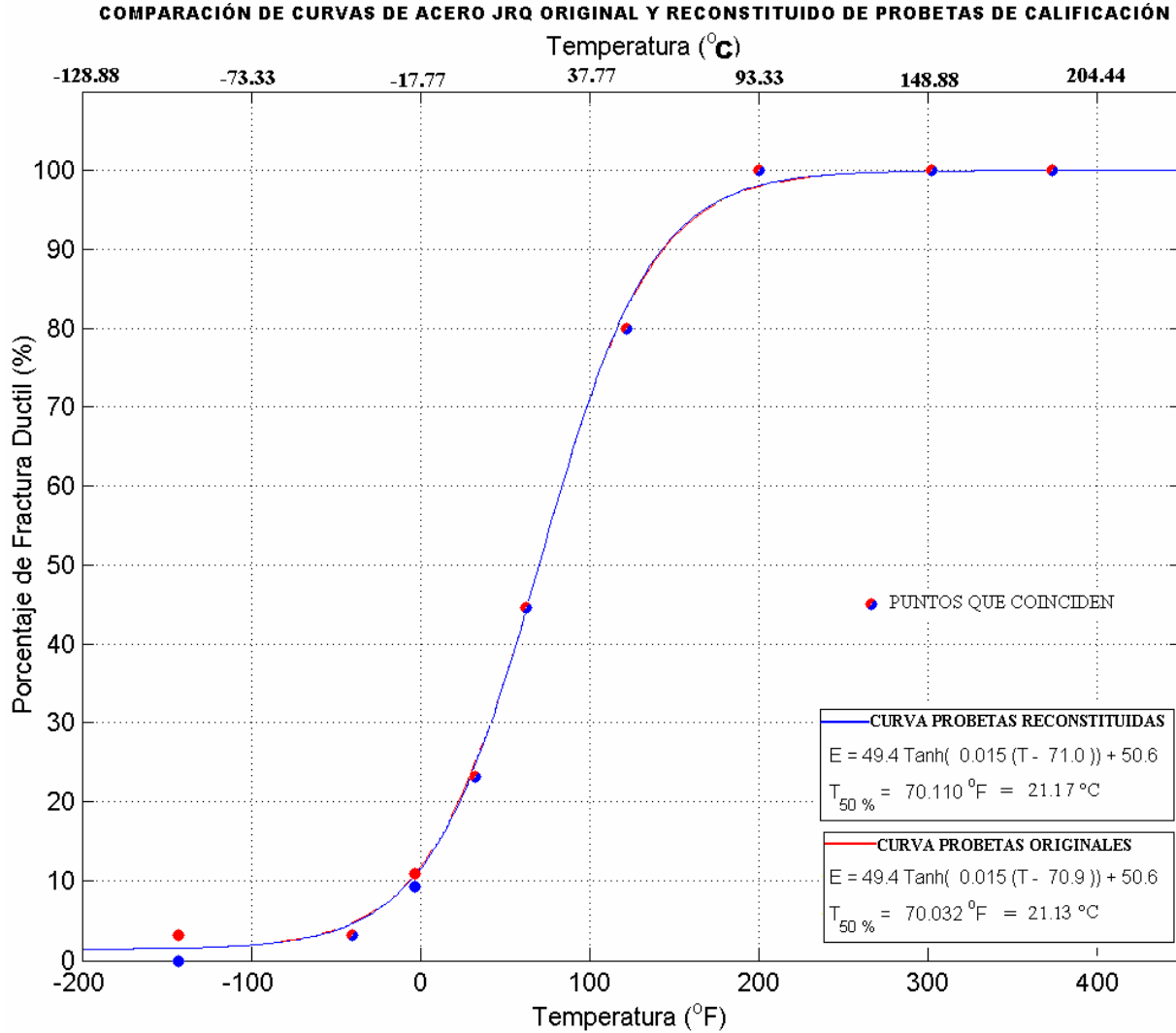


Figura 9. Comparación de curvas de % de fractura dúctil entre probetas originales y reconstituidas

Resumiendo los valores de Temperatura de estas gráficas y realizando la diferencia tenemos:

Tabla II. Diferencia de temperaturas en los ensayos originales y reconstituidos

		ORIGINAL		RECONSTITUIDO		DIFERENCIA	
		°F	°C	°F	°C	°F	°C
ENERGÍA	30 pie-lb	-25.53	-31.96	-42.63	-41.46	17.1	9.5
	50 pie-lb	-2.939	-19.41	-18.50	-28.05	15.6	8.64
Expansión Lateral a 35 mils		9.087	-12.73	-6.077	-21.15	15.2	8.42
Al 50% de Fractura Dúctil		70.032	21.13	70.11	21.17	0.08	0.04

3.7. Metalografía

Como complemento de la calificación, se realizó la metalografía para observar porosidad, zona soldada, Zona Afectada por el Calor (ZAC). Las dimensiones del cordón de soldadura varía de 1.3 a 1.8 mm., la zona afectada por el calor es de 0.35 mm. sobre el inserto y de 0.78 mm. sobre el implante. Existe muy baja porosidad y el poro mas grande mide 0.16 mm. de diámetro. A continuación se muestra macrografía y micrografía en la sección longitudinal de una probeta reconstituída, figura 11.

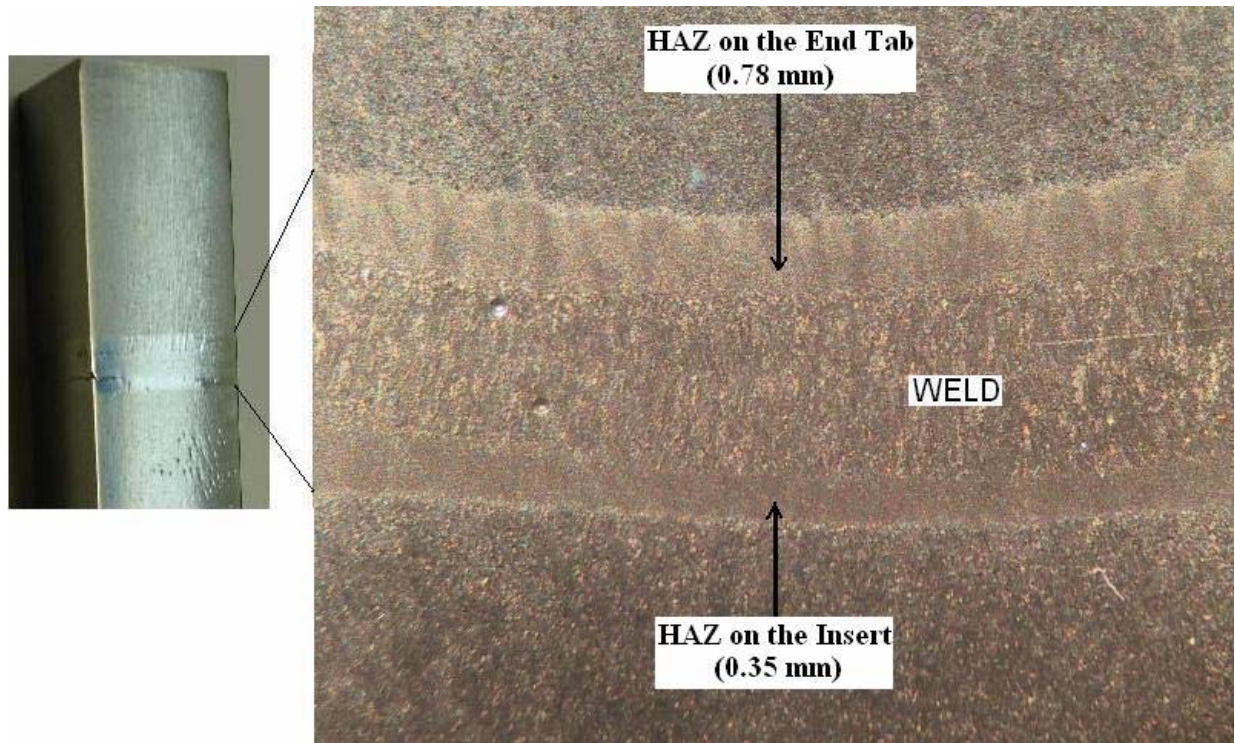


Figura 11. Fotomacrografía (1.7X (HCL))y fotomicrografía (13X Nital al 2%)de zonas en la soldadura de reconstitución.

3.8. Ensayo de Flexión en Tres Puntos

Este ensayo es más riguroso para probar las soldaduras, comparado con el de Impacto, además normalmente se alcanza una carga de 15 KN y en nuestro caso se alcanzó una carga de 30 KN. Las gráficas de tres probetas ensayadas a diferentes temperaturas (150°C, 98°C, y -40°C) se muestran en la Figura 11. Lo que se pide para las soldaduras en este ensayo es que se llegue a la meseta sin fracturarse la probeta en la soldadura.

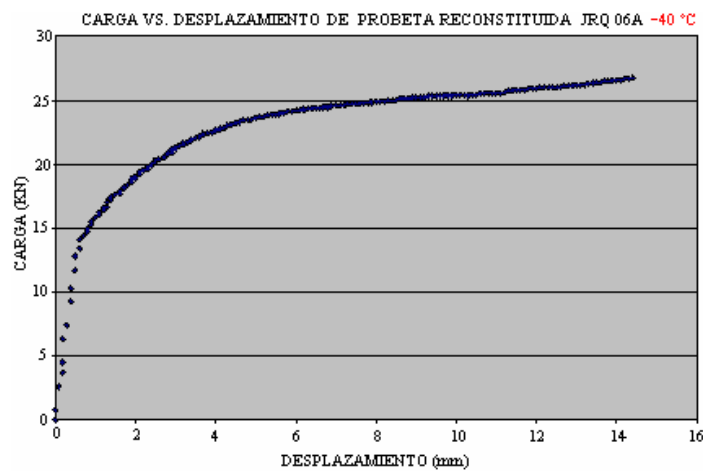
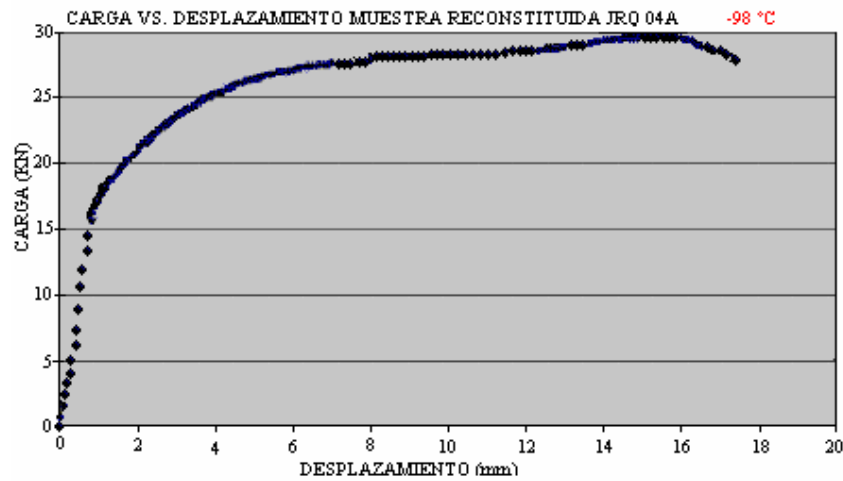
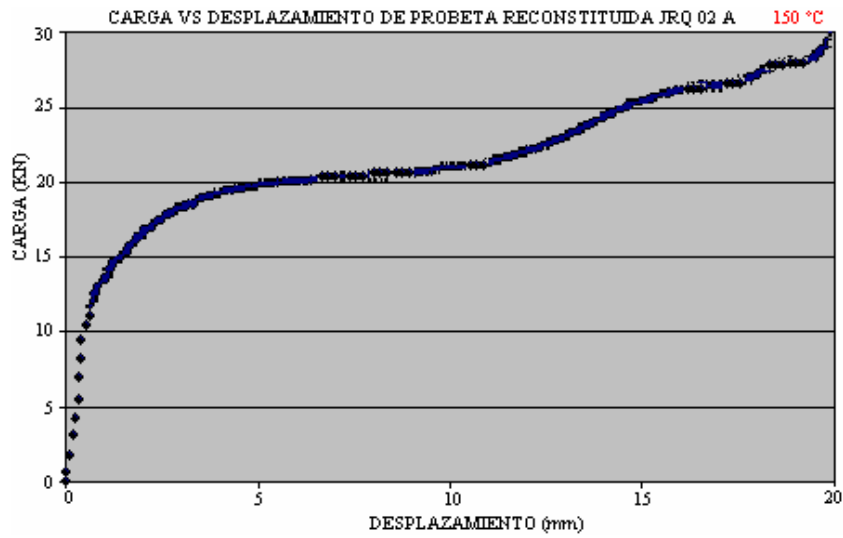


Figura 11.- Gráficas de Flexión en Tres Puntos

5. CONCLUSIONES

Se desarrollo un sistema de soldadura que nos permite reconstituir por Stud Welding, mitades de probetas Charpy sin alterar las propiedades mecánicas del material en un volumen mínimo de 1 cm³. El sistema de soldadura junto con los procedimientos, especificaciones e instrucciones nos permite repetibilidad del proceso y se tiene un desarrollo y un método propio.

El uso de helio de alta pureza, aparte de proteger la soldadura contra la oxidación, con su alto potencial de ionización de 24.59 electrón-volts nos permite mayor aporte de calor que con otros gases por ejemplo Argón, con un potencial de ionización de 15.76 electrón-volts. Por otra parte la alta conductividad del Helio (7 veces mayor que el Argón) extrae rápidamente el calor de la probeta después de soldada, disminuyendo la Zona Afectada por el Calor [5].

La temperatura en el volumen central de 1 cm³ del inserto no debe exceder la temperatura de irradiación del reactor (288°C) en ningún momento en la soldadura, en nuestro caso la temperatura máxima a 5 mm en una probeta de 21 mm es de 225 °C .

Comparando las curvas de transición de Energía, Expansión lateral y % de Fractura Dúctil de las probetas originales y reconstituido son muy semejantes y la máxima diferencia en las temperaturas indexadas es de 9.5 °C.

Las probetas reconstituidas no solo no se fracturan en la soldadura, sino que no sufre ninguna deformación o distorsión, además aumentamos de nuestra parte en la calificación el ensayo de flexión en tres puntos a diferentes temperaturas (150°C, -98°C, -40°C) alcanzando una carga de 30 KN, en la meseta, sin fracturarse la probeta en la soldadura.

La microestructura de las soldaduras revela que no hay porosidad, y un cordón de soldadura de 1.3 a 1.8 mm con una Zona Afectada por el Calor (ZAC) máxima de 0.35 mm. en el inserto, con lo anterior se cumple con una zona soldada pequeña y una ZAC reducida.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación, al personal del ININ de los Departamentos de Material Nuclear, Síntesis y Caracterización de Materiales, Electrónica, Talleres Generales, Sistemas Nucleares y Garantía de Calidad. Especialmente a los Técnicos de Proceso: Pedro Nava Nava, Flavio Maya Martínez y Lorenzo Torres Salinas.

REFERENCIAS

1. JR. Pfefferle, W.L.Server, “*MASTER CURVE FRACTURE TOUGHNESS APPLICATION FOR POINT BEACH NUCLEAR PLANT UNIT 2 FINAL REPORT ATI -021-030-2003-1*”, OIEA, Viena, Austria (January 2003).
2. ASTM E23 “Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”
3. Norma ASTM Designation: E 1253-99 “Standard Guide for Reconstitution of Irradiated Charpy-Sized Specimens
4. Nuclear Power Engineering Section, “Reference manual on the IAEA JRQ correlation monitor steel for irradiation damage studies”, *IAEA-TECDOC-1230*, ISSN 1011-4289, July 2001, Vienna, Austria.
5. : Larson and W:H: Meredith, “SHIELDING GAS MANUAL”, *LINDE UNION CARBIDE INDUSTRIAL GASES*, USA. 1990 p.7, 8.