

## **Optimización del proceso de soldadura de reparación de los chasis de primera generación de los trenes de la C.A. Metro de Caracas**

M. Rodríguez-Sangronis<sup>a\*</sup>, G. Navas<sup>b</sup>, Y. Tubiñez<sup>b</sup>

<sup>a</sup> C.A. Metro de Caracas, Gerencia de Ingeniería de Mantenimiento (GIM), Laboratorio de Materiales.

<sup>b</sup> IUT "Dr. Federico Rivero Palacio". Departamento de Tecnología de Materiales, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (LAB-MEB), Caracas, Venezuela.

\*Autor de Correspondencia, E-mail: rodriguez.s.marbella.y@gmail.com, Teléf.: +58 04128009207

Recibido: 21-02-2022 Aceptado: 23-02-2022

Publicado: 31-03-2022

### **RESUMEN**

El presente estudio estuvo enfocado en la mejora del proceso de soldadura de reparación de los chasis de los trenes de la C.A. Metro de Caracas, de manera de extender la vida remanente de los componentes de la carrocería de los trenes más antiguos. Esto permitió extrapolar los resultados obtenidos al procedimiento de reparación por soldadura del resto de la flota de trenes para garantizar la confiabilidad del sistema bogie y con ello la seguridad de los usuarios de la más importante empresa de transporte público del país. La optimización del proceso de soldadura de reparación estuvo enfocada en la determinación de los Tratamientos Térmicos de Post soldadura efectivos a partir de los cuales sea posible obtener una microestructura idónea en la zona afectada por el calor. Para esto, inicialmente se caracterizó el material de fabricación de los bogies mediante análisis por microscopía óptica. Se evaluaron seis (6) muestras según las siguientes condiciones: soldadura sin Tratamiento Térmico, soldadura con Postcalentamiento a 360°C (condición de trabajo), luego revenido en horno a 360°C, a 400°C y 450°C. Las muestras fueron caracterizadas mediante análisis químico, microscopía óptica, microdureza, doblez libre y ensayo de tracción. Finalmente se consideró la condición de trabajo: Pre calentamiento a 120°C más Postcalentamiento a 360°C con tres (3) cordones de soldadura, la cual mostró las mejores propiedades en las evaluaciones microestructurales y mecánicas obteniéndose una microestructura de normalizado ferrítico-perlítica diferente a la obtenida anteriormente de ferrita acicular Widmanstätten, perjudicial para la soldadura.

**Palabras claves:** Pre calentamiento, Postcalentamiento, ferrita Widmanstätten, doblez libre.

### **Optimization of the repair welding process for the first-generation chassis of the C.A. Caracas Metro**

#### **ABSTRACT**

The present study was focused on improving the welding process for repairing the chassis of the C.A. Metro de Caracas, in order to extend the remaining life of the components of the bodywork of the oldest trains. This made it possible to extrapolate the results obtained to the welding repair procedure of the rest of the train fleet to guarantee the reliability of the bogie system and thus the safety of the users of the most important public transport company in the country. The optimization of the repair welding process was focused on determining the effective Post-Welding Heat Treatments from which it is possible to obtain an ideal microstructure in the heat affected zone. For this, the bogie manufacturing material was initially characterized by optical microscopy analysis. Six (6) samples were evaluated according to the following conditions: welding without Heat Treatment, welding with Postheating at 360°C (working condition), then oven tempering at 360°C, 400°C and 450°C. The samples were characterized by chemical analysis, optical microscopy, microhardness, free bending and tensile testing. Finally, the working condition was considered: Preheating at 120°C plus Postheating at 360°C with three (3) weld beads, which showed the best properties in the microstructural and mechanical evaluations, obtaining a normalized ferritic-pearlitic microstructure different from the one previously obtained from Widmanstätten acicular ferrite, harmful to welding.

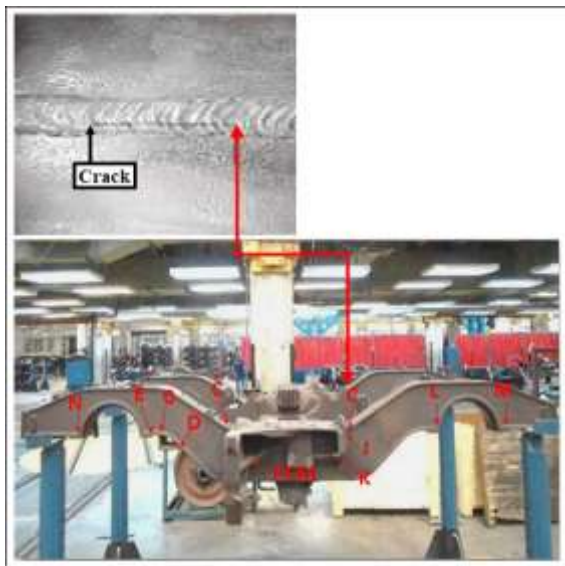
**Keywords:** Preheat; Postheat; Widmanstätten ferrite; free bend.

#### **INTRODUCCIÓN**

Los bogies de los trenes de la C.A. Metro de Caracas son los componentes de la carrocería cuya función es la transmisión de los esfuerzos de tracción-frenado y guiado

desde el vagón hacia los rieles. Están constituidos por un chasis (con dos semichasis) acoplados entre sí, y por traviesas que se encargan de transmitir los esfuerzos horizontales del bogie a la carrocería, mientras que el

chasis recibe los esfuerzos de carga de la caja del bogie y los transmite a los ejes donde van posicionadas las ruedas de los trenes; además de poseer los órganos de suspensión, rodamiento entre otros. El bogie de primera generación tecnológica y de las líneas 2 y 4 está fabricado de acero según la norma francesa AFNOR A36-205 grado A42FP en sus láminas, y de acero fundido según Norma A32-051 grado E2345M en su parte central moldeada [1]. Una vez iniciado su funcionamiento, comenzaron a aparecer fisuras en las uniones soldadas, Zona C (figura 1), y se establecieron exigentes rutinas de mantenimiento para reparar y detener el crecimiento de las fisuras con el fin de extender el tiempo de vida útil y garantizar así la confiabilidad durante el servicio.



**Fig. 1.** Vista lateral del bogie de primera y segunda Generación Tecnológica señalando la Zona C, por tener la mayor incidencia de fisuras.

El daño alcanzó fisuras de hasta 6 mm de profundidad y 30 mm de longitud, superando el valor crítico de 15 mm de longitud, las cuales fueron reparadas bajo lineamientos técnicos por la empresa fabricante, FRAMECA, 1997. Sin embargo, continuaban apareciendo las fisuras, debido a otras causas como velocidad de enfriamiento no controlada, alta entrada de calor, altas temperaturas de tratamiento térmico, pérdidas de calor, etc., por lo que se

procedió a realizar tratamiento térmico de precalentamiento más postcalentamiento para controlar la entrada de calor excesiva en el material durante la soldadura y evitar la aparición de la microestructura acicular, de ferrita Widmanstätten, perjudicial, ya que el enfriamiento rápido aumenta la dureza en el componente produciendo el agrietamiento en servicio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La optimización del proceso de soldadura de reparación estuvo enfocada en la determinación de los Tratamientos Térmicos de Post soldadura efectivos que permitieran obtener una microestructura idónea en la zona afectada por el calor. Para esto, inicialmente se caracterizó el material de fabricación de los bogies mediante análisis por microscopía óptica. Se evaluaron seis (6) muestras según las siguientes condiciones: soldadura sin Tratamiento Térmico, soldadura con Postcalentamiento a 360°C (condición de trabajo), luego revenido en horno a 360°C, a 400°C y 450°C. Las muestras fueron caracterizadas mediante análisis químico, microscopía óptica, microdureza, doblaje libre y ensayo de tracción.

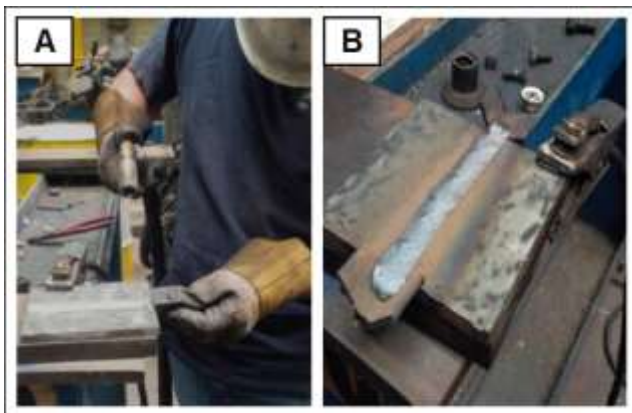
### *Caracterización de la soldadura de reparación de los chasis.*

Se evaluó la Zona C de uno de los chasis del Bogie B-154 de primera generación que se encontraba desincorporado. Para ello se realizó corte transversal a la soldadura de fabricación para evaluar la zona más crítica mediante Microscopía Óptica (MO) de acuerdo a la Norma ASTM E3-11: “Preparación Metalográfica” y la norma ASTM E407-07: “Métodos de Ensayo para Microataque de Metales y Aleaciones”.

### *Preparación de las muestras para la soldadura.*

Una vez evaluada la zona de soldadura se procedió a obtener seis (6) piezas subestándar de 154 mm x 170 mm x 10,12 mm, según Norma AWS D1.1:2004: “Structural Welding Code-Steel” [2] para probetas de ensayo en

láminas o placas soldadas de espesor mayor a 3/8 de pulgadas (10 mm) empleando un disco de corte grueso para metales ferrosos y un disco de lija para corte grueso de 9" de diámetro 64 con esmeril angular de 9" y luego a realizar los cortes de los listones mediante tronadora con disco de 12" de diámetro, para obtener las probetas. Seguidamente, se preparó el bisel de 60° en la zona del cordón y se realizó la soldadura MIG (Metal Inert Gas) según procedimiento empírico de reparación por soldadura del Metro de Caracas, y a obtener la lámina subestándar según Norma AWS D1.1: "Structural Welding Code-Steel" para probetas de ensayo en láminas o placas soldadas de espesor mayor a 3/8 de pulgadas (10 mm) y una vez que las muestras alcanzaron la temperatura ambiente, se retiraron los apéndices de la soldadura mediante esmerilado con la cortadora de disco manual.



**Fig. 2.** A) Fotografía tomada durante la soldadura de reparación con primer pase, B) y con segundo pase.

De acuerdo al Documento de Calificación del Procedimiento de Soldadura PQR C5436 y a la Especificación del Procedimiento de Soldadura WPS R4039 elaborado por la ANF Industrie para las muestras de los chasis de los trenes de la C.A. Metro de Caracas, las muestras fueron elaboradas con dos (2) o tres (3) pases o cordones de soldadura.

Debido a que la máquina de tratamiento térmico del Taller de Bogie de la C.A. Metro de Caracas, donde se realizó el Postcalentamiento, tiene una temperatura máxima de

trabajo de 360°C, fue necesario realizar un Tratamiento Térmico de revenido, con el fin de comparar las propiedades obtenidas en la muestra tratada térmicamente en el taller a 360°C, con las propiedades obtenidas en la muestra revenida en horno a esa misma temperatura, y en función de los resultados alcanzados, determinar la mejor temperatura de Tratamiento Térmico para los chasis de estudio.

#### *Ensayos Mecánicos.*

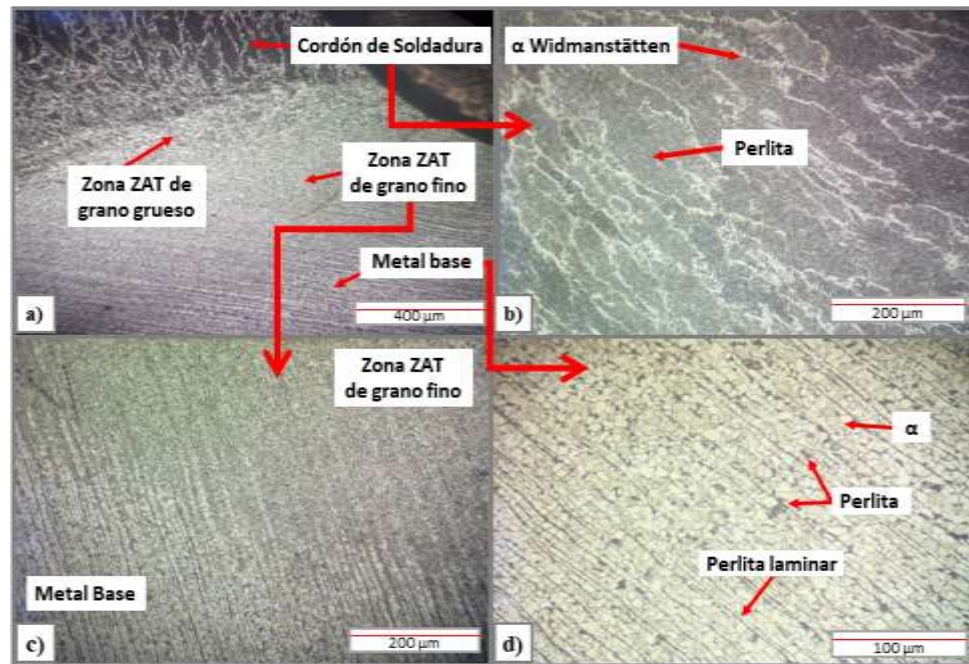
Para determinar el valor de ductilidad de las muestras ensayadas, se realizó el ensayo de Doble Libre, el cual es un método muy similar al empleado, según los requerimientos establecidos en el Código ASME Sección IX [3] para la Prueba de Doble Guiado. Estos métodos se diferencian en que, el doble libre, emplea una prensa mecánica para darle forma de U (bordes paralelos) a las muestras. Mientras que, los criterios de aceptación y rechazo, son los mismos: a) Un ángulo de doblado para las láminas soldadas de 180° es imperativo; b) de aparecer fisuras (laterales a la soldadura o en la zona afectada por el calor) durante dicho ensayo, deberán reportarse aquellas mayores a 3,2 mm de longitud, como motivo de rechazo.

Para llevar a cabo el Ensayo de Tracción, se tomó uno de los listones cortados de cada muestra, para mecanizar un total de seis (6) probetas de tracción, según los requerimientos establecidos en la Norma AWS D1.1/D1.1M:2004: "Structural Welding Code Steel", en donde se establecen las medidas de las probetas requeridas, para realizar el Ensayo de Tracción en láminas soldadas de componentes estructurales. Las probetas fueron las correspondientes a las láminas de espesor nominal:  $t_p < 25$  mm, y cada una presentó dimensiones diferentes correspondientes a la cara de soldadura, ya que dependieron del ancho del cordón. Todas las probetas fueron maquinadas en el torno CNC marca Okuma, del Centro de Mecanizado de la Gerencia de Mantenimiento de Equipos Electromecánicos de la C.A. Metro de Caracas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La optimización del proceso de soldadura de reparación efectiva, consistió inicialmente en la caracterización del material de fabricación de los bogies, mediante el análisis

por Microscopía Óptica (MO), como se muestra en la figura 3. Se evidenció la presencia de ferrita Widmanstätten bordeando la perlita en el cordón de soldadura (figura 3b).



**Fig. 3.** a) Microestructura de las zonas de la soldadura original, zona C del chasis (corte transversal); b) Cordón de soldadura; c) Zona Afectada por el Calor (ZAT) de Grano Fino; d) Metal Base.

Posteriormente, se evaluaron seis (6) muestras según las siguientes condiciones: soldadura sin Tratamiento Térmico, soldadura con Postcalentamiento a 360°C (condición de trabajo); luego, revenido en horno a 360°C, a 400°C y 450°C, para determinar la temperatura de agrietamiento. Se evidenció un cambio microestructural a 400°C [2] (figura 4), donde se observa la microestructura de ferrita Widmanstätten, con los granos de Fe<sub>3</sub>C (cementita) en los límites de grano austeníticos, bordeando a la perlita.

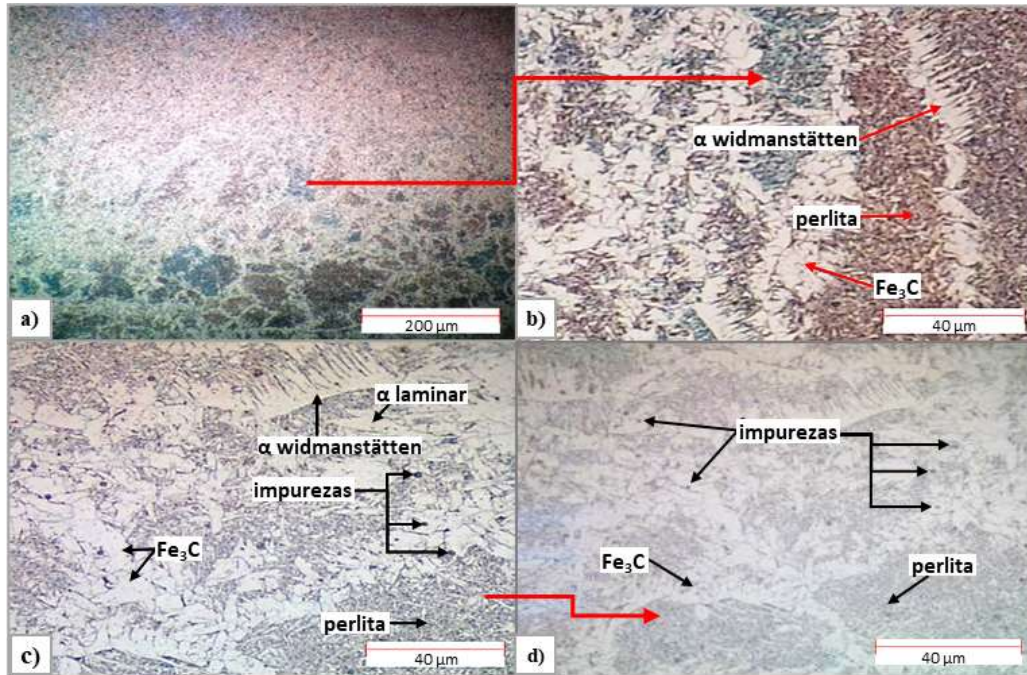
Lo anterior se presenta cuando un acero al carbono es revenido entre 300-400°C, y se trata del fenómeno conocido como “fragilidad azul” [4]. Los aceros con fragilidad azul, como la Fe<sub>3</sub>C (cementita), presentan un elevado contenido de impurezas, que en este caso, pudiesen ser MnS, por el elevado contenido de Mn (figura

3d) reportado, la Fe<sub>3</sub>C aparece bordeando a la perlita, y empuja las impurezas hacia los límites de grano [5].

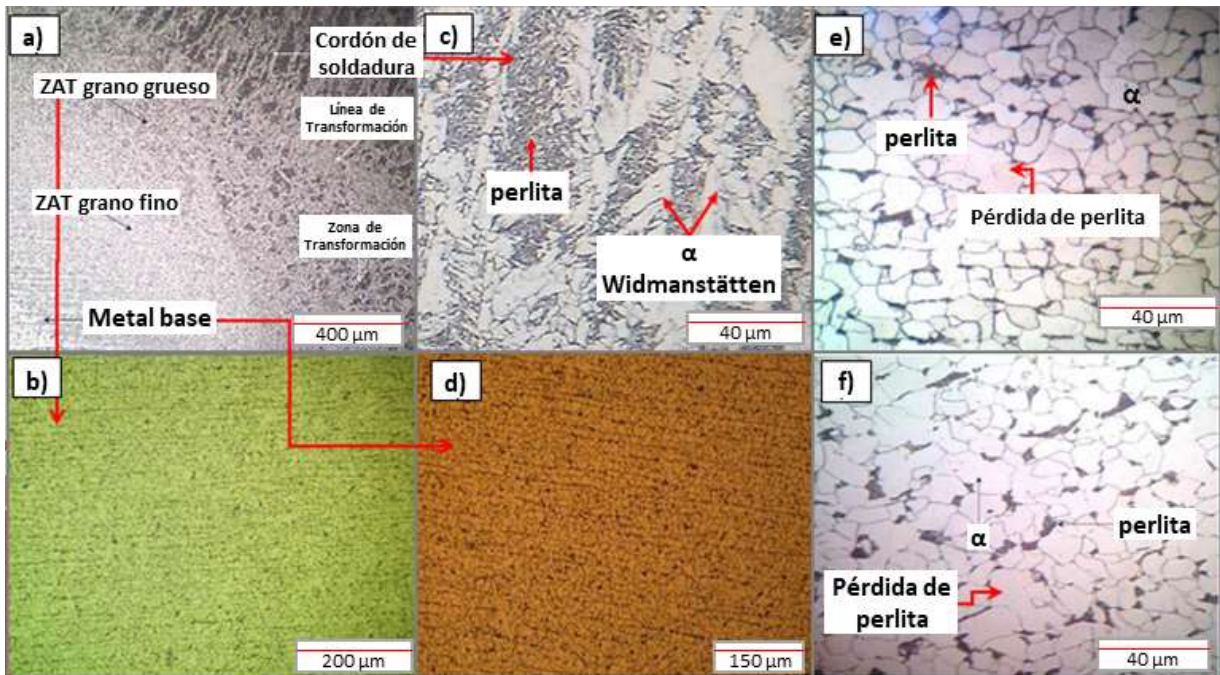
Finalmente, se consideró la condición de trabajo: precalentamiento a 120°C más postcalentamiento a 360°C con tres cordones de soldadura, la cual mostró las mejores propiedades, ya que se obtuvo una microestructura normalizada ferrítico-perlítica, diferente a la obtenida anteriormente, de ferrita acicular Widmanstätten, en la soldadura con postcalentamiento a 360°C (condición de trabajo) (figura 5), y la observada en la soldadura del chasis original. Esta última, presentó las mejores propiedades con una zona ZAT (Zona Afectada Térmicamente) más pequeña y, a mayores aumentos (figura 4b), se observó una franja delgada, indicativa de que, en esta zona de soldadura, el acero muestra estructura con granos equiaxiales, de normalizado [2]. Esto es

debido a que, el Tratamiento Térmico de Pre calentamiento, homogeniza la microestructura antes de colocar los cordones, actuando éstos últimos, como un

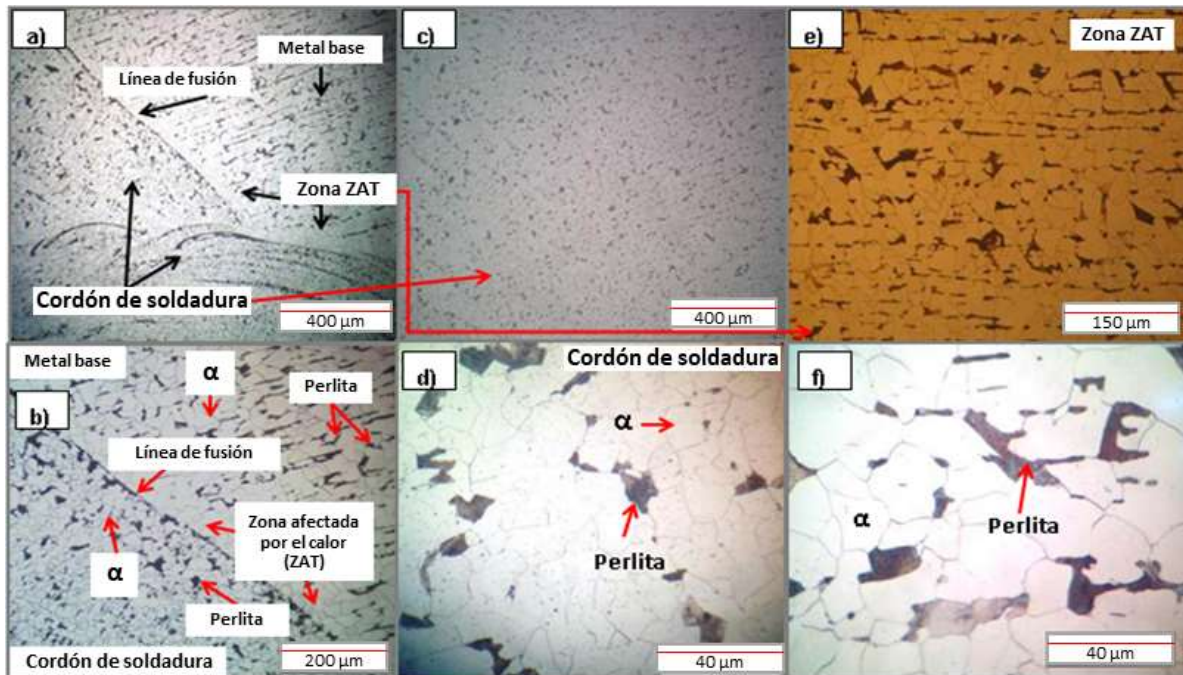
Tratamiento Térmico de normalizado, para dar una microestructura homogénea ferrítico-perlítica.



**Fig. 4.** Cordón de Soldadura de la muestra con Tratamiento Térmico de Revenido en Horno a 400°C: a) Aumento 100X; b) detalle de a) con aumento 500X; c) otro detalle de a) con aumento 100X; y d) detalle de c) con aumento 500X.



**Fig. 5.** Zonas de la soldadura de la muestra con Tratamiento Térmico de Postcalentamiento a 360°C: a) Área de estudio, b) Zona Afectada por el Calor (ZAT) de grano grueso; c) Cordón de soldadura; d) Metal base; e) ZAT de grano grueso; f) Metal Base.



**Fig. 6.** Zonas de la soldadura de la muestra con tratamiento térmico de precalentamiento a 120°C y postcalentamiento a 360°C. a) Aumento de 50X y b) 100X, c) cordón de soldadura con aumento de 50X y d) 500X, e) Zona Afectada por el Calor (ZAT) con aumento de 100X y f) 500X.

**Tabla 1.** Resultados obtenidos en el ensayo de Doble Libre.

Muestras	Ángulo de Doblado	Observaciones	Alargamiento *% = (X-T)/T	Calificación
<b>MUESTRA 1</b> Soldadura de reparación sin T.T.	Lateral	La pieza se fracturó, se abrió completamente por un borde del cordón de soldadura	%A = [(41,8mm-22,64mm)/22,64mm]x100 %A = 84,62	Reprobada
<b>MUESTRA 2</b> T.T. de postcalentamiento a 360 ± 20°C	Lateral	Fractura completa del cordón de soldadura por un borde	%A = [(33,4mm-21,04mm)/21,04mm]x100 %A = 58,74	Reprobada
<b>MUESTRA 3</b> T.T. de revenido en horno a 360 ± 20°C	Lateral	Tres (03) fisuras en los bordes del cordón de soldadura de longitud 9,1 mm; longitud 4,4 mm y longitud 2,8 mm, respectivamente	%A = [(25,4mm-21,93mm)/21,93mm]x100 %A = 15,82	Reprobada
<b>MUESTRA 4</b> T.T. de revenido en horno a 400 ± 20°C	Lateral	Dos (02) fisuras de longitud 5,2 mm; longitud 3,8 mm al borde del cordón de soldadura y una (01) fisura en el medio del cordón de longitud 1,3mm	%A = [(23,2mm-22,14mm)/22,14mm]x100 %A = 4,78	Reprobada
<b>MUESTRA 5</b> T.T. de revenido en horno a 450 ± 20°C	Lateral	Una (01) fisura en el lado cóncavo del cordón de soldadura de longitud 3,5 mm	%A = [(26,9mm-20,1mm)/20,1mm]x100 %A = 33,83	Reprobada
<b>MUESTRA 6</b> T.T. de precalentamiento a 120°C más postcalentamiento a 360°C	Lateral	Una (01) fisura en el lado cóncavo del cordón de soldadura de 2,5 mm de longitud	%A = [(20,3mm-18,8mm)/18,8mm]x100 %A = 7,97	Aprobada

Cálculo de rigidez:  $m = (Y2-Y1)/(X2-X1) = \text{Kg/mm}$

**Tabla 2.** Resultados obtenidos en el Ensayo de Tracción

N° de Probeta	Área (ancho x espesor) mm <sup>2</sup>	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Esfuerzo Máximo		Esfuerzo de fractura (Mpa)	Deformación (%)	Alargamiento (%) [(l <sub>f</sub> -l <sub>o</sub> )/l <sub>o</sub> ] $\times$ 100	Rigidez (Kgf/mm) Pendiente (m)
			Kgf/mm <sup>2</sup>	Mpa				
<b>1</b> T.T. en horno a 400 $\pm$ 20°C	19x10,12= 192,28	307,03	43,68	428,46	255,15	23,56	32,18	2296,47
<b>2</b> Sin Tratamiento Térmico	19x10,4= 197,60	296,34	40,28	395,18	316,79	17,52	18,22	1996,87
<b>3</b> T.T. en horno a 450 $\pm$ 20°C	19x10,19= 193,61	1263,71	38,29	375,58	694,66	17,38	8,55	2152,85
<b>4</b> T.T. en horno a 360 $\pm$ 20°C	19x10,12= 192,28	311,01	12,87	126,27	331,63	12,25	38,23	2554,54
<b>5</b> T.T. de postcalentamiento a 360 $\pm$ 20°C	19x10,3= 195,70	289,94	43,09	422,68	304,43	44,27	42,40	2060,34
<b>6</b> T.T. de precalentamiento a 120°C + postcalentamiento a 360°C	19x10,2= 193,80	311,56	45,87	450,00	323,66	41,94	37,20	1730

La muestra con Tratamiento Térmico de Precalentamiento a 120°C más Postcalentamiento a 360°C fue la única que resultó aprobada según el Código ASME sección IX debido a que solo presentó una fisura en el cordón de soldadura de Longitud <3,2 mm y presentó el menor alargamiento después de la muestra con Tratamiento Térmico de Revenido en Horno a 400°C, de %A=7,97 (tabla 1).

La probeta con el Tratamiento Térmico de Revenido en Horno a 450°C presentó el valor de límite elástico considerablemente más elevado (1263,71 MPa, ver tabla 2) y también el valor de alargamiento (%) más bajo (8,55%, ver tabla 2) para una deformación de 17,38% (tabla 2), debido al fenómeno de fragilidad azul que se presenta en estos aceros que son revenidos a partir de los 300°C, a causa de la presencia de Fe<sub>3</sub>C en los límites de grano que promueve la aparición de MnS. La gráfica que presenta las mejores propiedades en tracción corresponde a la probeta seis (6) con la mejora, la cual tiene el valor más elevado de Resistencia a la Tracción (450 MPa) y uno de los valores más altos de alargamiento (A=37,20%) para una deformación elevada de e=41,94% (tabla 2). La

rigidez disminuye a medida que aumenta la temperatura del T.T., ya que se logran aliviar las tensiones.

## CONCLUSIONES

La lámina soldada con Tratamiento Térmico de Postcalentamiento a 360°C (condición de trabajo en taller), presentó resultados similares a los obtenidos en la lámina soldada, con la mejora en los Ensayos mecánicos de Tracción, pero con el ensayo de doblez libre, fue reprobada la soldadura, y en el análisis microestructural, sus resultados no fueron los esperados, ya que se obtuvo una estructura de ferrita Widmanstätten, que propició variaciones considerables, promoviendo el agrietamiento a este material estructural.

Existe una condición de mejora para la soldadura de reparación de los chasis de los trenes de la C.A. Metro de Caracas, pese a que el mismo tiene su Especificación Técnica para el Procedimiento de Soldadura (PQR N° R4038) elaborado por FRAMECA (1997) que, además, no se cumple a cabalidad. Ésta corresponde a la lámina soldada con Tratamiento Térmico de Precalentamiento a 120°C, más Postcalentamiento a 360°C, con tres cordones

de soldadura, la cual presentó las mejores propiedades en su análisis microestructural, debido a la microestructura de normalizado obtenida, que, a su vez, permitió obtener los mejores resultados en los ensayos mecánicos de Tracción y Doble Libre realizados.

Es necesario realizar el Tratamiento Térmico de Precalentamiento a una Temperatura entre 100-150°C, como lo establece la Empresa fabricante, durante el procedimiento de reparación de los chasis en estudio, para garantizar una microestructura homogénea ferrítico-perlítica obtenida en el normalizado para este acero.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece primeramente a Dios, porque sin él no hubiese sido posible haber hecho realidad este hermoso proyecto.

A los trabajadores, técnicos e ingenieros del Servicio de Bogie y del Laboratorio de Materiales de la C.A. Metro de Caracas, quienes colaboraron en el desarrollo de la presente investigación.

Al MSc Antonio Monsalve y al Técnico de Laboratorio del Centro de Ingeniería de Materiales y Nanotecnología del IVIC, Rafael Tovar.

A los profesores, Kristian Marchena y Miguel Marín; y a tutores, Yorwain Tubiñez y Gladys Navas, del IUT Región Capital, por su colaboración en la culminación de este importante aporte para el sistema de transporte Metro de Caracas.

### REFERENCIAS

- [1] Marcano, N., Márquez, J. (2008) “Curso de Material Rodante: El Bogui”, C.A. Metro de Caracas.
- [2] AWS. (2004) “*DI.1/DI.1M:2004: Structural Welding Code Steel*”, ANSI.
- [3] ASME Boiler & Pressure Vessel Code. (2010) “*Chapter IX: Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators*”, pp. 3.

- [4] Oscar Higuera, C.J., Arroyave, J.F. (2008) “Estudio de la Fragilidad Azul del Acero de Ultra-Alta Resistencia ASSAB Supra 709”. Universidad Tecnológica de Pereira, *Scientia et Technica* Año XIV, No 40.
- [5] Horwitz, H. (1997) “*Soldadura: Aplicaciones y Práctica*”. Boston, E.U.A., Editorial Alfaomega, pp. 1-5.