

Desarrollo de un procedimiento para réplicas metalográficas en campo de rodetes hidráulicos de acero inoxidable CA6NM

Development of a field metallographic replica procedure for CA6NM stainless steel hydraulic runners

John Morales-Galeano ^{1a}, Henry León-Henao ^{1b}, Jorge Giraldo-Barrada ^{2a}, Alejandro Toro-Betancur ^{2b}

¹ Grupo de Tribología y Superficies/Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Orcid: 0000-0001-5175-9357 ^a, 0000-0002-1582-9386 ^b. Correos electrónicos: joemoralessga@unal.edu.co ^a, hleonh@unal.edu.co ^b.

² Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Orcid: 0000-0001-6614-0661 ^a, 0000-0002-5589-5820 ^b. Correos electrónicos: jegirald@unal.edu.co ^a, aotoro@unal.edu.co ^b.

Recibido: 15 junio, 2024. Aceptado: 18 noviembre, 2024. Versión final: 30 enero, 2025.

Resumen

Los rodetes hidráulicos tipo Pelton y Francis, además de otros componentes de turbinas de generación hidroeléctrica, se fabrican usualmente en aceros inoxidables martensíticos blandos, particularmente en el grado CA6NM de la norma ASTM A743, también conocido como 13-4. Estos componentes hidromecánicos se pueden deteriorar en servicio por la aparición de grietas o fracturas, o por desgastes asociados a la cavitación o la erosión. Los defectos se suelen reparar con procesos de soldeo convencionales usando electrodos de composición química, microestructura y propiedades mecánicas similares a las del CA6NM. Las reparaciones con soldadura producen no solo esfuerzos residuales, sino también microestructuras de solidificación y zonas afectadas térmicamente (HAZ) duras con microestructuras martensíticas que hacen que los componentes sean susceptibles al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) o a la fractura frágil en servicio. Por tal motivo, se deben hacer tratamientos térmicos posteriores al soldeo (PWHT) que reduzcan el nivel de los esfuerzos residuales y transformen la martensita fresca de la HAZ en una martensita revenida más blanda y tenaz. El PWHT de rodetes hidráulicos Pelton o Francis es costoso debido a las grandes dimensiones y pesos de estos componentes y a la logística de desmontaje, transporte y, por supuesto, lucro cesante. Cuando las reparaciones con soldadura son menores, los costos del PWHT se hacen inviables. En esos casos, existe la alternativa de hacer PWHTs localizados (no globales) en sitio con equipos apropiados. Sin embargo, siempre surge la duda de cómo verificar la efectividad de un PWHT localizado. Para poder garantizar que estos PWHTs logran, por lo menos, modificar la microestructura del metal fundido y de la HAZ, se pueden hacer mediciones de dureza en sitio y hacer metalografías en campo mediante la técnica no destructiva de réplicas metalográficas. En este trabajo se describe la metodología seguida para validar un procedimiento de obtención y evaluación de réplicas metalográficas en aceros de CA6NM y soldaduras superficiales aplicadas con electrodo EC410NiMo en condiciones *As-welded*, con temple y con temple y revenido. Se compararon las microestructuras obtenidas con métodos convencionales de metalografía en laboratorio para acero AISI 4140 y soldaduras de EC410NiMo con las réplicas para establecer la efectividad de la técnica para aplicaciones de componentes de turbinas de generación hidroeléctrica. El procedimiento planteado por el estudio permite obtener micrografías por réplica en acero CA6NM o en soldaduras similares con EC410NiMo de calidad suficiente para identificar los constituyentes principales.

ISSN en línea: 2145 – 8456, [CC BY-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) 

Como citar: J. Morales-Galeano, H. León-Henao, J. Giraldo-Barrada, A. Toro-Betancur, “Desarrollo de un procedimiento para réplicas metalográficas en campo de rodetes hidráulicos de acero inoxidable CA6NM,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 24, no. 1, pp. 1-10, 2025, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v24n1-2025001>

Palabras clave: CA6NM; réplica metalográfica; microestructura; tratamiento térmico posterior al soldeo (PWHT); rodets hidráulicos.

Abstract

Pelton and Francis hydraulic runners, alongside other components of hydroelectric turbine generators, are typically made in soft martensitic stainless steels, especially grade CA6NM from ASTM A743 standard, also known as 13-4. These hydromechanical components may experience deterioration during service due to the occurrence such as cracks or fractures, as well as wear associated with cavitation or erosion. Commonly, defects are repaired using conventional welding processes employing electrodes with chemical composition, microstructure, and mechanical properties like those of CA6NM. However, these weld repairs not only lead to residual stresses but also to weld deposits and heat-affected zones (HAZ) with martensitic microstructures that make the components susceptible to hydrogen-induced cracking (HIC) or brittle fracture in service. Therefore, it is necessary to carry out post-weld heat treatments (PWHT) to reduce the level of residual stresses and transform the fresh martensite in the HAZ into softer and tougher tempered martensite. PWHT of Pelton or Francis hydraulic runners is costly due to the large dimensions and weights of these components, in addition to the logistical challenges associated with disassembly, transportation, and the consequence loss of revenue. When weld repairs are minor, the costs of PWHT become economically unfeasible. As an alternative, localized PWHTs (not global) can be performed on-site with appropriate equipment. However, doubts persist regarding how to verify the effectiveness of such localized PWHT. To ensure that these localized PWHTs achieve, at least, the improvement of the microstructure of the weld metal and the HAZ, hardness measurements can be carried out on-site and metallography can be performed in the field using the non-destructive technique of metallographic replicas. This work describes the methodology used to validate a procedure for acquiring and evaluating metallographic replicas on CA6NM steels and surfacing welds applied with EC410NiMo electrode under the following conditions: *as-welded*, with quenching, and quenching and tempering. The microstructures obtained with conventional laboratory metallography methods for AISI 4140 steel and EC410NiMo welds were compared with the replicas to establish the effectiveness of the technique for applications in hydroelectric turbine generator components. The procedure proposed by the study allows obtaining replica micrographs on CA6NM steel or similar welds with EC410NiMo of sufficient quality to identify the main constituents.

Keywords: CA6NM; Metallographic replica; Microstructure; Post-weld heat treatment (PWHT); Hydraulic runners.

1. Introducción

Los componentes mecánicos que conforman las unidades de generación hidroeléctrica como rodets tipo Francis, Pelton o Kaplan, álabes fijos, álabes móviles, agujas de inyectoras, liners, entre otros, están sometidos en su servicio a solicitaciones mecánicas y tribológicas que pueden producir agrietamientos, desgastes por cavitación o erosión por contacto con partículas a alta velocidad o, incluso, roturas por interferencias mecánicas. Estas imperfecciones implican la realización de actividades de reparación y/o recuperación dimensional para restaurar la capacidad de operación de un componente ya que sus costos y tiempos resultan ser muy inferiores a los requeridos para adquirirlo completamente nuevo.

Los rodets y otros componentes hidromecánicos se fabrican a partir de fundiciones que cumplen los requisitos establecidos en la norma CCH 70-4 [1]. Si bien la norma CCH 70-4 se aplica a varias aleaciones, los rodets hidráulicos Pelton y Francis se fabrican principalmente en materiales de la familia de aceros inoxidable martensíticos blandos. Durante varias décadas hasta la actualidad, el material más utilizado para

los rodets de hidroeléctricas es el acero inoxidable martensítico con 13% de cromo, 4% de níquel y menos de 0.06% de carbono, conocido como 13-4 o CA6NM, con un tratamiento térmico de temple y revenido (Q&T). Aunque la fundición es el proceso más convencional y preferido, recientemente se están fabricando rodets forjados y, para el caso específico de rodets tipo Pelton, los cangilones se hacen con procesos de manufactura aditiva. Existen muchas normas internacionalmente reconocidas que establecen los requisitos para este material en sus versiones de fundición, dentro de las que se incluyen las siguientes: DIN G-5CrNi13-4, ASTM A743 Grado CA6NM, EN G-X5CrNi13 4, entre otras. El CA6NM se caracteriza por tener buena resistencia a la corrosión, alta resistencia a la tracción y tenacidad a la fractura, y buena soldabilidad [2], [3]. El desarrollo de aceros martensíticos suaves en los años 60 permitió obtener no solo una mejor soldabilidad, sino también una mejor tenacidad porque después del temple del CA6NM (G-5CrNi13-4) y de hacer un revenido alrededor de 600°C, la microestructura es martensita revenida sin ferrita delta y con la presencia de una austenita muy estable y finamente dispersa que le confiere alta resistencia al impacto Charpy [3] y que mejora

significativamente su tenacidad a la fractura de las soldaduras homogéneas [4].

Los rodets deteriorados por agrietamiento o desgaste se suelen reparar con procesos de soldeo convencionales como SMAW (Shielded Metal Arc Welding), GMAW (Gas Metal Arc Welding), FCAW (Flux Cored Arc Welding), PAW (Plasma Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), entre otros, usando temperaturas de precalentamiento relativamente altas y electrodos de bajo hidrógeno [5], [6]. Los materiales de aporte más usados se seleccionan con el criterio de homogeneidad, es decir con composiciones químicas y propiedades mecánicas similares a las del metal base. Se emplean clasificaciones como el E410NiMo en proceso SMAW [7], E410NiMoT1-4 en proceso FCAW [8], ER410NiMo (procesos GMAW, GTAW y PAW) [9] y EC410NiMo para GMAW Metal Cored. En algunas ocasiones, también se utilizan metales de aporte disímiles de aceros inoxidables austeníticos (E308L, E316L) para tratar de reducir la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) [10], [11], pero las soldaduras aplicadas con estos electrodos no igualan las propiedades mecánicas y químicas del CA6NM.

Después de las reparaciones con procesos de soldeo, la zona afectada por el calor (HAZ) queda con propiedades distintas a las del CA6NM, por los cambios en la microestructura debidos a la exposición a las altas temperaturas del arco eléctrico y a gradientes térmicos localizados [12]. La microestructura de la HAZ de un CA6NM suele ser martensita fresca dura y susceptible al agrietamiento inducido por hidrogeno (HIC) y a la fractura frágil. Por tal motivo, se deben hacer tratamientos térmicos de los componentes para evitar fallas debidas la martensita de la HAZ, que se conocen como tratamientos térmicos posteriores a la soldadura (PWHT). El PWHT de piezas masivas como rodets Pelton o Francis, resulta muy costoso ya que requiere de hornos grandes, traslados de componentes de mucho volumen y peso (el rodete de la Central Hidroeléctrica de Ituango, por ejemplo, pesa 65 toneladas), y no siempre es factible ni práctico desmontar el rodete de la turbina, sobre todo si se trata de una reparación menor. Una alternativa para homogenizar las propiedades de la HAZ de reparaciones con soldadura con bajos tiempos y costos es hacer tratamientos térmicos localizados.

Hay varias técnicas para realizar tratamientos térmicos localizados, que pueden utilizar resistencias eléctricas [13] o calentadores por inducción [14], y es común encontrar dispositivos comerciales que se ajusten a los requisitos de tamaño y potencia de cada usuario. La Universidad Nacional de Colombia modeló, diseñó y fabricó un equipo de tratamientos térmicos localizados en

sitio que permite hacer PWHTs en componentes hidromecánicos [15]. La efectividad microestructural y de reducción de dureza de un PWHT localizado requiere que su efecto se valide con ensayos complementarios que se puedan hacer en sitio, tales como la dureza Leeb bajo norma ASTM A956 [16] y la metalografía por réplica bajo norma ASTM E1351 [17].

La réplica metalográfica es un proceso de examen no destructivo que registra y preserva la topografía de una superficie (de una probeta o un componente) preparada metalográficamente como un negativo que se imprime en un filme plástico [17]. El contorno de la superficie de la réplica queda invertido con respecto al de la superficie original [18]. La réplica metalográfica puede ser evaluada posteriormente en un microscopio de luz reflejada (LM) o en un microscopio electrónico de barrido (SEM). El proceso consta de tres etapas básicas: (1) preparación metalográfica de la superficie de prueba, (2) obtención o producción de la réplica, y (3) evaluación de la réplica metalográfica en LM o SEM [17], [19].

Esta técnica se ha empleado en numerosas aplicaciones y materiales como tuberías de calderas [19], detección de grietas en rodillos de enderezado [20], componentes de generadores de vapor [21], análisis de falla de partes de calderas [22], estudios fractográficos en SEM y TEM [23], entre muchos otros. Hay un estudio específico de Vivero y Merchán sobre la aplicación de réplicas metalográficas en distintas regiones de rodets Pelton de acero ASTM A743 grado CA6NM de la central hidroeléctrica de Paute-Molino que describe con detalle el procedimiento de réplicas de metalografía [24]. Las metalografías de este estudio muestran bien las fases microestructurales, aunque presentan algunos problemas de enfoque ya que se hicieron con microscopio portátil en superficies de doble curvatura.

La producción y evaluación de réplicas metalográficas en sitio, no obstante, la disponibilidad de numerosos productos e información técnica (catálogos, guías, artículos), es una actividad que no resulta tan sencilla y que requiere, por tanto, de una experimentación orientada a la obtención de imágenes metalográficas confiables que produzcan niveles de calidad comparables a los métodos de metalografía convencional en laboratorio [25]. El desarrollo del procedimiento para obtener réplicas metalográficas en aceros inoxidables martensíticos blandos, como el CA6NM, resulta ser un poco más complejo por la morfología misma de la martensita fresca y revenida.

El objetivo de este estudio es, por tanto, mostrar el proceso experimental seguido por los autores para desarrollar un procedimiento para la toma de réplicas

metalográficas en rodets Francis de acero CA6NM y en soldaduras homogéneas de 13-4 tendientes a validar la efectividad de un PWHT localizado. Para validar el procedimiento, se compararon los resultados observados en las réplicas metalográficas con las microestructuras obtenidas con el método de preparación convencional en laboratorio.

2. Materiales y métodos

El desarrollo del procedimiento para el proceso de obtención de réplicas metalográficas se hizo en tres etapas experimentales:

- Etapa I: Diseño del procedimiento de réplica metalográfica.
- Etapa II: Verificación del procedimiento con técnica de réplica metalográfica en un acero de microestructura conocida (AISI 4140 templado y revenido).
- Etapa III: Aplicación del procedimiento a soldaduras Bead-on-plate (BOP) aplicadas con electrodo EC410NiMo bajo tres condiciones: en estado soldado (As-welded), con PWHT de temple y con PWHT de temple más revenido.

A continuación, se describen los detalles de materiales y métodos experimentales seguidos para cada etapa.

2.1. Etapa I: Diseño del procedimiento de réplica

El medio utilizado para la obtención de las réplicas metalográficas fue un compuesto fluido de dos partes de baja viscosidad marca MICROSET Grado 202 de color negro. En la **Tabla 1** se resumen las principales especificaciones técnicas del MICROSET 202. Este compuesto fluido tiene una resolución de 0.05 micrones, un tiempo de curado de 7 min @ 25 °C y una vida de trabajo de 2 min @ 25 °C [26]. La **Figura 1** muestra el kit MICROSET 202 que está conformado por: el compuesto o medio de réplica, la pistola dispensadora, las boquillas y el papel de respaldo.

Definir las variables de empleo del kit de réplica MICROSET 202 fue un proceso de ensayo y error hasta encontrar los parámetros para aplicar el compuesto, tiempos de curado, técnica de remoción del filme, preservación del filme impreso, etc. La temperatura ambiente, temperatura de la superficie y la humedad relativa alteran los parámetros para la obtención de la réplica metalográfica y es frecuente que se requieran ajustes. El procedimiento se detalla a continuación.

Tabla 1. Información técnica del MICROSET 202

Características del “Microset Grade 202”	
Resolución	0.05 micrones
Vida útil	24 meses
Dureza después del curado	45 Shore A
Contracción	Menor del 0.1%
Color	Negro
Rango de temperatura de uso	-10 °C hasta +180 °C
Gravedad específica	1.1 g/cm ³
Coefficiente de expansión lineal	80x10 ⁻⁶ /°C
Vida de trabajo (25°C)	2 min
Tiempo de curado (25°C)	7 min

Fuente: elaboración propia a partir de [26].

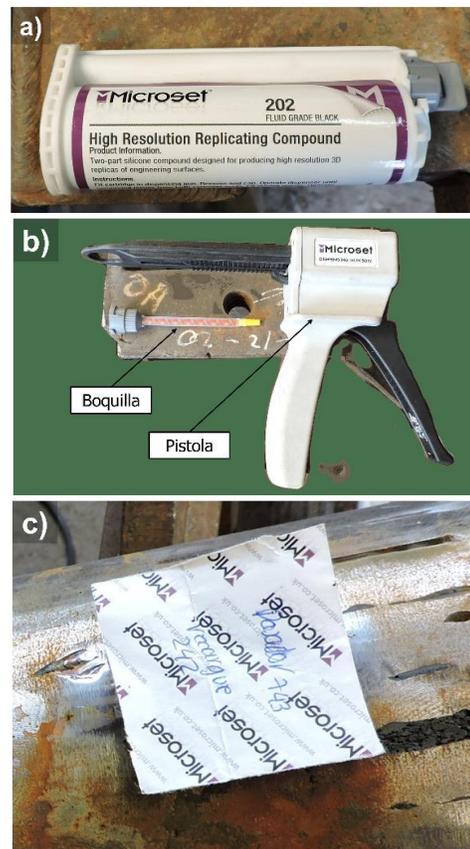


Figura 1. Kit de réplica MICROSET Grado 202: (a) compuesto de replicado, (b) pistola dispensadora y boquilla y (c) papel de respaldo. Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Preparación de la superficie

Para hacer la preparación de las superficies se siguieron los lineamientos de la práctica estándar ASTM E1351 [17] y de la guía estándar ASTM E3 [27]. Inicialmente, la superficie debe estar libre de óxidos, pintura, grasas, y, una vez así, se limpia con alcohol. Luego se pule con una herramienta rotativa y abrasivos de varias granulometrías (hasta #1000 y #2000) como se muestra en la **Figura 2** (a), cambiando el sentido de pulido a 90° como se ilustra en la **Figura 2** (b) para reducir las rayas. La región pulida debe ser más grande y debe ir más allá de la región de réplica como se muestra en la **Figura 2** (c).

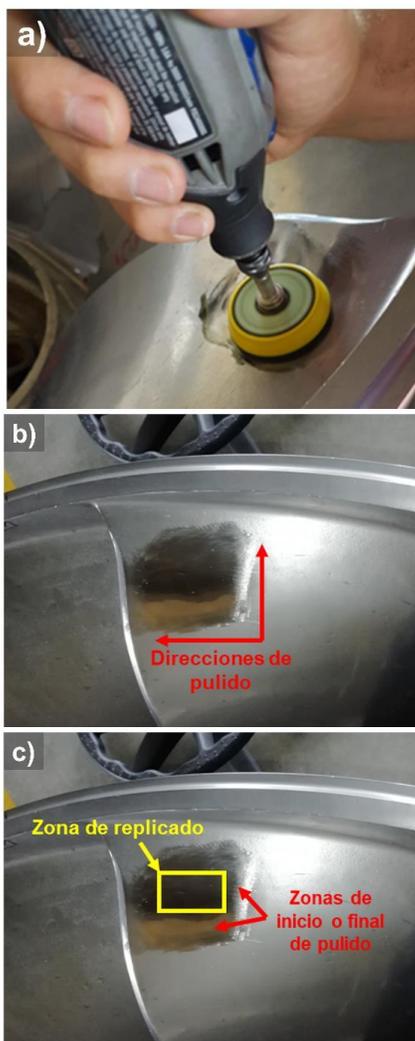


Figura 2. Preparación de la superficie de un álabe de un rodete Francis de CA6NM usando un Mototool: (a) preparación superficial con Mototool, (b) direcciones de pulido a 90° y (c) zonas de pulido y de replicado. Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Ataque químico

Se siguieron las recomendaciones de reactivos indicados en la práctica estándar ASTM E407 [28], así: Nital 2% (100 ml de etanol + 2 ml de HNO₃) para revelar las microestructuras del acero AISI 4140 y Kalling's 1 (2 g de CuCl₂, 40 ml de HCl, 40-80 ml de etanol o metanol y 40 ml de agua) para las soldaduras de EC410NiMo. Las superficies se frotan por unos segundos hasta un minuto.

2.1.3. Aplicación y remoción de la resina

La vida útil y el tiempo de curado del medio de réplica varían con la temperatura. Para una temperatura de 25 °C el tiempo de curado indicado por el fabricante es de 7 minutos [26]. Temperaturas más altas que 25 °C reducen la vida útil y el tiempo de curado, mientras que las temperaturas más bajas aumentan la vida útil y el tiempo de curado. La **Figura 3** muestra aplicación de la resina y la remoción de la réplica metalográfica.

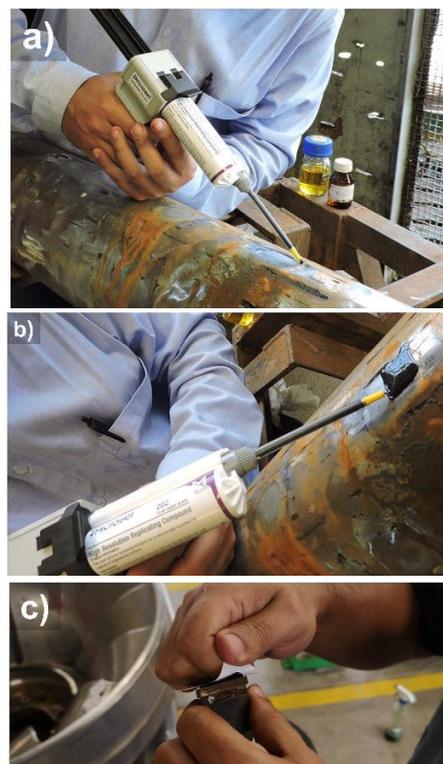


Figura 3. Aplicación de la resina y remoción de la réplica: (a) aplicación del medio de replicado, (b) medio de replicado aplicado y (c) remoción del filme curado. Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Evaluación metalográfica

La evaluación metalográfica de las réplicas se realizó en un microscopio óptico de luz reflejada NIKON Eclipse en el que se tomaron las imágenes a diversos aumentos (50X y 100X).

2.2. Etapa II: Verificación en AISI 4140

Como patrón de referencia, se utilizó la microestructura de un acero AISI 4140 templado y revenido de marca Böhler V320 Q&T. De acuerdo con el certificado de calidad de Böhler (MTR 0011ET0318) la composición química del V320 es: 0.40 % C, 1.02 % Cr, 0.21 % Mo, 0.910 % Mn, 0.26 % Si, 0.015 %P y 0.012 % S. Se cortaron muestras en la sección transversal mediante el uso de disco abrasivo refrigerado con agua, para posteriormente hacer la preparación metalográfica de acuerdo con la norma ASTM E3 [27]. Las superficies se pulieron manualmente con papel abrasivo desde un grano #240 hasta un grano #2000, finalizando con alúmina de 12.5 μm y con partículas diamante de 1 μm . Finalmente, se atacó la superficie con Nital 2% durante 2 segundos, siguiendo la norma ASTM E407 [28].

2.3. Etapa III: Validación en soldaduras aplicadas con EC410NiMo

aplicaron soldaduras con proceso GMAW usando un electrodo Böhler CN 13/4 MC que es equivalente a la clasificación EC410NiMo de la norma AWS A5.22 [8] y que tiene la siguiente composición química típica: ≤ 0.025 % C, 12 % Cr, 4.6 % Ni, 0.60 % Mo, 0.9 % Mn y 0.7 % Si [29]. El material base utilizado fue un acero inoxidable martensítico bajo la norma ASTM A240 Tipo 431 [30] con la siguiente composición química obtenida por espectrometría de emisión óptica (OES): 0.11 % C, 18.3 % Cr, 1.9 % Ni, 0.13 % Mo, 0.69 % Mn, 0.64 % Si, 0.010 %P y 0.012 % S. Los cordones de soldadura se aplicaron con mezcla de gas 98%Ar-2%O₂, una velocidad de alimentación de 300 pg/min y 30 V para obtener un modo de transferencia por aspersion. La temperatura de precalentamiento fue de 120°C y se realizó el PWHT de temple en horno y un revenido a 600°C (Q&T) que es la temperatura óptima en la que se alcanza la mayor tenacidad a la fractura del CA6NM [3] y que está en el rango recomendado por la norma ASTM A743 [31]. Se extrajeron tres probetas mediante corte con disco abrasivo refrigerado con agua para hacer la evaluación metalográfica en condiciones as-welded, después del temple y después del Q&T.

Tanto para el acero AISI 4140 como para las soldaduras de EC410NiMo, se realizó un examen metalográfico convencional en laboratorio para compararlo con las

micrografías obtenidas con la técnica de réplicas. La comparación de las micrografías permitió validar la efectividad de la metalografía por réplica.

3. Resultados y análisis

3.1. Microestructuras del acero AISI 4140

La Figura 4 muestra las micrografías del acero AISI 4140 templado y revenido tomadas a 100X con la técnica convencional en laboratorio (Figura 4(a)) y la réplica metalográfica (Figura 4(b)). Puede notarse la gran similitud de las dos microestructuras constituidas por martensita (M) e islas de ferrita (F). No obstante, aunque la micrografía de la réplica es un poco más clara, la imagen permite que los constituyentes microestructurales (martensita revenida con algo de ferrita) sean claramente identificables.

A partir de estos resultados se estableció que el procedimiento de obtención y evaluación de réplicas metalográficas resulta adecuado para identificar microestructuras martensíticas, por lo que se podría aplicar a la inspección in situ de aceros CA6NM o a soldaduras de EC410NiMo.

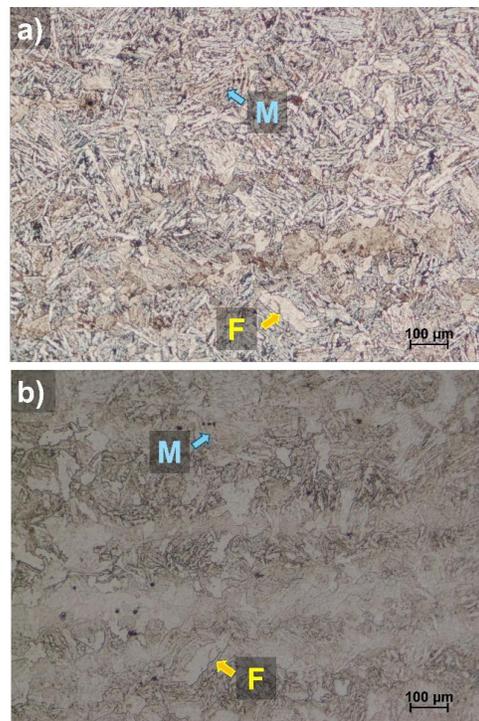


Figura 4. Micrografías del AISI 4140 a 100X: (a) con técnica convencional y (b) con réplica metalográfica.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Soldaduras BOP con EC410NiMo

La **Figura 5** muestra una fotografía con una de las secciones transversales de los depósitos de soldadura BOP aplicados con el electrodo EC410NiMo y la réplica metalográfica correspondiente que se imprimió. Resulta evidente que la imagen impresa en la réplica está invertida en relación con la superficie de la soldadura de prueba.

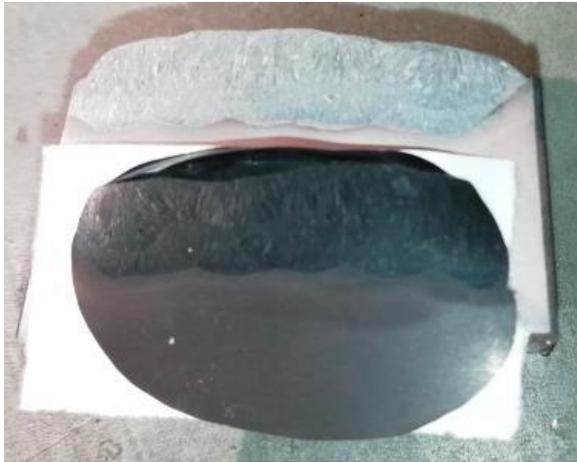


Figura 5. Soldadura con EC410NiMo y réplica metalográfica. Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Soldadura en condición de As-welded

La **Figura 6** muestra las micrografías de los metales fundidos de las soldaduras BOP en condición As-welded tomadas a 50X con la técnica convencional en laboratorio (**Figura 6(a)**) y la réplica metalográfica (**Figura 6(b)**). Para este caso, las micrografías se tomaron en el mismo lugar para mejorar el proceso de comparación. Es notable la gran similitud de las dos microestructuras constituidas por martensita fresca asociada con la alta templeabilidad del acero 13-4.

Nuevamente la imagen de la réplica es una imagen especular de la superficie real de la soldadura observada en el microscopio. Los autores no consideraron necesario reportar las demás macrografías tomadas a mayores aumentos ya que la resolución de las imágenes a 50X es bastante satisfactoria.

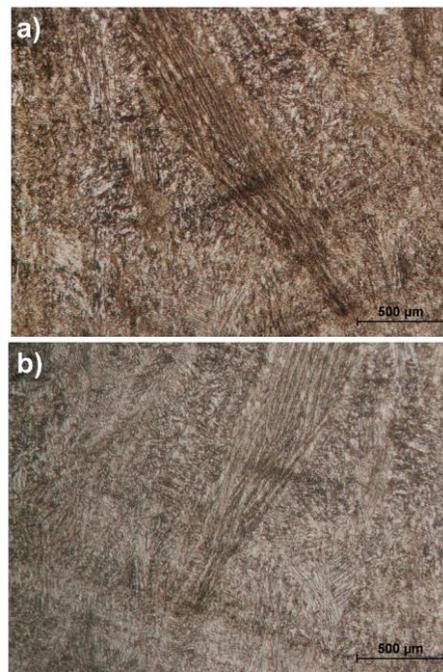


Figura 6. Micrografías del metal fundido de soldaduras con EC410NiMo a 50X en condición As-welded: (a) técnica convencional y (b) con réplica metalográfica.

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Soldadura en condición de temple

La **Figura 7** muestra las micrografías de los metales fundidos de las soldaduras BOP en condición de temple tomadas a 100X con la técnica convencional en laboratorio (**Figura 7(a)**) y la réplica metalográfica (**Figura 7(b)**). Ambas micrografías dejan ver que la martensita fresca difiere de la mostrada en la **Figura 6** (As-welded) ya que el proceso de temple a temperaturas de austenización superiores a la temperatura de recristalización regenera los granos de austenita a partir de la cual se produce la nueva morfología de martensita durante el enfriamiento en el medio de temple.

3.2.3. Soldadura en condición de Q&T

La **Figura 8** muestra las micrografías de los metales fundidos de las soldaduras BOP en condición de Q&T tomadas a 100X con la técnica convencional en laboratorio (**Figura 8(a)**) y la réplica metalográfica (**Figura 8(b)**). En ambas micrografías es posible ver la similitud en las microestructuras compuestas por martensita revenida.

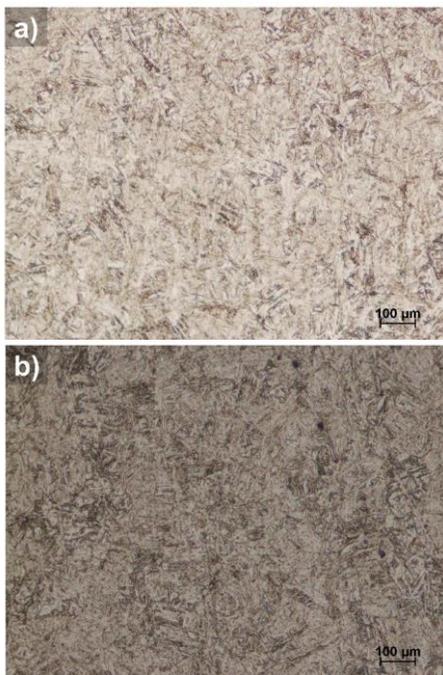


Figura 7. Micrografías del metal fundido de soldaduras con EC410NiMo a 100X en condición de temple: (a) técnica convencional y (b) con réplica metalográfica. Fuente: elaboración propia.

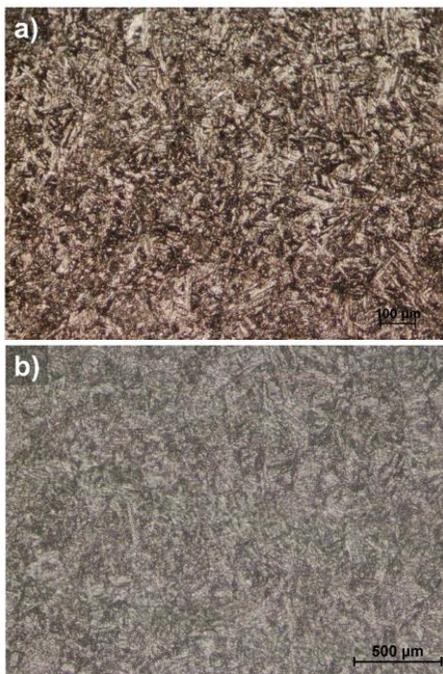


Figura 8. Micrografías del metal fundido de soldaduras con EC410NiMo a 100X en condición de Q&T: (a) técnica convencional y (b) con réplica metalográfica. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

De las comparaciones entre las microestructuras analizadas en micrografías obtenidas por metalografía convencional en laboratorio y aquellas impresas en réplicas metalográficas, tanto en el acero AISI 4140 Q&T (Böhler V320 Q&T) como las de soldaduras BOP con electrodo EC410NiMo (Böhler CN 13/4 MC), permiten concluir que la técnica de réplicas y el procedimiento desarrollado permiten obtener resultados confiables. Con dicho procedimiento es posible validar la efectividad de PWHTs localizados en sitio de reparaciones con soldadura en componentes hidráulicos de acero CA6NM con electrodos similares u homogéneos.

Los autores recomiendan que para desarrollar los procedimientos específicos de obtención y evaluación de réplicas metalográficas, se tengan en consideración los materiales y microestructuras de los componentes y, en lo posible, realizar una comparación experimental entre las micrografías obtenidas por técnicas convencionales en laboratorio con las obtenidas por la técnica de réplicas metalográficas, con el fin de validar la calidad de las imágenes y garantizar la correcta identificación de los constituyentes microestructurales.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas y, especialmente, a la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Minas, al Grupo de Soldadura y al Grupo de Tribología y Superficies de dicho campus por su apoyo, financiamiento e infraestructura, que hicieron posible este estudio.

Financiación

El proyecto fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Contribución de los autores

J. Morales-Galeano: Conceptualización, Investigación, Metodología, Escritura – borrador original, redacción: revisión y edición. H León-Henao: Conceptualización, Investigación, Metodología, Escritura – borrador original, redacción: revisión y edición. J. Giraldo-Barrada: Conceptualización, Investigación, Escritura – borrador original, Escritura - revisión y edición. A. Toro-Betancur: Conceptualización, Adquisición de financiación, Administración de proyectos, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del artículo.

Conflicto de interés

Declaramos que no existe ningún conflicto de intereses en relación con este artículo. Los autores no tienen intereses financieros, personales, ni profesionales que puedan influir en los resultados o en la interpretación de los hallazgos encontrados.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

[1] CCH, *Specification for Inspection of Steel Castings for Hydraulic Machines*. Wien: Cahier des Charges, 2014.

[2] J. Crawford, *CA6NM - An update*. Connecticut: Climax Molybdenum Company, 1974.

[3] H.-J. Niederau, "State of Development of Soft Martensitic Stainless Chromium-Nickel Steels", *119th General Session of the Material Committee of VDEh, Düsseldorf, Germany*, pp. 129-135, 1977.

[4] W. P. Casas, S. Henke y N. Novickic, "Fracture toughness of CA6NM alloy, quenched and tempered, and of its welded joint without PWHT," *Welding International*, vol. 23, n° 3, p. 166-172, 2009, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802543344>

[5] E. Folkhard, *Welding Metallurgy of Stainless Steels*, New York: Springer-Verlag Wien New York, 1988, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8965-8>

[6] United States Department of the Interior - Bureau of Reclamation, *Turbine Repair*. Denver, 2000.

[7] American Welding Society, "Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding", AWS A5.4/A5.4M, 2012.

[8] American Welding Society, "Specification for stainless steel flux cored and metal cored welding electrodes and rods", AWS A5.22/A5.22M, 2012.

[9] American Welding Society, "Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods", AWS A5.9/A5.9M, 2022.

[10] Lippold & Kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless Steel*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

[11] J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

[12] S. Kou, *Welding Metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

[13] D. Ferreiro, J. Alvarez, E. Ruíz, D. Mendez y L. Rodríguez, "Failure analysis of a Pelton turbine manufactured in soft martensitic stainless steel casting," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, n° 1, pp. 256-270, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.09.005>

[14] G. Nath y S. Kumar, "Slurry erosion behaviour of pack boronized 13-4 martensitic stainless steel for hydro turbine blades," *Materials Today Proceedings*, vol. 5, n° 9, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.151>

[15] E. Foronda, N. Ramírez, J. A. Arboleda, A. Toro y J. Giraldo-Barrada, "Finite element analysis of the localized post-weld heat treatment of a Pelton runner," *Materials Today Communications*, vol. 36, pp. 1-9, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4440913>

[16] ASTM, "Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products", West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

[17] ASTM, "Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas", ASTM E1351-01(Reapproved 2020), West Conshohocken, PA, 2020.

[18] ASTM, "Standard Terminology Relating to Metallography", ASTM E7-22 West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

[19] M. L. Jenssen, A. H. Aedo, "Réplicas metalográficas como ensayo no destructivo usadas para la evaluación metalúrgica del material de tubos de caldera," *IV Conferencia Panamericana de END*, Buenos Aires.

- [20] D. Zuljan, J. Grum, “Non-destructive metallographic analysis of surfaces and microstructures by means of replicas,” *The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing - Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*, Portorož, Slovenia, 2005.
- [21] E. Vedovatti, K. Pagola, “Réplica metalográfica como herramienta para la detección temprana e identificación de mecanismos de daños metalúrgicos,” *5th Pan American Conference for NDT*, Cancún, Mexico, 2011.
- [22] V. K. Bafna, P. U. Haribhakti, “In-situ metallography for the plant health assessment study and failure investigation,” *4th Middle East NDT Conference and Exhibition, Kingdom of Bahrain*, Dec 2007.
- [23] S. Lynch, “Metallographic and fractographic techniques for characterising and understanding hydrogen-assisted cracking of metals,” *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, 2012.
- [24] C. D. Vivero, H. A. Merchan, “Análisis de la microestructura en los rodets Pelton de la Central Hidroeléctrica Paute-Molino mediante réplicas metalográficas In-Situ,” trabajo de grado, Universidad Salesiana, Ecuador, 2019.
- [25] S. Jana, “Non-destructive in-situ replication metallography,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 49, pp. 85-114, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01314-Q](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01314-Q)
- [26] Microset Products Ltd, “MICROSET Grade 202,” Hinckley, 2019.
- [27] ASTM, “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, ASTM E3-11West, Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- [28] ASTM, “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”, ASTM E407-07 (Reap. 2015) West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [29] Böhler Welding Voestalpine, “Böhler CN 13/4 MC” Technical Sheet, 2020.
- [30] ASTM, “Standard Specification for Chromium and Chromium Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications”, ASTM A 240/A240M -19, West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- [31] ASTM, “Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application”, ASTM A743/A743M-21 West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.