

Alternativas de replicación metalográfica no convencional: Un estudio comparativo

Nilthon Zavaleta-Gutierrez, Dr¹, Federico B. Briceño-Roldan Ms², Elmer R. Polo-Briceño Ms³, Joel J. Sandoval-Ochoa Ing⁴, Norberto Ñique-Gutierrez Dr⁵

^{1,2}Dpto de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, nzavaleta@unitru.edu.pe, fbricenro@unitru.edu.pe

^{3,4,5}Dpto de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, polobriceno22@gmail.com, joelingmatunt@gmail.com, nnique@unitru.edu.pe

Resumen— En componentes industriales sometidos a elevadas temperaturas, resulta crucial evaluar los cambios microestructurales ocurridos durante su tiempo de servicio para predecir la vida útil remanente sin alterar su condición operativa. En este contexto, la técnica no destructiva de replicación metalográfica constituye una excelente alternativa para su caracterización. El objetivo de esta investigación fue comparar tres métodos para obtener réplicas metalográficas que permitan observar los detalles microestructurales típicos en aleaciones ferrosas. Para tal fin, se seleccionaron materiales replicantes comerciales de acetato de etilo en soporte de aluminio reflectante (marca Transcopy), réplicas con caucho siliconado (marca RepliSet) y película fotográfica de acetato de etilo de rollo velado ASA 200 de bajo costo. La replicación metalográfica se aplicó en aleaciones ferrosas preparadas superficialmente mediante desbaste, pulido y ataque químico y electrolítico. Los detalles microestructurales en cada espécimen y sus respectivas réplicas fueron evaluados mediante microscopía óptica. Los resultados indican que las réplicas metalográficas permiten revelar la mayoría de los detalles microestructurales obtenidos con la inspección metalográfica convencional (destructiva). Las réplicas elaboradas con película fotográfica de acetato de etilo de rollo velado ASA 200 presentan una excelente resolución para visualizar detalles microestructurales, con aumentos ópticos de hasta 1000X en las muestras estudiadas; resultados similares se obtuvieron con las réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio reflectante y con caucho siliconado. Sin embargo, las réplicas con caucho siliconado presentan limitaciones para revelar detalles en microestructuras finas. Para asegurar la repetibilidad de los resultados, es esencial una adecuada preparación superficial de la muestra, siendo la selección del tipo y tiempo de ataque químico un parámetro crítico a considerar.

Palabras clave— Replicación metalográfica, Microestructura, Métodos no destructivos, Aleaciones ferrosas,

I. INTRODUCCIÓN

Diversas industrias del sector metalmecánico han empleado con éxito la técnica metalográfica conocida como replicación in situ para evaluar el estado microestructural de componentes en servicio, especialmente durante tareas de mantenimiento en industrias petroquímicas, químicas y centrales térmicas. La alteración de la microestructura afecta directamente las propiedades mecánicas y, por ende, la vida útil de los componentes. Este método no destructivo permite evaluar el componente sin necesidad de seccionarlo. El procedimiento consiste en la preparación metalográfica del área de interés para generar contraste microestructural, replicar la superficie y examinar la réplica mediante microscopía óptica, como se ilustra en la Figura 1.

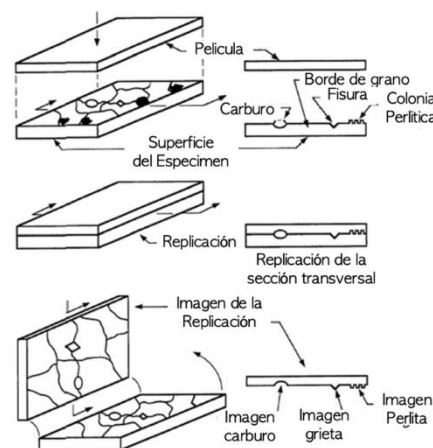


Fig. 1. El proceso de replicación [1].

El proceso de replicación comprende: (1ro) desbaste grueso para remover pintura, corrosión, deformaciones y daños superficiales; (2do) desbaste fino con papeles abrasivos para eliminar rayaduras profundas y material deformado; (3ro) pulido mecánico o electrolítico para obtener una superficie adecuada para el ataque químico; (4to) ataque químico para revelar características microestructurales mediante el relieve superficial; (5to) replicación, que puede realizarse presionando una lámina impregnada con disolvente o aplicando caucho líquido; y (6to) montaje de la réplica en un portaobjetos para su observación, preservando el relieve como imagen negativa. Este método proporciona información comparable a la obtenida mediante metalografía convencional destructiva [2], [3].

La técnica de replicación, propuesta por Haycraft en 1891 [4], ha sido utilizada ampliamente en microscopía óptica (MO) [5], microscopía electrónica de transmisión (TEM) [6] y microscopía electrónica de barrido (SEM) [7], siendo la MO suficiente para muchas aplicaciones. Se emplea para determinar fases presentes y sus proporciones [8], examinar características como tamaño y límites de grano, distribución de carburos, grafito y perlita laminar [1], así como para documentar procesos de degradación a altas temperaturas, tales como cavitación por creep, esferoidización y precipitación de partículas de segunda fase [9]. Asimismo, permite localizar, caracterizar y analizar el origen de fisuras (por fatiga, corrosión bajo tensión, intergranular, entre otras) [10]–[12], y monitorear la evolución de defectos como grietas o cavidades por creep [7]. Las réplicas han sido obtenidas en condiciones extremas, incluso a temperaturas de hasta 150 °C [13] y bajo agua utilizando cauchos siliconados [1], demostrando su versatilidad para describir diversas microestructuras y condiciones de servicio [14], [15].

En el análisis de daño por creep, se evalúan las zonas más susceptibles, como la zona afectada por el calor de grano grueso (ZACGG) y regiones previamente falladas. Réplicas de estas áreas ayudan a identificar acumulación y severidad del daño. Las etapas iniciales pueden requerir solo seguimiento, mientras que las etapas avanzadas implican reemplazo inmediato. La replicación también permite distinguir patrones de propagación de fisuras, fundamentales para decidir el tipo de reparación [16], [17]. Se ha aplicado con éxito en componentes aeroespaciales [3], turbinas nucleares [18] y generadores de anillos de seguridad en plantas eléctricas [17]. Entre los cambios microestructurales comunes en aceros al carbono destacan: [1] la esferoidización de perlita en aceros ferrítico-perlíticos a altas temperaturas y [2] la precipitación de carburos de cromo ($M_{23}C_6$, sensibilización) en aceros inoxidable calentados entre 450 °C y 800 °C. El grado de esferoidización de la perlita se correlaciona con la vida remanente por creep del componente [14], basándose en datos de ensayos acelerados y experiencia en servicio.

El procedimiento incluye un pulido mecánico o electrolítico, siendo este último ideal para superficies libres de deformación; un ataque metalográfico, etapa clave que determina la calidad de la información replicada, dependiendo de mecanismos como el ataque diferencial entre granos y la disolución preferencial en límites de grano debido a diferencias de potencial electroquímico [19], [20]; y la replicación, realizada con materiales como cintas de acetato de celulosa ablandadas con solventes (acetona, acetato de etilo o metílico), que requiere control cuidadoso de presión y metalizado previo al análisis [21], [22]. Kits comerciales, como los de Struers (Transcopy y RepliSet), utilizan soporte reflectante para evitar el recubrimiento adicional y simplificar el procedimiento [23], [24].

Finalmente, para evaluar la vida útil de componentes industriales, es fundamental validar la precisión y repetibilidad de las réplicas obtenidas. En este trabajo se comparan réplicas microestructurales obtenidas en aleaciones ferrosas usando materiales comerciales (Struers Transcopy y RepliSet), así como película fotográfica velada en acetato de etilo, con fines comparativos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Se utilizaron los siguientes especímenes de prueba: (1ro) acero ASTM A335 grado P91 soldado, (2do) acero ASTM A335 grado P91 sometido a creep, (3ro) acero AISI 304 soldado, (4to) acero SAE 1080 esferoidizado con presencia de fisura, (5to) acero SAE 1020 carburizado, (6to) acero ASTM A36, (7vo) fundición gris perlítica y (8vo) fundición blanca. Las réplicas metalográficas fueron obtenidas utilizando tres tipos de materiales: acetato de etilo en soporte de aluminio reflectante (marca Transcopy), caucho siliconado (marca RepliSet) y película fotográfica velada ASA 200 (acetato de etilo).

Cada espécimen fue preparado mediante:

- Desbaste con papel abrasivo de carburo de silicio.

- Pulido mecánico con alúmina (de 5 a 1 μm), lubricada con agua bidestilada, para fundiciones y para la evaluación de cavidades en el acero ASTM A335-P91 sometido a creep y fisuras en el acero SAE 1080 esferoidizado. Los aceros ASTM A335-P91 soldado, AISI 304 soldado, SAE 1020 cementado y ASTM A36 fueron sometidos a pulido electrolítico mediante el método Tampón. La solución electrolítica consistió en 10 mL de ácido perclórico y 90 mL de Butil cellosolve. El tampón (punta semiesférica de acero inoxidable) se recubrió con una capa absorbente formada por esponja y pana. La muestra se conectó al ánodo y el tampón al cátodo, aplicando una tensión de 30 V. El tampón se humedeció en la solución y se mantuvo en contacto con la superficie durante 120 segundos. Este procedimiento se basó en la norma ASTM E1558 [25].

- El ataque metalográfico se realizó conforme a la norma ASTM E407 [26]. La Tabla I resume los reactivos y condiciones de ataque empleados. El ataque electrolítico permitió revelar microestructuras en aleaciones resistentes al calor (P91) y a la corrosión (AISI 304).

TABLA I
ATAQUES METALGRÁFICOS UTILIZADOS PARA REVELAR LA
MICROESTRUCTURA EN LAS ALEACIONES EVALUADAS

Reactivo	Tipo de ataque y composición del reactivo	Aleación
Nital	2 ml de HNO_3 y 98 ml de alcohol etílico	Acero A36 Acero 1020 carburizado Acero 1080 esferoidizado Fundición gris perlítica Fundición blanca
Villela	5 ml de HCl, 1 g de ácido pícrico y 100 ml de alcohol etílico	Acero A335 T91 sometido a creep
Oxálico	Ataque electrolítico (6V) 10 g de ácido oxálico, 100 ml de agua destilada	Acero A335 P91 soldado Acero 304 soldado

B. Replicación con acetato de etilo en soporte de aluminio (Transcopy)

Se aplicaron dos gotas de Transcopy con jeringa sobre la superficie preparada, distribuyéndolas uniformemente durante 15 s (Fig. 2(a)). Posteriormente, se colocó la lámina de acetato de celulosa con soporte de aluminio, evitando hidratar el autoadhesivo posterior. La lámina se presionó con el pulgar durante 60 s (Fig. 2(b)). Después de 4 minutos, se retiró cuidadosamente (Fig. 2(c)), se eliminó el adhesivo posterior y se fijó la lámina al portaobjetos (Fig. 2(d)), para su observación en el microscopio óptico (Fig. 2(e)). El soporte de aluminio actúa como reflector; sin embargo, durante la remoción o el despegue del adhesivo pueden producirse deformaciones que introduzcan artefactos microestructurales, afectando la veracidad de la réplica. Se replicó un área aproximada de 4 cm² con esta técnica.

C. Replicación con caucho siliconado (RepliSet)

La replicación con caucho siliconado se realizó conforme a la norma ASTM E1351 [27]. Para ello, la superficie debía presentar un leve sobre ataque previo. Se fijó un papel a una laminilla de vidrio utilizando cinta doble faz (Fig. 3(a)) y se preparó la pistola dispensadora con el cartucho, el cual contiene el polímero y el agente de curado, que se mezclan

automáticamente en la boquilla estática. Posteriormente, se aplicó el polímero sobre la superficie a replicar (Fig. 3(b)) y, de inmediato, se presionó con la lámina de vidrio preparada durante 60 s para copiar fielmente el relieve microestructural. Después de un tiempo de curado aproximado de 5 minutos (Fig. 8(c)), se retiró cuidadosamente la lámina de vidrio con la réplica (Fig. 3(d)), la cual se analizó posteriormente mediante microscopía óptica [24].

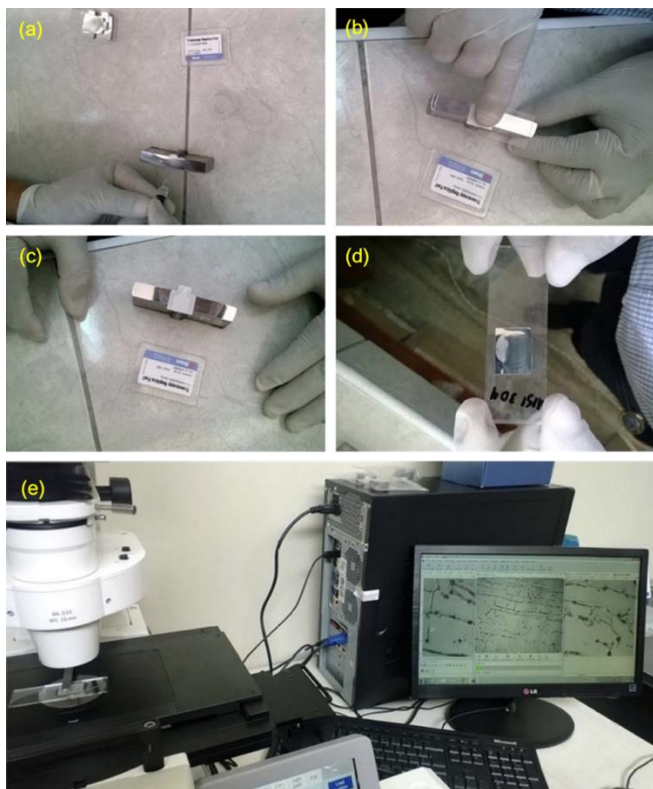


Fig. 2. Procedimiento para la obtención de réplicas con acetato de etilo en soporte de aluminio reflectante

D. Replicación con película fotográfica velada

La preparación de las réplicas con película fotográfica velada consistió en cortar láminas de 15×15 mm desde el rollo fotográfico y pegar cinta adhesiva doble faz en el lado opaco de la lámina (Fig. 4(a)). A continuación, se aplicó acetato de etilo con una jeringa sobre la superficie previamente preparada (Fig. 4(b)) y se dejó humedecer durante aproximadamente 12 segundos. Seguidamente, se colocó el lado brillante de la lámina fotográfica sobre la superficie mojada y se presionó durante 2 minutos para asegurar la adherencia y la formación adecuada de la réplica (Fig. 4(c)). Una vez seco, se desprendió la réplica con un leve golpe y se fijó, mediante la cinta adhesiva, en una superficie lisa, opaca y rígida (vidrio), con el fin de facilitar su análisis y protegerla durante el transporte y almacenamiento (Fig. 4(d)). Finalmente, las réplicas fueron analizadas mediante microscopía óptica y documentadas fotográficamente para su posterior análisis comparativo (Fig. 4(e)).

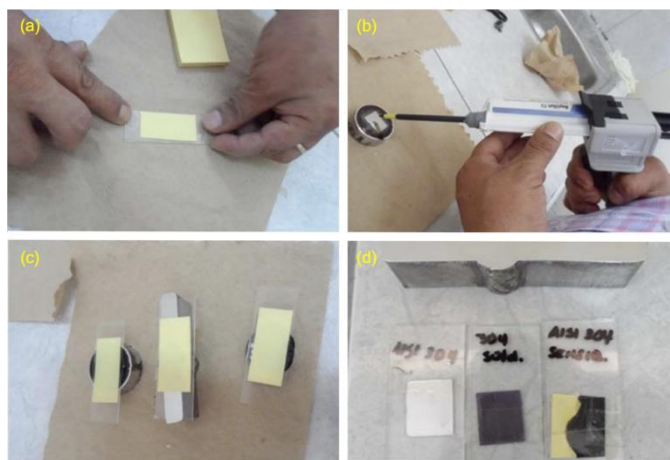


Fig. 3. Procedimiento para la obtención de réplicas con caucho siliconado Repliset

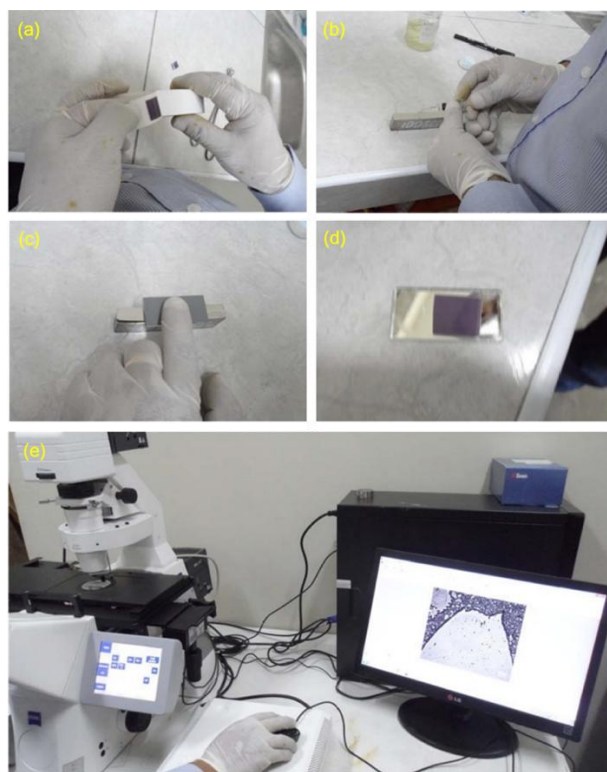


Fig. 4. Procedimiento para la obtención de réplicas con acetato de etilo en soporte de una película de fotografía velada.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Réplicas del acero ASTM A335 grado P91 soldado

El acero ASTM A335 P91 fue soldado mediante el proceso GMAW, con un calor de aporte de 1.2 kJ/mm [28]. Se trata de un acero ferrítico-martensítico con 9 % de Cr y 1 % de Mo, aleado además con V y Nb, ampliamente utilizado en calderas que operan con temperaturas de vapor de hasta 500 °C y, en tuberías y colectores de vapor a 600 °C [28]. La composición química del material base y del material de aporte, reportada por el fabricante, se presenta en la Tabla II. Las fotomicrografías ópticas y las réplicas correspondientes se muestran en la Fig. 5. Las microestructuras del metal de

soldadura (MS), la zona afectada por el calor (ZAC) y el material base (MB), obtenidas mediante réplicas de acetato de etilo con soporte de aluminio reflectante, resultaron muy similares a las obtenidas por metalografía convencional. La replicación fue exitosa con los tres métodos, esto probablemente debido al relieve que dejó el ataque electrolítico con ácido oxálico. El ataque permitió definir claramente los límites de grano de austenita previa, debido a que este reactivo disuelve las regiones próximas a las partículas $M_{23}C_6$ que precipitan en dichos límites [28], [29].

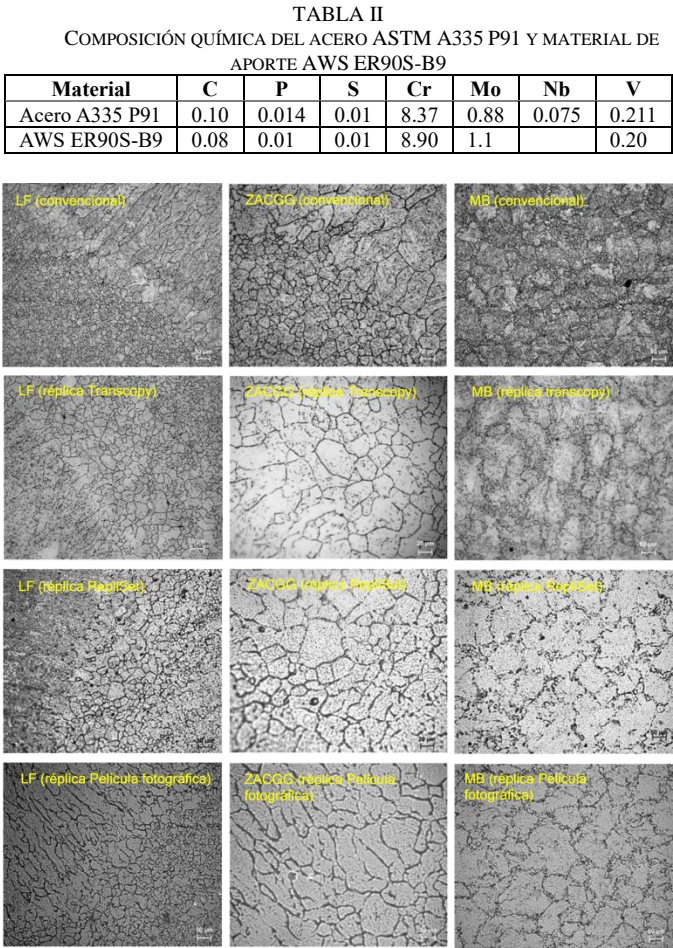


Fig. 5. Microestructuras del acero A335 P91 soldado. Los detalles microestructurales son bien reproducidos por el acetato de etilo en soporte de aluminio, el caucho siliconado y la película fotográfica. LF: Línea de fusión; ZACGG: Zona afectada por el calor de grano grueso; MB: Metal base.

B. Réplicas del acero ASTM A335 grado P91 sometido a creep

El acero ASTM A335 P91 fue sometido a un ensayo de creep a rotura a una temperatura de 600 °C y una tensión de 190 MPa, alcanzando un tiempo de rotura de 466 horas. La evaluación se centró en el estudio de las cavidades formadas durante el proceso de creep [9], [10]. Las réplicas permiten analizar estas cavitaciones y su registro proporciona una estimación del tiempo de vida residual de los componentes [9], [14]. Los métodos de replicación empleados — (1ro) réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio, (2do) réplicas con

caucho siliconado y (3ro) réplicas con película fotográfica— reprodujeron de manera eficiente las cavidades, como se muestra en la Fig. 6. La muestra fue encapsulada en una resina conductora con polvo de hierro, lo que ocasionó una fuerte adherencia de la película fotográfica y dificultó su desprendimiento; no obstante, las cavitaciones se observaron con nitidez.

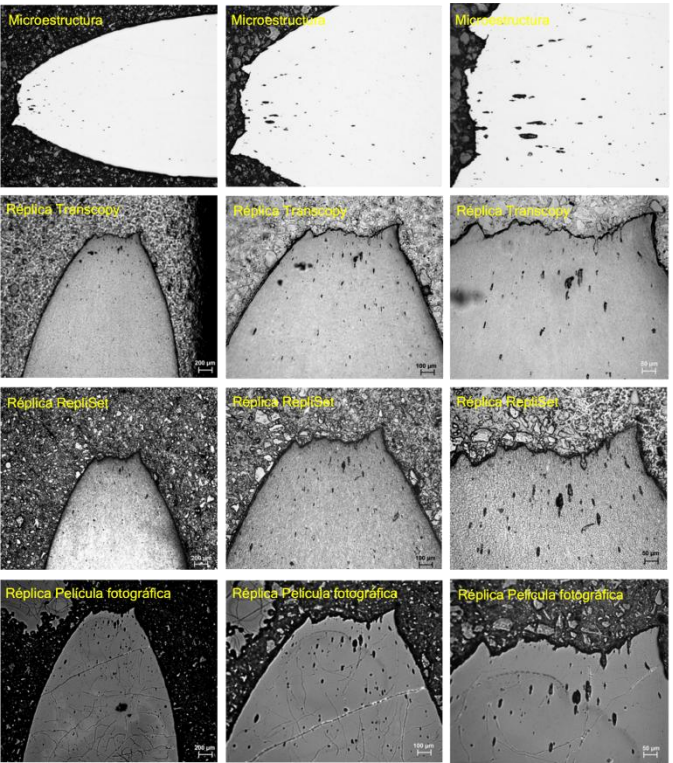


Fig. 6. Microestructuras del acero 335 grado P91 sometido a creep. Los detalles de las cavidades son reproducidos aceptablemente por acetato de etilo en soporte de aluminio, caucho siliconado y películas fotográfica.

C. Réplicas del acero AISI 304 soldado

La composición química del acero AISI 304 y del material de aporte, ambos soldados mediante el proceso GMAW con un calor de aporte de 0.9 kJ/mm, se detalla en la Tabla III. Este acero es susceptible a la precipitación de carburos de cromo ($Cr_{23}C_6$) durante la soldadura o en reparaciones posteriores [19], [29], lo que puede ocasionar la pérdida de sus propiedades anticorrosivas. Las fotomicrografías correspondientes al MS, ZAC y MB se muestran en la Fig. 7. Los detalles microestructurales fueron reproducidos de manera satisfactoria tanto con réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio, como con caucho siliconado y película fotográfica. La replicación de esta aleación fue óptima incluso a aumentos de hasta 1000X, gracias a que el ataque electrolítico con ácido oxálico permite definir adecuadamente las regiones sensibilizadas. Este reactivo también facilita la identificación de la fase δ -ferrita (Fe- δ) en el metal de soldadura. Para lograr resultados precisos, fue necesario determinar un tiempo de sobre ataque adecuado.

TABLA III
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 304 Y MATERIAL DE APORTE CLASIFICACIÓN AWS E308LSI

Material	C	Ni	Mn	Si	Cr	V
Acero AISI 304	0.04	8.16	1.96	0.363	15.2	0.09
AWS E308LSi	0.01	10.71	1.8	0.8	19.65	

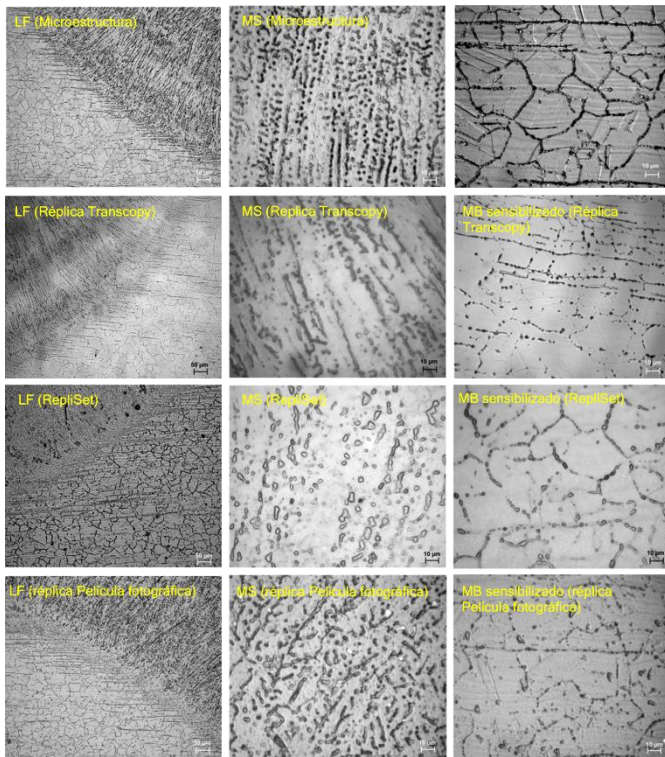


Fig. 7. Microestructuras del acero AISI 304 soldado. Réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio, del caucho siliconado y de la película fotográfica.

D. Réplicas del acero SAE 1080 esferoidizado con presencia de fisuras

El acero SAE 1080 fue esferoidizado mediante un tratamiento que consistió en un temple desde 900 °C, seguido de un revenido a 700 °C durante 6 horas. Durante el temple, la probeta sufrió fisuración debido al gradiente térmico y a la transformación microestructural a martensita de alto carbono. La selección de esta probeta para el estudio se basó en evaluar la capacidad de replicar la fisura, la zona descarburizada y los finos precipitados de cementita [3], [22]. Las fotomicrografías ópticas y las réplicas correspondientes se presentan en la Fig. 8. La replicación de la fisura, la zona descarburizada y la esferoidita fina fue óptima en el caso de las réplicas realizadas con acetato de etilo en soporte de aluminio. Resultados similares se obtuvieron con el caucho siliconado, aunque este último presentó limitaciones para definir estructuras finas, como la esferoidita. Por su parte, la réplica realizada con película fotográfica permitió copiar las tres características microestructurales evaluadas, logrando visualizar la esferoidita fina a 1000X; sin embargo, en la fisura se acumuló parte del acetato de etilo aplicado, lo cual afectó la replicación eficiente de la zona descarburada.

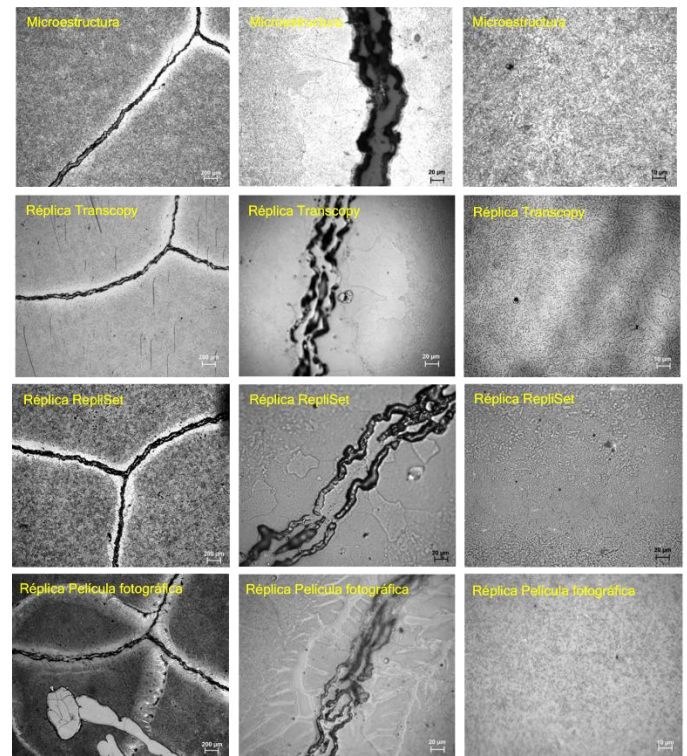


Fig. 8. Microestructuras del acero AISI 1080 esferoidizado. Réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio, del caucho siliconado y de la película fotográfica.

E. Réplicas del acero SAE 1020 carburizado

El acero SAE 1020 fue carburizado a 900 °C en caja durante 5 horas, posteriormente sometido a un temple simple y un revenido a 180 °C durante 30 minutos. El temple simple consistió en un enfriamiento al aire desde la temperatura de carburización, seguido de un calentamiento a 830 °C con un mantenimiento de 30 minutos y, finalmente, un enfriamiento en agua. La selección de esta probeta para la replicación microestructural tuvo como objetivo principal determinar la profundidad de la capa carburizada [3], [14], [22]. Las fotomicrografías ópticas y sus correspondientes réplicas se muestran en la Fig. 9. La replicación de la profundidad de carburización fue excelente al utilizar la película fotográfica velada; en comparación, se obtuvo menor éxito con las réplicas elaboradas a partir de acetato de etilo en soporte de aluminio, mientras que la réplica con caucho siliconado presentó resultados deficientes. Estos hallazgos confirman nuevamente la limitación del caucho siliconado para replicar con precisión características microestructurales finas.

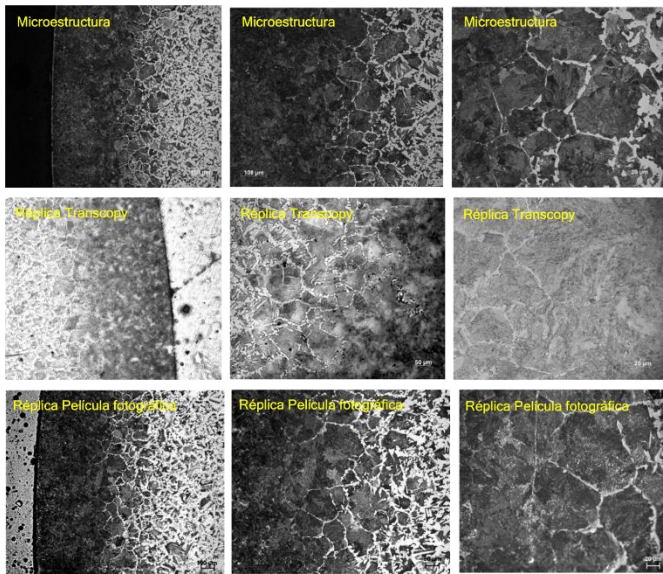


Fig. 9. Microestructuras del acero AISI 1020 carburizado. Réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio y la película fotográfica

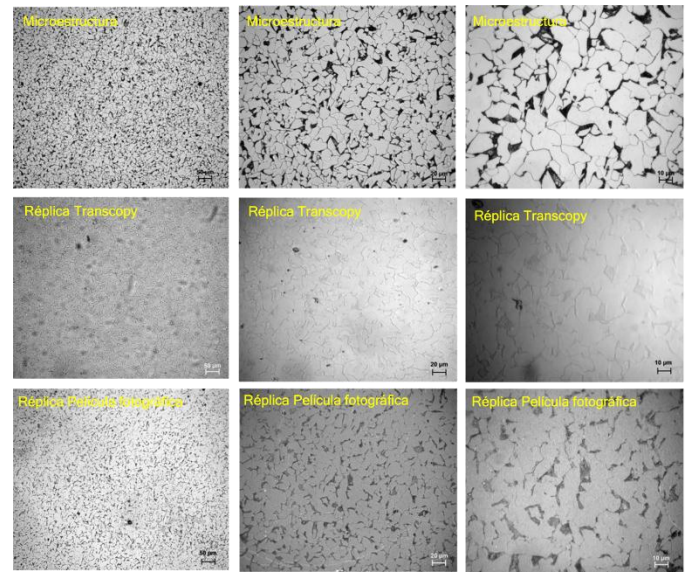


Fig. 10. Microestructuras del acero ASTM A36. Réplicas de acetato de etilo en soporte de aluminio y la película fotográfica

F. Réplicas del acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es ampliamente utilizado en componentes estructurales. Los detalles microestructurales se muestran en la Fig. 10. La replicación de las microestructuras finas fue deficiente al emplear caucho siliconado y poco satisfactoria al utilizar acetato de etilo en soporte metálico. En contraste, las réplicas obtenidas con película fotográfica velada fueron de buena calidad, destacándose la diferenciación de contraste entre ferrita y perlita. La ligera disminución en la calidad de las réplicas ferrita-perlita podría atribuirse al ataque metalográfico necesario para producir un relieve superficial óptimo, ya que se requiere una profundidad de disolución suficiente de la ferrita que genere un plano ligeramente distinto de enfoque respecto a la perlita en la réplica [22]. Los detalles microestructurales se reprodujeron aceptablemente con la película fotográfica y, en menor medida, con el acetato de etilo en soporte de aluminio. El caucho siliconado no logró replicar adecuadamente la microestructura.

G. Réplicas de una fundición gris

La microestructura de la fundición gris estuvo compuesta por grafito, perlita fina y presencia de esteadita, cuyos detalles se muestran en la Fig. 11. La replicación del grafito fue muy satisfactoria en los tres métodos evaluados; sin embargo, la matriz de perlita fina y la esteadita no pudieron ser definidas adecuadamente. El ataque metalográfico representó una limitante para resaltar la perlita fina y la esteadita. En particular, el ataque con Nital genera un relieve adecuado en el grafito, facilitando su replicación, pero en el caso de la perlita fina el ataque tiende a ser generalizado, impidiendo una definición clara. Respecto a la esteadita, se requiere explorar otros reactivos que permitan resaltarla en relieve para facilitar su replicación. Los detalles relacionados con la distribución de grafito se reprodujeron de forma aceptable utilizando acetato de etilo en soporte de aluminio, caucho siliconado y película fotográfica velada.

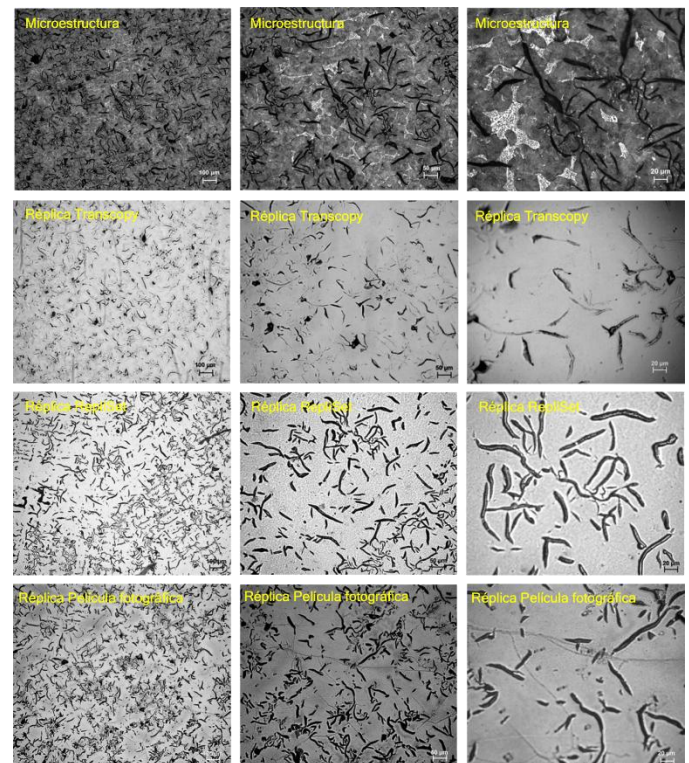


Fig. 11. Microestructuras de la fundición gris. Se presenta los detalles microestructurales reproducidos por el acetato de etilo en soporte de aluminio, el caucho siliconado y la película fotográfica.

H. Réplicas de una fundición blanca

La microestructura de la fundición blanca estuvo compuesta por cementita y perlita. Los detalles microestructurales obtenidos mediante los tres métodos de replicación, que permiten copiar de manera eficiente la microestructura y posibilitan su observación hasta aumentos de 1000X, se presentan en la Fig. 12. El éxito en la replicación se ve favorecido por la naturaleza gruesa de la microestructura; en

este caso, el reactivo Nital ataca la ferrita presente en la perlita gruesa, lo que permite definir y registrar adecuadamente tanto la perlita como la cementita.

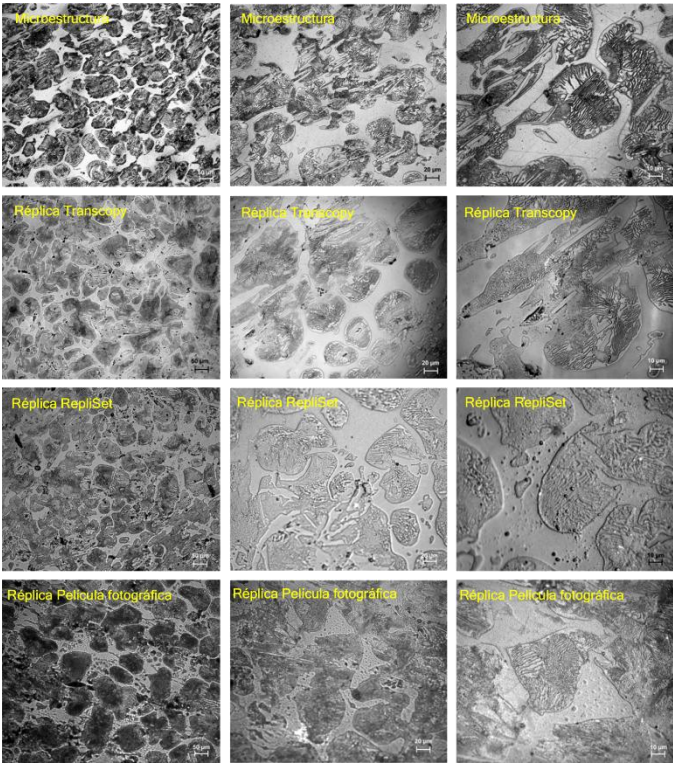


Fig. 12. Microestructuras de la fundición blanca. Se presenta los detalles microestructurales reproducidos por el acetato de etilo en soporte de aluminio, el caucho siliconado y la película fotográfica

Durante la replicación metalográfica se identificaron imperfecciones atribuibles a la técnica utilizada, tal como se observa en la Fig. 13. El principal defecto detectado fue la presencia de burbujas de aire atrapadas en la réplica, así como el despegue inadecuado de la réplica del elemento de prueba. Los defectos observados y sus posibles causas se detallan en la Tabla IV.

TABLA IV COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 304 Y MATERIAL DE APOORTE CLASIFICACIÓN AWS E308LSi	
Defecto	Posibles causas
Líneas oscuras en la réplica de acetato de etilo con soporte metálico	Cuando la réplica es doblada durante su extracción (se deforma la lámina de aluminio)
Burbujas en las réplicas	Cuando la presión aplicada en la réplica no ha sido la correcta y ha permitido la entrada de aire
Líneas curvadas en la película fotográfica	Cuando la extracción de la película ha sido deficiente
Replicado muy débil de microestructura gruesa	Tiempo de ataque químico deficiente o presión deficiente
Doblado de la réplica de acetato de etilo con soporte metálico durante el replicado	Cuando la adición del reactivo Transcopy fue excesivo y mojó el autoadhesivo posterior
Deformación de la réplica de película fotográfica durante el replicado	Cuando la adición del acetato de etilo fue excesiva

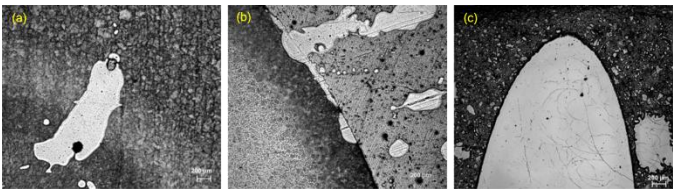


Fig. 13. Defectos en las réplicas: (a, b) Burbujas de aire atrapado en la réplica, (c) despegue inadecuado de la réplica que genera líneas.

IV. CONCLUSIONES

Las réplicas metalográficas obtenidas con película fotográfica de acetato de etilo de rollo velado ASA 200, de muy bajo costo, permitieron revelar con buena resolución los detalles microestructurales en las muestras estudiadas, alcanzando resultados satisfactorios para observaciones ópticas hasta 1000X. De esta manera, compiten de manera eficiente con réplicas comerciales de alto costo, como las láminas de acetato de etilo en soporte de aluminio reflectante (marca Transcopy) y las réplicas de caucho siliconado (marca RepliSet).

La calidad de los detalles microestructurales en las réplicas obtenidas con película fotográfica y con láminas de acetato de etilo en soporte de aluminio (Transcopy) depende de la cantidad adecuada de reactivo y del tiempo de ablandamiento, ya que el solvente tiende a evaporarse o a humedecer en exceso la réplica, deteriorando su calidad.

Las réplicas con caucho siliconado (RepliSet) presentan limitaciones para revelar detalles en aceros de grano fino y microestructuras martensíticas. Una etapa crítica en este método es el montaje de la réplica en el portaobjetos de vidrio, donde se requiere una buena adherencia mediante cinta adhesiva para evitar desniveles que afecten la observación microscópica.

La etapa más importante en la técnica de replicación es la preparación metalográfica de la muestra, ya que la réplica reproduce exclusivamente el relieve generado por el ataque metalográfico. Por ello, la selección adecuada del tipo de reactivo y el tiempo de ataque químico son parámetros fundamentales para garantizar resultados precisos.

REFERENCIAS

[1] N. L. Loh, "Non-destructive replica metallography," *Br. J. Non-Destructive Testing*, vol. 31, no. 8, pp. 437–439, 1989

[2] J. W. Simmons, "On-site nondestructive metallographic examination of materials," *Microstructural Science*, vol. 15, pp. 55–66, 1987.

[3] J. Neri, "Optical replicas: a nondestructive metallography evaluation technique," in *Failure Analysis*, ASM Metals, pp. 241–254, 1969.

[4] J. B. Haycraft, "On the minute structure of striped muscle, with special reference to a new method of investigation, by means of impressions stamped in collodion," *Proc. Roy. Soc. Lond.*, pp. 287–303, 1891.

[5] J. F. Henry, F. V. Ellis, and R. Viswanathan, "Field metallography techniques for plant life extension," *Microstructural Science*, vol. 15, pp. 13–25, 1987.

[6] P. J. Goodhew, *Thin Foil Preparation for Electron Microscopy*. Amsterdam: Elsevier, 1985.

[7] B. L. Gabriel, "SEM: A user's manual for materials science," in *ASM Metals Handbook*, vol. 17, pp. 137–147, Metals Park, OH: ASM, 1985.

[8] P. D. Hedgecock, J. L. Grover, G. R. Egan, and E. L. Capener, "Propeller cracking problem: summary of findings from initial visit to Philadelphia Naval Shipyard," Aptech Engineering Services Inc., Palo Alto, CA, 1985.

[9] E. V. Sullivan, "Field metallography equipment and techniques," *Microstructural Science*, vol. 15, pp. 3–11, 1987.

- [10] H. Thielsch, "In-service creep strain measurements for life prediction and extension of piping and boiler components," *Materials Evaluation*, pp. 123–129, 1991.
- [11] A. R. Marder, "Replication microscopy techniques for NDE," in *ASM Metals Handbook: Nondestructive Evaluation and Quality Control*, 9th ed., vol. 17, pp. 53–56, Metals Park, OH: ASM, 1985.
- [12] R. Brown and G. C. Smith, "Plastic replication for the identification of fatigue crack initiation," *Metallography*, vol. 15, pp. 269–280, 1982.
- [13] E. Birner and R. Lohberg, "Microstructural investigation by means of replicas taken from components at temperatures around 100 °C," *Practical Metallography*, vol. 17, pp. 14–22, 1980.
- [14] H. Gleiter, "Physical metallurgy," in *Cahn and Haasen, Eds.*, vol. 1, Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, pp. 589–597, 1983.
- [15] M. I. Wood, "Life assessment and repair technology for combustion turbine hot sections components," *High Temperature Technology*, pp. 300–301, 1990.
- [16] P. B. Ludwigsen, "Non-destructive examination," *Structure*, pp. 3–5, 1987.
- [17] J. C. Thornly and K. G. Sedman, "In-situ replica method with relationship to traditional non-destructive examination techniques," *Can. Soc. Non-Destructive Testing J.*, vol. 11, no. 6, pp. 30–38, 1990.
- [18] A. Cervoni and M. A. Clark, "Investigation of turbine disc cracking by field metallography," *Microstructural Science*, vol. 15, pp. 37–52, 1987.
- [19] G. L. Kehl, *Principles of Metallographic Laboratory Practice*. New York: McGraw-Hill, 1949.
- [20] G. F. Vander Voort, *Metallography: Principles and Practice*. Montreal: McGraw-Hill, 1984, pp. 153, 154, 157, 160–176, 212–215, 327–328, 632–655.
- [21] R. Viswanathan, "Dissimilar metal weld and boiler creep damage evaluation for plant life extension," *J. Pressure Vessel Technol.*, vol. 107, pp. 218–224, 1985.
- [22] L. Kosec and F. Vodopivec, "Examples of replica technique in optical microscopy," *Practical Metallography*, vol. 6, pp. 118–121, 1969.
- [23] J. H. M. Willison and A. J. Rowe, *Replica, Shadowing and Freeze Etching Techniques*. New York: North-Holland, 1980, ch. 4–6.
- [24] Struers, "RepliSet/RepliFix Brochure." [Online]. Available: <http://www.struers.dk>
- [25] ASTM International, "Standard guide for electrolytic polishing of metallographic specimens," ASTM E1558, 1999.
- [26] ASTM International, "Standard practice for microetching metals and alloys," ASTM E407, 1999.
- [27] ASTM International, "Standard practice for production and evaluation of field metallographic replicas," ASTM E1351, 2001.
- [28] K. Haarmann, J. C. Vaillant, B. Vandenbergue, W. Bendic, and A. Arbab, *The T91/P91 Book*. Düsseldorf: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2002.
- [29] R. Viswanathan, *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*. Metals Park, OH: ASM International, 1989, pp. 183–229.