



Estudio de la fabricación aditiva para su aplicación en el reperfilado de ruedas de ferrocarril desgastadas por su uso

Jon Hernandez-Martinez¹, Javier Santamaria¹, Aizpea Urresti¹, Julio Blanco-Lorenzo¹, Ernesto Garcia Vadillo¹

¹ Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, jon.hernandez@ehu.eus, javier.santamaria@ehu.eus, aizpea.urresti@ehu.eus, julio_blanco001@ehu.eus, ernesto.garciavadillo@ehu.eus

Resumen

La operación de reperfilado de ruedas ferroviarias consiste en un proceso de torneado que devuelve a la rueda desgastada su perfil original. Esto implica que, cuando el desgaste se produce principalmente en la pestaña de la rueda o provoca daños locales en la banda de rodadura, es necesario eliminar una cantidad considerable de material, reduciendo por tanto la vida útil y aumentando los costes de mantenimiento. Para hacer frente a este problema, recientemente se ha propuesto la fabricación aditiva como una solución ideal. Concretamente, la tecnología de Deposición de Energía Dirigida o DED (Direct Energy Deposition) es conocida por su viabilidad a la hora de reparar daños locales con gran precisión, y ya ha sido utilizada para soldar y reparar carriles ferroviarios. Sin embargo, su aplicación a las ruedas de ferrocarril aún está siendo objeto de estudio, debido a los exigentes requisitos mecánicos y al adecuado comportamiento frente a desgaste que el material de la rueda debe alcanzar. El objetivo de este estudio es investigar materiales de polvo metálico adecuados para el reperfilado de las ruedas de ferrocarril y comprobar que el resultado obtenido es adecuado para las ruedas ferroviarias atendiendo a las propiedades mecánicas alcanzadas. Los materiales comerciales empleados han sido AISI 4140 y Stellite 6, los cuales han sido depositados sobre probetas extraídas de la banda de rodadura de una rueda utilizada hasta su servicio final. Por tanto, el material utilizado como sustrato es material endurecido, tratando de reproducir de esta manera las condiciones reales lo más fielmente posible. La calidad de los recubrimientos se ha comprobado examinando la geometría de las uniones mediante un Microscopio Óptico, y la microestructura y tensiones residuales mediante técnicas de Fluorescencia de Rayos X y Difracción de Rayos X, respectivamente. La consistencia de la unión también ha sido estudiada analizando la dureza del recubrimiento y su variación a lo largo de la profundidad. Se han realizado ensayos tribológicos para caracterizar el comportamiento de fricción y evaluar la resistencia al desgaste de las probetas con revestimiento frente al material de rueda no revestido. Los resultados indican que el uso de la fabricación aditiva en ruedas ferroviarias resulta de especial interés para su uso en aplicaciones de reperfilado. Es posible conseguir una resistencia al desgaste adecuada y excelentes propiedades mecánicas en términos de dureza y tensiones residuales compresivas, y, por consiguiente, apropiadas para una mayor resistencia a fatiga.

Abreviaturas y acrónimos

Abreviatura	Definición
a,b,c	Parámetros de red cristalina
AISI	American Iron and Steel Institute
CdF	Coefficiente de Fricción
d	Profundidad de dilución
DC	Coefficiente de dilución
DED	Direct Energy Deposition
d_{hkl}	Distancia interplanar
DRX	Difracción de Rayos X
ER9	Calidad del acero de rueda ferroviaria [31]
FRX	Fluorescencia de Rayos X
h	Altura de capa
h,k,l	Indíces de Miller
HB	Dureza Brinnel
HV	Dureza Vickers
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
$K\alpha_{1,Cr}$	Longitud de onda de difracción
LC	Laser Cladding
MAM	Metal Additive Manufacturing
P_0	Presión máxima de Hertz
Ra	Roughness average
RCF	Rolling Contact Fatigue
Sc	Superficie de capa
Sd	Superficie diluida
Z	Número atómico
ZAT	Zona Afectada Térmicamente

1. Introducción

La vida útil de las ruedas y los carriles de acero convencionales se ve cada vez más limitada por las exigencias actuales, tales como un mayor volumen de tráfico, velocidades de circulación más rápidas y mayores cargas dinámicas, todo lo cual contribuye al desgaste y a la fatiga de contacto por rodadura, *Rolling Contact Fatigue* (RCF). Estos factores no sólo provocan molestias físicas a los pasajeros, como contaminación acústica [1] o vibraciones [2], sino que también dan lugar a un desgaste excesivo que altera el perfil de rodadura, la presencia y propagación de grietas (*spalling*, *shattered rim*, *shelling*, etc.) u otros defectos causados por condiciones no deseadas (plano de la rueda) que afectan aún más a la dinámica del vehículo ferroviario y comprometen su seguridad.

El método actual para la restauración de los perfiles de rodadura se realiza mediante tornos de foso, es decir, un proceso de arranque de viruta en el que en algunos casos obliga a desperdiciar una gran cantidad de material. Además, una vez la rueda alcanza su diámetro final, es decir, el menor diámetro aprovechable [3], ésta debe desecharse, con el consiguiente desperdicio medioambiental y económico. Llegando el coste de sustitución de las ruedas a ser hasta diez veces al del reperfilado [4].

No obstante, en los últimos años ha surgido una nueva línea de investigación centrada en explorar métodos alternativos para la restauración de los perfiles desgastados. La soldadura, por ejemplo, es una técnica habitual para reparar o sustituir carriles. Sin embargo, la presencia de grietas y su propagación es un síntoma característico en las juntas de soldadura, además de los desgarros, la porosidad y la considerable afección térmica que se genera, lo que compromete las propiedades mecánicas del material [5][6].

Por lo que en respuesta a estos problemas, la investigación se ha enfocado cada vez más en la fabricación aditiva metálica *Metal Additive Manufacturing* (MAM), dado que ofrece una mayor versatilidad, precisión y control de energía [7]. Siendo la tecnología de Deposición de Energía Directa (DED) la más adecuada para la reparación de daños locales o sistemas complejos, permitiendo de esta manera, crear un revestimiento resistente a desgaste y RCF, principales causas de fallo, y por tanto prolongar la vida útil de ruedas y carriles a través de diversos materiales en polvo.

Recientes pruebas experimentales han demostrado que el uso del Stellite 6 sobre materiales de carril de alta calidad puede aumentar la vida útil de estos. Nellian et al. [8][9] ensayaron esta aleación en railes R260 y R350HT obteniendo en ambos casos una mejora de la resistencia a desgaste. Lewis et al. [10] experimentaron revestimientos de Stellite 6, acero Hadfield, acero martensítico y acero inoxidable con 1 y 2 capas sobre un carril de grado R260, y los compararon con resultados anteriores del proyecto INNOTRACK [11]. El Stellite 6 mostró la mayor concordancia entre ambos proyectos, fue el material de mejor rendimiento tanto en condiciones secas como en húmedas, y también mostró consistencia en el índice de desgaste independientemente del número de capas de revestimiento aplicadas. Lewis et al. [12] también compararon otros 6 recubrimientos diferentes sobre carril de y concluyeron que las muestras de acero inoxidable martensítico y Stellite 12 tenían los índices de desgaste más bajos, correspondientes al 50% respecto a la referencia del carril de grado R260, mientras que el de Stellite 6 era el 70%. Sin embargo, el Stellite 6 fue seleccionado como la mejor opción para el revestimiento debido a la calidad de su deposición sobre el sustrato, logrando una fusión sin porosidad. Roy et al. [13] obtuvieron resultados similares al ensayar revestimientos de AISI 410, AISI 420 y Stellite 6 en un acero de carril de alta resistencia R400HT. A pesar de que el AISI 420 redujo la tasa de desgaste, tras los ensayos presentó graves daños superficiales y más grietas que la probeta sin revestimiento. Mientras que el Stellite 6, con un índice de desgaste similar al de la probeta no revestida y un mecanismo de daño uniforme sin signos de acumulación de residuos ni grietas, se indicó como la elección óptima. Estudios similares fueron llevados a cabo por Fasihi et al. [14] en los que también compararon Stellite 6 con un nuevo material de revestimiento desarrollado mediante la combinación de los materiales estándar AISI 410L y AISI 420. Se comprobó que los carriles de alta resistencia el Stellite 6 poseían una tasa de desgaste similar, siendo ambos superados por este nuevo material combinado. Sin embargo, para el caso de carriles ligeros, el Stellite 6 seguía siendo la mejor opción.

De forma paralela, también se ha realizado novedosos en el campo de las ruedas; Guo et al. [15] investigaron el comportamiento frente al desgaste cuando el carril o la rueda se revestían de forma individual con aleación de Cobalto, muy similar al Stellite 6. Descubrieron que el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste de ambas partes se reducían significativamente en ambos casos, es decir, aplicando el recubrimiento solamente al carril; y por otro lado solamente a la rueda. De forma similar, Wang et al. [16] analizaron el contacto cuando el revestimiento láser de material a base de Co se aplicaba tanto al carril como a la rueda, y observaron que la tasa de desgaste disminuía y los daños eran menos graves. Wang et al. [17] repitieron la prueba para analizar el efecto de la lubricación con aceite en los casos en que sólo el carril o la rueda estaban revestidos individualmente y cuando ambos estaban revestidos. En el caso en que el recubrimiento se aplicaba a ambos el desgaste volvía a ser menor, sin embargo, con el revestimiento individual, el comportamiento de la parte revestida mejoraba, pero la tasa de desgaste del componente no revestido aumentaba significativamente. Xiao et al. [18] simulaban la reparación de un defecto en una rueda ER9 mediante recubrimiento por láser con tres materiales distintos: aleación con base Fe, base Ni y base

Co. Aunque no compararon los resultados respecto a una rueda sin recubrimiento, la aleación de base Co fue la mejor en términos de fricción, desgaste y daño superficial, seguida de la aleación de base Fe.

Asimismo, otros estudios siguen sugiriendo el uso de aceros altamente aleados como la mejor alternativa para el revestimiento de railes, tales como el acero martensítico [19], un desarrollo propio a partir de los comerciales AISI 410 y 420 [20], los también comerciales AISI 434L, 314 o el propio AISI 420 [21], del mismo modo el AISI 630 y 18Ni300 [22], o la aleación de ultra resistencia Aermet 100 [23]. Sin embargo, otros autores [24], [25] recomiendan el usar el mismo material que el sustrato, reduciendo así posibles defectos y aumentando de esta manera el comportamiento a fatiga. De igual modo, también se han realizado estudios con aceros de alta aleación para reparaciones de rueda, además de incluir otros aditivos como el Lantano [26], [27] o WS_2 y CaF_2 [28]. Por otro lado, los ensayos con aceros comerciales, pero igualmente altamente aleados, produjeron grietas más profundas que la propia rueda [29]. Por ello, en este estudio se ha propuesto para los ensayos un acero de baja aleación, similar a la rueda utilizada como sustrato.

Este trabajo, forma parte de la iniciativa europea Academics4Rail y del cual ya se han obtenidos resultados prometedores [30], estudia los resultados obtenidos con dos distintos materiales de aporte, y los compara frente a una rueda de ferrocarril de grado ER9, el cual posee la mayor distinción de resistencia y dureza acorde a la norma [31]. Las probetas fueron obtenidas de la banda de rodadura de rueda desgastada, tras haber llegado al final de su vida útil tras múltiples operaciones de reperfilado, analizando de esta manera lo más fielmente posible el estudio de la fabricación aditiva como tecnología para el reperfilado.

2. Metodología

2.1. Preparación de muestras y materiales

Las muestras fueron extraídas de la banda de rodadura de la rueda, para ello la rueda se mecanizó en un centro de mecanizado vertical (VR-2.4, GMTK), de donde se extrajo la llanta y se realizaron diversos cortes en la banda de rodadura. De cada corte se seccionó el perfil de rodadura obteniendo un prisma cuadrangular de caras planas con una altura suficiente que garantice la adecuada evacuación del calor generado durante el proceso de fabricación laser. Siendo en la cara superior, a escasos milímetros de la superficie de rodadura, y previamente rectificada, donde se realizaron los recubrimientos. Este proceso se muestra en la Figura 1.

Sobre la banda de rodadura se midieron valores de dureza obteniendo un promedio de 342 HB, superior en 87 HB al valor mínimo exigido por la norma [31], es decir, durante la puesta en servicio de la rueda se produjo un endurecimiento por deformación.

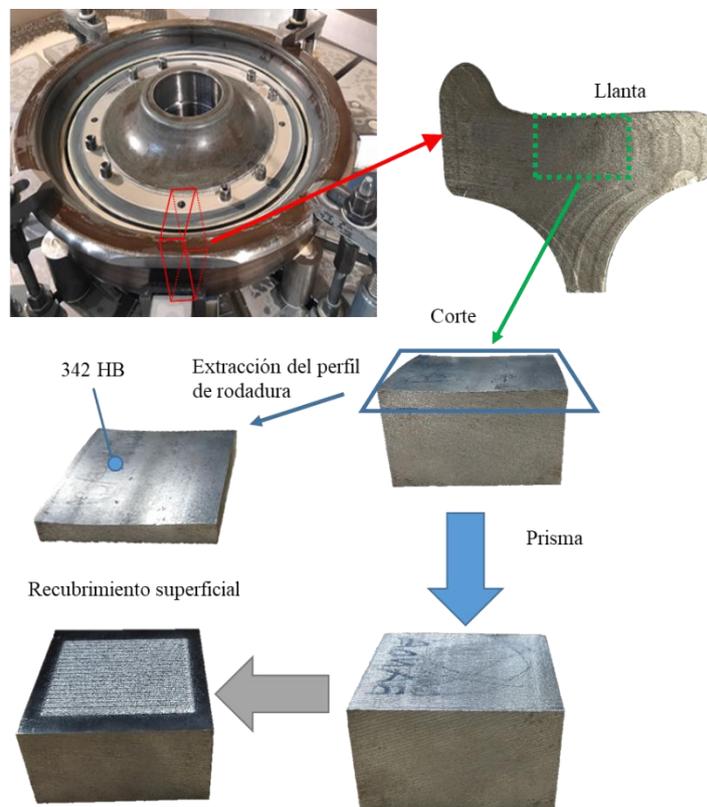


Figura 1: Proceso de corte de rueda y preparación de las muestras

Los materiales de aporte seleccionados fueron el Stellite 6 y AISI 4140. El Stellite 6 es una aleación de Cobalto que ha demostrado tener excelentes propiedades frente a desgaste en anteriores estudios [8]-[18], mientras que el AISI 4140, es un material económico empleado en aplicaciones que requieren poco desgaste tales como engranajes y levas, además, su composición es muy similar a la de la rueda utilizada aquí como sustrato, por lo que se espera que el revestimiento sea resistente[24][25]. Ambos poseen una granulometría $-45+105 \mu\text{m}$, y su composición se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de los materiales de aporte (% peso)

	Fe	C	Co	Cr	Si	Mo	W	Mn	S	P
Stellite 6	1.50	1	Bal	28	1.50	1	4.50			
AISI 4140	Bal	0.38-0.43		0.8 -1.1	0.15-0.35	0.15 -0.25		0.75-1	<0.04	<0.035

2.2. Recubrimiento láser

Antes de realizar el recubrimiento sobre la rueda se llevó a cabo un proceso de optimización, el cual consistió en realizar primeramente cordones individuales utilizando diferentes combinaciones de parámetros, caudal de material de aporte, velocidad de barrido, y potencia. Sin embargo, por motivos de ahorro de material de rueda y logística (obtención de la rueda, extracción de probetas y preparación), se realizó primeramente sobre un sustrato preliminar, AISI 1055, y posteriormente sobre la propia rueda. La composición de ambos sustratos es muy similar y se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición de los sustratos (% peso)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Cr+Ni+Mo
ER9 (máximo admisible)	0.60	0.80	0.02	0.015	0.4	0.30	0.30	0.08	0.30	0.06	0.50
AISI 1055	0.51	0.75	0.03	0.02	0.3	0.22	0.06	0.01	0.22	0	0.29

A continuación, estos cordones fueron seccionados, (Figura 2.a y Figura 2.c) y analizados visualmente en un microscopio óptico (DCM 3D, Leica, Alemania) para observar cambios micro-estructurales en la zona diluida y la Zona Afecta Térmicamente (ZAT), evitar poros y otros defectos visuales, y comprobar que existe una buena integridad entre el material aportado y el sustrato. Este factor viene definido por del coeficiente de dilución (DC), el cual se calcula en la Ecuación 1 a partir de las áreas de la superficie de capa (S_c) y de la superficie diluida (S_d). Sin embargo, a modo de practicidad, este cálculo puede simplificarse a la altura de capa (h) y profundidad (d).

$$DC = \frac{S_d}{S_d+S_c} \approx \frac{d}{d+h} \quad (1)$$

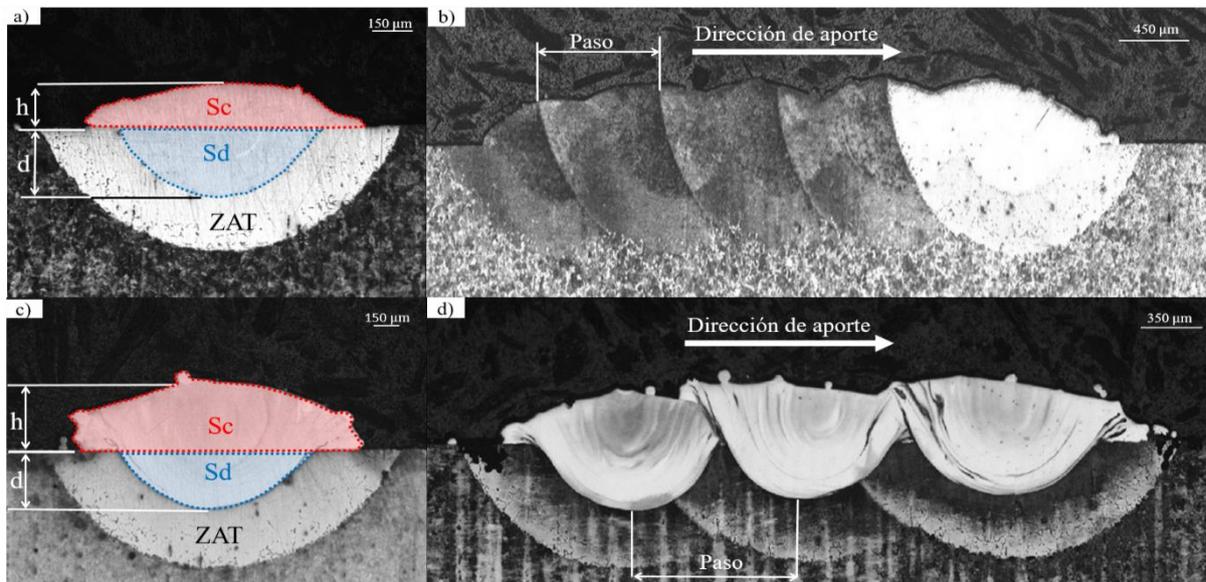


Figura 2: Secciones de los recubrimientos durante la obtención de parámetros. Cordón individual de a) AISI 4140 c) Stellite 6 (en rojo superficie de la capa aportada y en azul superficie de dilución), y recubrimiento de b) AISI 4140 d) Stellite 6

Posteriormente, su reproducibilidad fue comprobada en pequeños recubrimientos (Figura 2.b y Figura 2.d), además de ajustarse el paso, distancia horizontal entre cordones. Este proceso fue repetido hasta que los valores óptimos fueron identificados (Tabla 3) con el objetivo de obtener una altura aproximada de 0.3 mm, y un DC superior a 30 que asegura la correcta adhesión de sucesivos cordones [32].

Tabla 3: Parámetros optimizados de fabricación aditiva

	Potencia [W]	Velocidad de avance [mm/min]	Caudal de material [g/min]	Paso [mm]	DC [%]	Altura [mm]
AISI 4140	700	450	3.3	1.00	62	0.28
Stellite 6	800	500	4.5	1.35	58	0.32

El proceso de fabricación aditiva se ha realizado en el centro de procesamiento de materiales por láser Aktinos 500 (Kondia), especialmente diseñado para la experimentación con Laser Cladding (LC) por el Grupo de Fabricación de Alto Rendimiento del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU. Este centro dispone de un generador láser de fibra CW (Onda Continua) de 1 kW de potencia y longitud de onda de 1.070 nm, el cual es transmitido por un sistema de fibra óptica hasta el cabezal, donde está instalada una óptica de enfoque de 200 mm. Sobre este cabezal están también acopladas sendas toberas que suministran el material de aporte, impulsado por un alimentador de polvo (Twin 10-C, Sulzer Metco), y que proporcionan los gases de protección y arrastre. En ambos casos el gas empleado es Argón, y un haz láser de 1.7 mm de diámetro.

Una vez obtenidos los parámetros de proceso, se llevó a cabo el recubrimiento sobre la rueda, para ello se realizaron recubrimientos de 50x50 mm² en dos capas (Figura 3) para crear un revestimiento de espesor suficientemente, y en trazados perpendiculares para mejorar las propiedades en ambas direcciones. La altura conjunta de ambas capas fue de 1 mm y 0.8 mm, para los casos de AISI 4140 y Stellite 6 respectivamente. Posteriormente, el material de la sustrato fue eliminado mediante procesos de mecanizado para obtener una altura total inferior a 10 mm, y por tanto, compatible con el estándar del ensayo de fricción y desgaste [33].

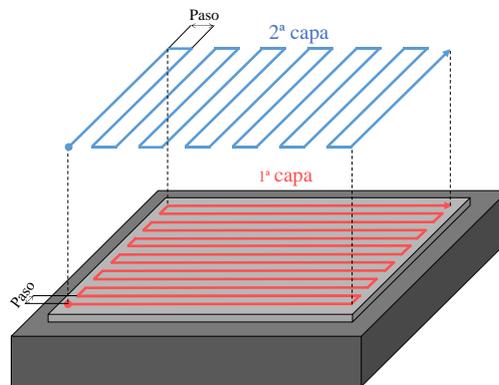


Figura 3: Patrón de recubrimiento. En rojo el recorrido de la primera capa aportada, y en azul la segunda

A continuación, la calidad del revestimiento se examinó analizando su composición mediante Fluorescencia de Rayos-X (FRX) (Mídex SD, Spectro, Alemania), microestructura a través de Difracción de Rayos-X (DRX) (D8 Discover, Bruker, Alemania), y midiendo las tensiones residuales (DRX) producidas tras la fabricación. Posteriormente, se procedió al rectificado del revestimiento para medir nuevamente las tensiones residuales tras un proceso de mecanizado, y dureza (Tecmicro). Finalmente, las probetas fueron seccionadas y analizadas Ópticamente (DCM 3D, Leica, Alemania) para observar la unión entre material aportado y sustrato, y realizar mediciones de micro dureza (FALCON 500, Innova Test, Países Bajos).

2.3. Ensayos de fricción y desgaste

Las pruebas tribológicas se realizaron en una máquina de ensayos del tipo Ball-on-disk, siguiendo los procedimientos dictados en la norma [33]. Esta máquina aplica una fuerza normal sobre un indentador inmóvil, presionándolo sobre un plato sometido a rotación, produciéndose de esta manera un deslizamiento entre ambas partes. Aunque no existe rodadura como podría esperarse de un contacto rueda-carril, este escenario es válido para situaciones de contacto con la pestaña, las cuales se caracterizan por elevados pseudodeslizamientos y condiciones saturadas del contacto. Como indentador se empleó una bola de 6 mm de diámetro, fabricada en WC 94/6 Co (Modulo Elástico de 600 GPa y Coeficiente de Poisson de 0.22) debido a su elevada dureza, 1550 HV. Con estos parámetros nominales y mediante de la teoría de Hertz (el problema tangencial no se tiene en cuenta para este cálculo), se calcula la máxima presión de contacto.

Para los ensayos de fricción se empleó una fuerza normal de 5 N, resultando en una presión máxima de 1437 MPa, valor típico del contacto rueda carril, una velocidad de deslizamiento de 0.1 m/s, y una duración de 5500 ciclos. Mientras que para el ensayo desgaste, se emplearon una fuerza normal de 10 N (1811 MPa), y una velocidad de deslizamiento de 0.12 m/s, con el fin de acelerar el fenómeno de desgaste. Asimismo, el número de ciclos también se aumentó a 36000 para lograr estabilización del proceso y obtener una huella de desgaste más significativa. En la tabla 4 se muestra un resumen de los parámetros. Todos los ensayos se realizaron bajo mismas condiciones, temperatura ambiente y sin lubricación, y las probetas fueron pulidas manualmente con papel hasta obtener una rugosidad $R_a < 0.1 \pm 0.09 \mu\text{m}$.

Tabla 4: Parámetros de ensayo tribológico

	Test de fricción	Test de desgaste
Diámetro de bola [mm]	6	6
Fuerza [N]	5	10
Radio de la zona de contacto a [mm]	0.047	0.051
P_0 Presión máxima de Hertz [MPa]	1437	1811
Velocidad de deslizamiento [m/s]	0.1	0.12
Nº ciclos	5 730	36 000

3. Discusión de los resultados

3.1. Microestructura y estado tensional

La Tabla 5 muestra las composiciones químicas de los recubrimientos obtenidas mediante el análisis FRX, dado que el equipo es semi-cuantitativo, aquellos elementos de número atómico $12 < Z < 92$ que posean un porcentaje menor a 1% no pueden ser medidos con suficiente resolución. Sin embargo, los elementos principales concuerdan de manera precisa con los de la Tabla 1, lo que indica que los revestimientos fueron depositados correctamente, sin evidencias de fusión de materiales o evaporaciones.

Tabla 5: Análisis FRX, resultado de composición de los recubrimientos (% peso)

	Fe	Cr	Si	Mo	W	Co	Mn	S	P
Stellite 6	<1	30.193	<1	<1	3.586	64.787	-	-	-
AISI 4140	98.8	0.885	<1	<1	-	-	<1	<1	<1

Posteriormente se realizó un análisis de fase y cristalinidad de ambos materiales de aporte mediante DRX, empleando una longitud de onda de $\alpha_{1, Cr} = 2.28976 \text{ \AA}$ en el rango $20^\circ < 2\theta < 160^\circ$. En el caso del AISI los patrones de reflexión precisan la existencia de ferrita α -Fe con parámetros de red, cúbicos, $a=b=c=2.8680 \text{ \AA}$. La identificación corresponde al N° 01-087-0721 del estándar JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards). Por otro lado, en el recubrimiento fabricado con Stellite 6 se determinó austenita γ -Co con estructura $a=b=c=3.5611 \text{ \AA}$, identificación JCPDS N° 00-015-0806. Un resumen de los resultados se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados de difracción

	2θ [grados]	Distancia interplanar d_{hkl} [Å]	Índices de Miller (hkl)	Parámetro de red $a=b=c$ [Å]	Identificación JCPDS
AISI 4140				2.8680	01-087-0721
	68.8742	2.0552	1 1 0	2.8631	
	105.7349	1.7803	2 0 0	2.8721	
	155.6702	1.1711	2 1 1	2.867	
Stellite 6				3.5611	00-015-0806
	67.7060	2.0552	1 1 1	3.5597	
	80.0392	1.7803	2 0 0	3.5607	
	130.6866	1.2597	2 2 0	3.5630	

En cuanto a las tensiones generadas durante la fabricación, el Stellite 6 originó un esfuerzo biaxial de tracción, un resultado característico de los procesos de fabricación aditiva de LC, debido a los elevados gradientes térmicos que se general durante el LC. Sin embargo, tras el proceso de rectificación de la superficie, una de las tensiones principales se transformó a compresión, lo que puede deberse a la eliminación de las capas superiores que al ser más cercanas a la superficie sufren un enfriamiento más rápido y están mayormente traccionadas, y a que el propio proceso de rectificado deformó la dúctil austenita en la dirección de rectificado produciendo dicha compresión.

Por otro lado, en el recubrimiento de AISI 4140 se observó un estado tensional de compresión desde la deposición del material, y que tras el proceso de rectificación decreció ligeramente manteniéndose de igual manera la compresión. Estas compresiones no son resultados típicos de los procesos de fabricación laser, no obstante, se han observado generadas tras tratamientos térmicos mediante laser post fabricación LC [34][35], o incluso tras la propia fabricación LC en carriles [36][37], las cuales podrían estar ligadas a transformaciones de fase ocurridas en el material [38][39]. Estas últimas sugieren que durante la fabricación de cada cordón ocurre un enfriamiento rápido, produciéndose martensita y la consecuente expansión cristalina de cubica a tetragonal, la cual queda restringida por el material ya solidificado, generándose así las tensiones de compresión. Sin embargo, con la fabricación de cada cordón se produce al mismo tiempo un calentamiento que afecta a los anteriores ya fabricados, alterando de esta manera sus propiedades y recibiendo el nombre de martensita revenida [40]. Esta martensita revenida se oscurece en comparación con la no revenida [38][39], efecto que es claramente visible en la Figura 2.b. Con el fin de esclarecer este fenómeno se llevaron a cabo más mediciones en nuevas probetas fabricadas bajo mismos parámetros (Potencia, Velocidad, Caudal) que pudiesen confirmar el comportamiento del AISI 4140,

obteniéndose resultados reproducibles (Tabla 7), los cuales permiten definir estas tensiones de compresión como características propias de este material, y por lo tanto, adecuado para una mayor resistencia a fatiga.

Tabla 7: Mediciones de tensiones residuales en AISI 4140

	Según fabricado			Post rectificado		
	σ_1	σ_1	σ_{VM}	σ_1	σ_1	σ_{VM}
Test 1	-423.7	-389.2	-407.55	-317.7	-136.9	-276.01
Test 2	-245.85	-203.5	-227.65	-338.6	-66.6	-310.7
Test 3	-277.35	-209.15	-250.32	-339.2	-46.1	-318.66
Test 4	-405.9	-368.6	-388.59	-316.2	-225.6	-282.03

3.2. Dureza y microdureza

La Figura 4 muestra el valor medio dureza superficial de cada material, mostrándose el promedio 10 indentaciones realizadas a cada uno de ellos. En el caso de la rueda se observa un resultado inferior al medido en la banda de rodadura (342 HB), siendo este nuevo valor de 270.84 ± 5.34 HB. Este cambio confirma que efectivamente la banda de rodadura fue endurecida por los numerosos ciclos de carga a los que fue sometida durante su puesta en servicio, mientras que, a escasos milímetros de profundidad, su valor sigue siendo cercano a los 255 HB que dicta la norma. Por otro lado, ambos recubrimientos, AISI 4140 y Stellite 6, aumentaron considerablemente la dureza hasta alcanzar 463.76 ± 31.78 HB y 489.66 ± 23.29 HB, respectivamente.

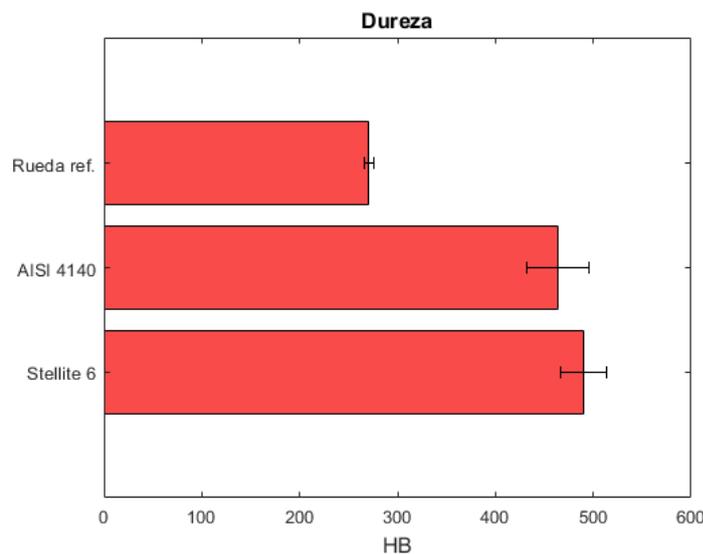


Figura 4: Mediciones de dureza en la superficie

La transición entre el revestimiento y el sustrato fue analizada mediante metalografías (Figura 5.a y Figura 5.c), no observándose fallos o irregularidades de adhesión, poros u otros posibles defectos. También se llevaron a cabo mediciones de microdureza siguiendo un procedimiento estándar de 300 gramos de aplicación durante 10 segundos (dwell time), realizándose dos mediciones, en el centro de los cordones de la primera capa, por metalografía con dos metalografías por material, mostrándose el valor promedio de cada una de las 4 mediciones en las Figura 5.b y Figura 5.d.

Como puede observarse, el recubrimiento de AISI 4140 (Figura 5.b) presentó unos valores muy estables en la capa aportada, $d < 1$ mm, con un promedio de $508 \text{ HV}_{0.3}$. A continuación existe una transición, en la ZAT, puramente decreciente hasta alcanzar el sustrato ($270 \text{ HV}_{0.3}$) a 1.7 mm de profundidad. Por otro lado, los resultados obtenidos en el Stellite 6 (Figura 5.d) confirman su anticipada superior dureza, con un valor máximo de $580 \text{ HV}_{0.3}$ en la superficie, que tras un ligero descenso a $500 \text{ HV}_{0.3}$ vuelve a aumentar brevemente según se aproxima al inicio del ZAT, a 0.8 mm de profundidad. Sin embargo, a diferencia del AISI 4140, es visible un pequeño valle de $350 \text{ HV}_{0.3}$ a 1 mm de profundidad, antes de alcanzar el sustrato alrededor de los 1.4 mm de profundidad. Analizando las metalografías (Figura 5.a y Figura 5.c) puede observarse que esa variación de microdureza del Stellite en la transición corresponde a la ZAT de la 2ª capa, este recalentamiento produce un leve recocido disminuyendo de esta manera la dureza, consiguiéndose consecuentemente la no uniformidad en la transición entre material aportado y sustrato. Este efecto no se da en el AISI 4140, puesto la ZAT generada durante la 2ª capa es de menor espesor, existiendo únicamente en la zona intermedia de los cordones de la 1ª capa. En cualquier caso, la superior dureza de ambos materiales frente la rueda es, en teoría, una ventaja para conseguir una mayor resistencia a desgaste [41].

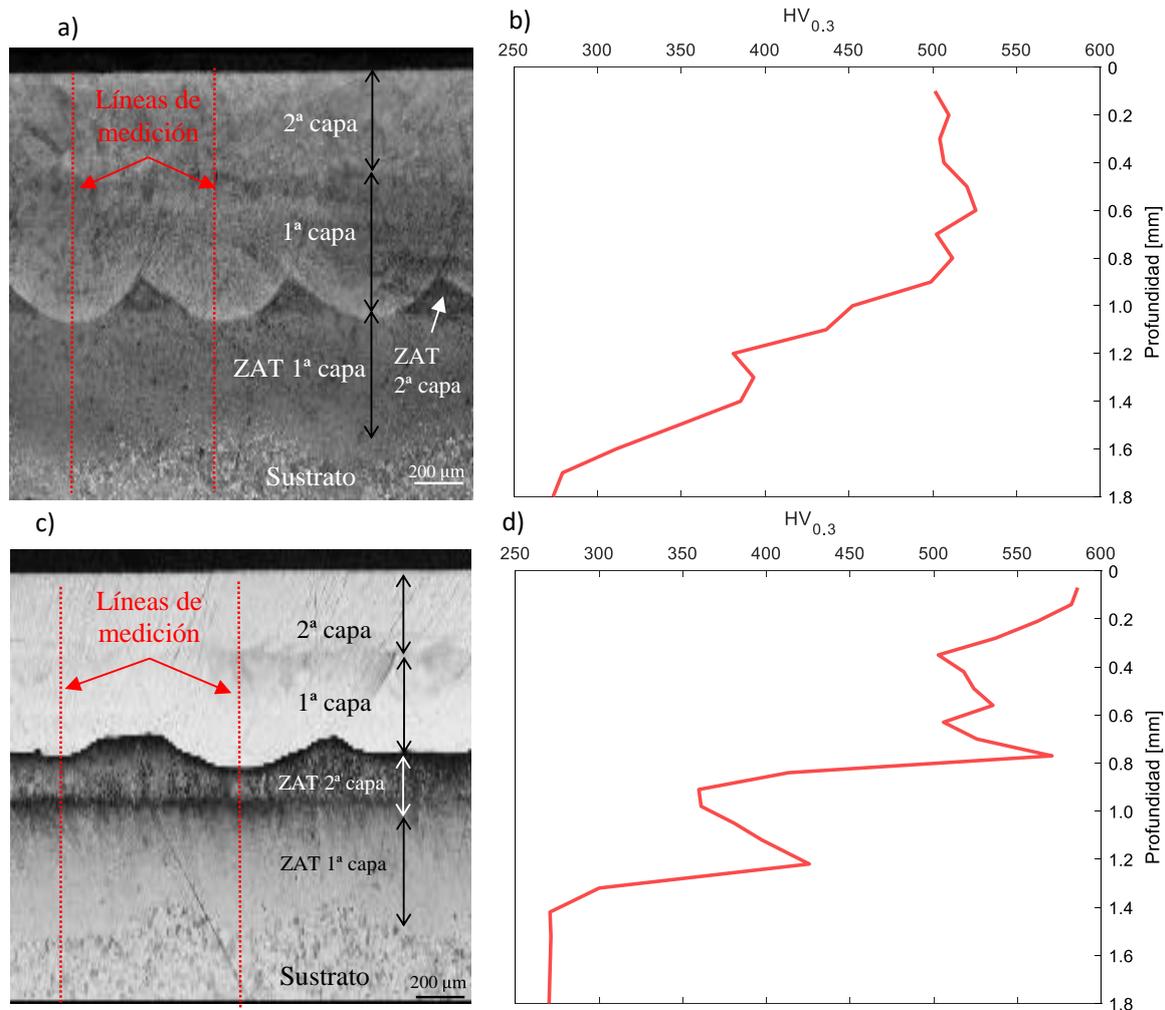


Figura 5: Secciones transversales de los recubrimientos a) AISI 4140 c) Stellite 6. Y mediciones de microdureza sobre el centro de los cordones de la primera capa b) AISI 4140 y d) Stellite 6

3.3. Fricción

Los resultados del ensayo de fricción (Figura 6.a) muestran que el recubrimiento fabricado con AISI 4140 posee el menor coeficiente de fricción (CdF), el cual se estabiliza en 0.25 ± 0.02 después de 1150 ciclos, seguido por la rueda sin revestimiento, con un valor promedio 0.3 ± 0.02 tras 1750 ciclos. Mientras que el Stellite 6 presentó el mayor CdF, con un máximo valor medio de 0.7 ± 0.04 después de 1210 ciclos. Esta comparativa entre valores estabilizados se muestran en la (Figura 6.b). La observación inicial de la prueba tribológica destaca el extremadamente elevado coeficiente de fricción del Stellite 6, especialmente cuando se compara con la rueda sin recubrimiento y con AISI 4140. Aunque estos hallazgos son consistentes con los de otros estudios de ball-on-disk donde se obtenían elevados CdF para Stellite 6 [42][43][44], estos valores son contrarios al resultado deseado, ya que un alto CdF implica mayores fuerzas de contacto y, por lo tanto, mayores tasas de desgaste. Analizando estos resultados, se evidencia que el AISI 4140 exhibió un comportamiento muy similar al de la rueda de referencia, llegando incluso a poseer un valor estabilizado más bajo, lo que sugiere la buena viabilidad del AISI 4140 como material de aporte en rueda.

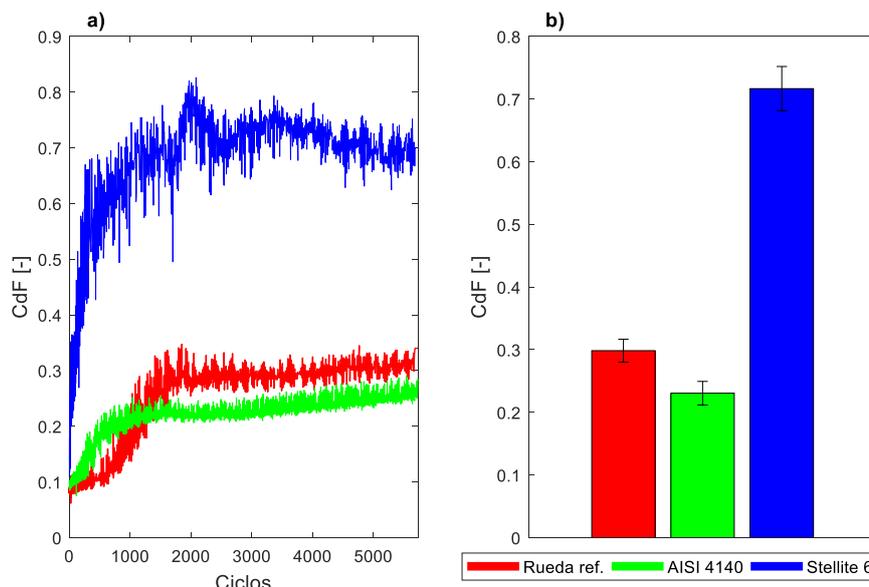


Figura 6: a) Coeficientes de fricción durante el ensayo b) valores estabilizados del coeficiente de fricción

3.4. Desgaste

En las pruebas de desgaste se llevó a cabo nuevamente la medición del CdF durante todo el ensayo (Figura 7). Todos los materiales comenzaron con un CdF de 0.1 hasta que alcanzaron valores significativos, nuevamente alrededor de los 1000 ciclos. A continuación, el CdF de la rueda sin recubrimiento fluctuó de forma brusca entre 0.35 y 0.5 hasta alcanzar los 28000 ciclos; esta no uniformidad puede asociarse al desprendimiento de pequeñas partículas superficiales que actúan como una tercera capa intermedia en el contacto. Posteriormente, el CdF aumentó repentinamente a 0.8, lo cual se atribuye a una pérdida de material aún más severa. En el caso del AISI 4140, el comportamiento fue similar durante la primera etapa, no obstante, presenta un comportamiento más moderado durante el incremento desde el CdF de 0.3 a los 10000 ciclos, hasta el CdF de 0.4 a los 30000 ciclos. En ese momento, ocurrieron algunas fluctuaciones y la fricción aumentó, al igual que la rueda, hasta 0.8 al final de la prueba. Esto puede indicar en primer lugar que la pérdida de material fue menor y ocurrió en una etapa posterior en comparación con la rueda de referencia. Finalmente, Stellite 6, que ya presentó el CdF más alto anteriormente, comenzó con diversas oscilaciones y aumentó su valor, nuevamente hasta 0.8, antes de los 12000 ciclos y permaneció estable hasta el final de la prueba. Esto sugiere que la pérdida de material para el Stellite 6 ocurrió extremadamente rápido, lo que aumentaría significativamente el desgaste. Este hecho podría verse seriamente afectado por la tensión residual de tracción inicial generada en el recubrimiento de Stellite 6 durante el proceso de LC, acelerando de esta manera la pérdida de material superficial.

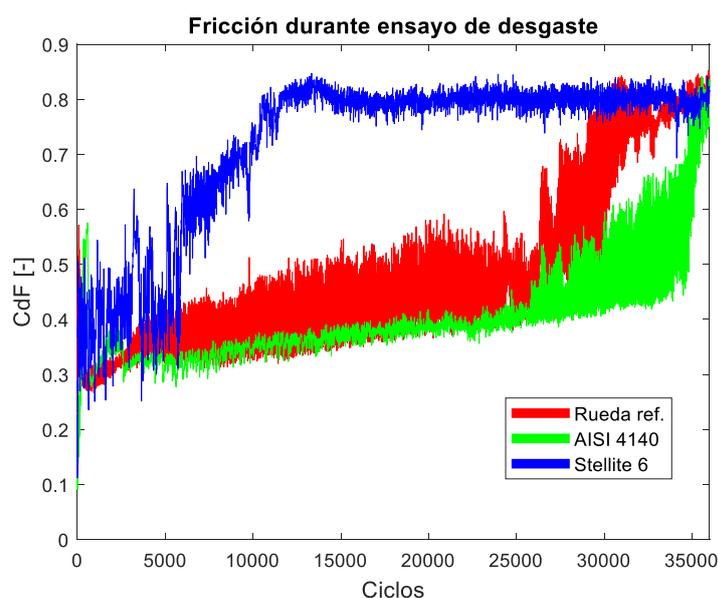


Figura 7: Coeficientes de fricción durante los ensayos de desgaste

Tras las pruebas de desgaste, se analizaron las huellas de desgaste y observaron restos de polvo rojizo tanto en la rueda sin revestimiento como con revestimiento de AISI 4140, además de ser estas huellas más oscuras bajo microscopía (Figura 8.a y Figura 9.a), siendo estos hechos indicios de haberse producido desgastes oxidativos. Esto es más evidente en el AISI 4140, ya que este tipo de desgaste ayuda a mantener un bajo coeficiente de fricción[45][46], y a las pequeñas películas de óxido apreciables en la huella de desgaste (Figura 9.a). Por el contrario, en la rueda sin recubrimiento (Figura 8.a) son visibles algunas estrías, que indican que varias micropartículas fueron arrastradas, tal y como podía anticiparse por las oscilaciones del CdF (Figura 7). Esto sugiere que, aunque existió un proceso de oxidación, ocurrió asimismo un desgaste abrasivo en el que estas micropartículas actúan formando una capa intermedia. Por otro lado, en la topografía de la rueda sin recubrimiento (Figura 8.b) se observa una considerable cantidad de material acumulado en los bordes, especialmente notable en el borde exterior debido a la acción centrífuga de la rotación, indicando una gran transferencia de material, ocurriendo en menor medida en la rueda recubierta con AISI 4140 (Figura 9.b).

En el caso del Stellite 6, el muy anticipado aumento del CdF en ambos ensayos (Figura 6 Figura 9) demuestra que las micropartículas se desprendieron muy rápidamente, lo que provocó un desgaste abrasivo excesivo. Esto es también evidente por la presencia de estrías en la huella de desgaste (Figura 10.a). Esta pérdida de material, unida a la elevada dureza de la Stellite 6, dio lugar a una tercera capa muy agresiva que incrementó el desgaste en mucha mayor medida que la de la rueda sin revestimiento, como puede verse en la topografía de la Figura 12.b. Esto refleja un efecto bien conocido en el ámbito ferroviario, en el que las micropartículas que se desprenden de la rueda y el carril debido a la rodadura se depositan sobre la cabeza del carril [47], y actúan posteriormente como elemento acelerador del desgaste. Estos resultados muestran una tasa de desgaste extraordinariamente elevada para el Stellite 6 en comparación con la rueda de referencia ER9 empleada, y con el acero AISI 4140 depositado. Aunque estos resultados son contrarios a los esperados, son semejantes a los obtenidos en estudios similares, Ostolaza *et al.* [44] compararon esta aleación frente a un acero comercial y observaron que el desgaste del Stellite era aproximadamente 6 veces superior, siendo únicamente capaz de ofrecer un mejor comportamiento en condiciones de alta temperatura.

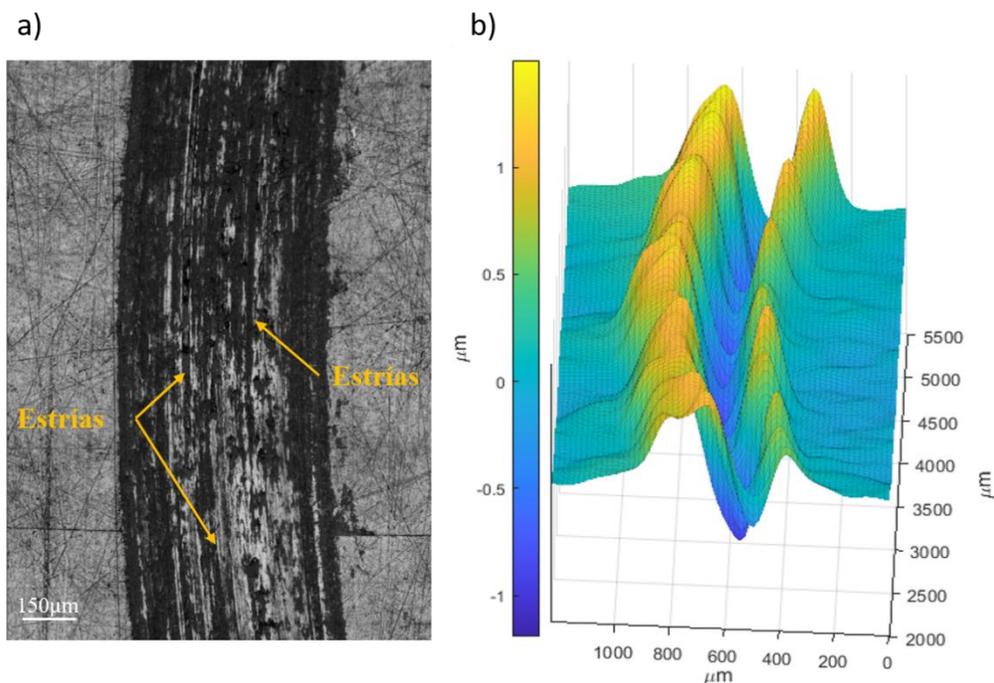


Figura 8: Desgaste de la rueda sin recubrimiento a) imagen óptica b) topografía

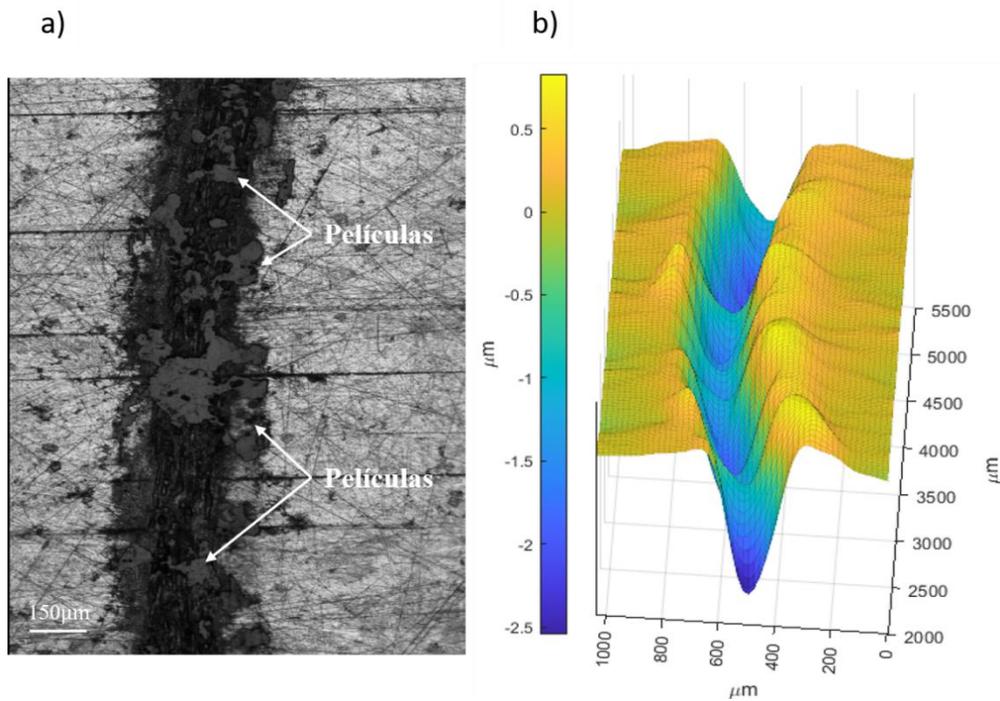


Figura 9: Desgaste del recubrimiento de AISI 4140 a) imagen óptica b) topografía

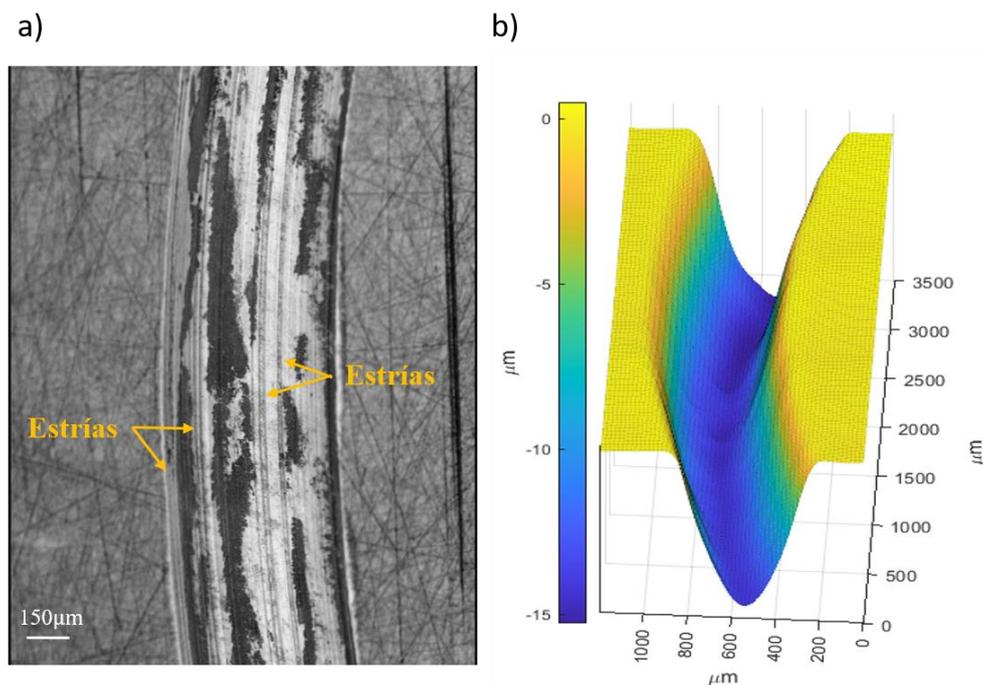


Figura 10: Desgaste del recubrimiento de Stellite 6 a) imagen óptica b) topografía

Finalmente, sobre las marcas de desgaste se realizaron integraciones mediante el método trapezoidal para obtener el perfil promediado (Figura 12). Por cada material se integraron 8 secciones repartidas equitativamente sobre la circunferencia desgastada, siendo la longitud total integrada ligeramente superior al 25% de la circunferencia. En primer lugar, destaca nuevamente la gran cantidad de material desgastado en el caso del Stellite 6, el cual llega a alcanzar hasta una profundidad ($14\mu\text{m}$) un orden de magnitud superior a la de la rueda ($1\mu\text{m}$), así como una mayor amplitud horizontal. Por otro lado, el AISI 4140 aunque presentó un CdF menor, y un proceso de desgaste similar a la rueda y sin tanta acumulación de material en el borde, la máxima profundidad ($1.9\mu\text{m}$) es también superior a la de la rueda.

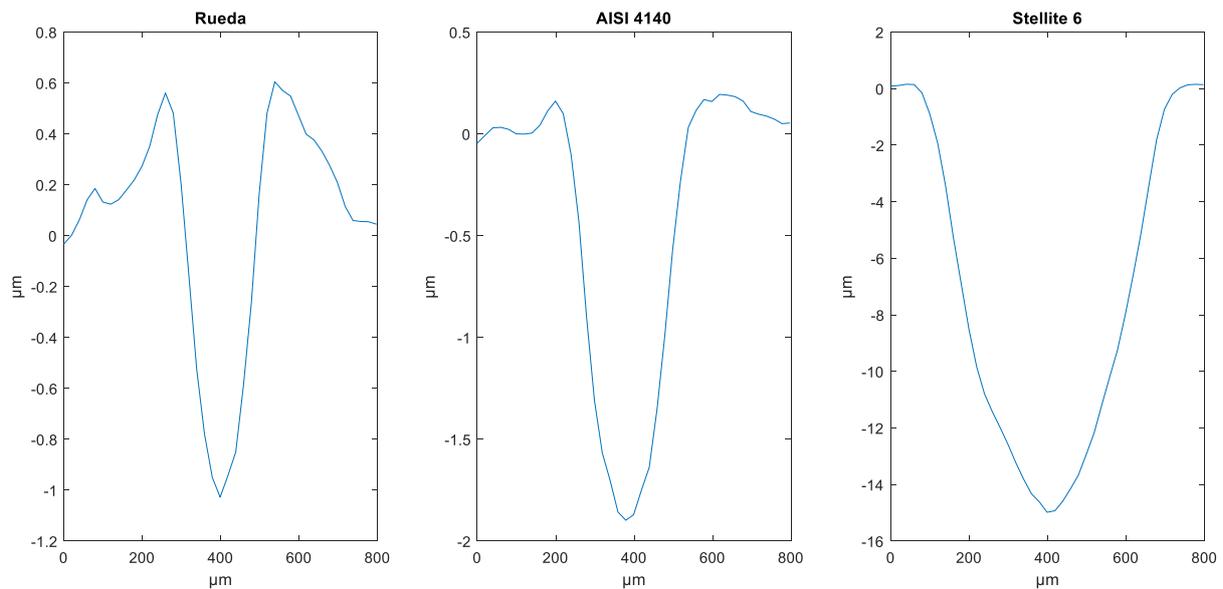


Figura 11: Integración de los perfiles de desgaste

4. Conclusiones

En este estudio se ha empleado el proceso LC para estudiar la fabricación aditiva metálica como método de reperfilado de ruedas de ferrocarril. Para ello, fueron extraídos varios especímenes de la banda de rodadura de rueda de desgastada de grado ER9, y se realizaron recubrimientos superficiales con dos tipos de material. Dado que la rueda está sometida a altos requerimientos de desgaste, la resistencia a desgaste del material aportado debe ser evaluada, por lo que se realizaron ensayos tribológicos en un dispositivo de Ball on Disc. Aunque este escenario no se trata de un contacto de rodadura, puede reproducir eficazmente situaciones de contacto de rail con pestaña, en el que se dan unas condiciones de contacto altamente saturadas con elevados deslizamientos. Cabe destacar también que el entorno de los ensayos de laboratorio es diferente al real, no se tuvieron en cuenta las influencias que la humedad, la corrosión o terceras capas (arena, hojas, lubricación) pudieran tener en los resultados. Para las condiciones analizadas las principales conclusiones que pueden extraerse de este trabajo son las siguientes:

1. Se ha demostrado que la fabricación aditiva metálica puede usarse como una técnica factible para la creación de recubrimientos superficiales sobre ruedas de ferrocarril. Ambos materiales utilizados en este estudio fueron depositados correctamente sobre la banda de rodadura, sin detectarse poros u otros defectos que afecten a la integridad del enlace entre material aportado y sustrato.
2. Asimismo, esta unión está influenciada por la ZAT, es deseable que su espesor sea inferior al de la capa aportada, especialmente en recubrimientos multicapas como este, para evitar no uniformidades en la dureza. Estas variaciones pudieron verse en las metalografías de la unión del Stellite 6 con la rueda, mientras que en el caso del AISI 4140 se detectó una transición mucho más homogénea.
3. De la misma manera, los análisis micro-estructurales (DRX) muestran tensiones residuales de compresión tras la fabricación de probetas con AISI 4140, mientras que en el caso del Stellite 6 de son de tracción. Aunque estas últimas pueden mitigarse tras un posterior mecanizado, las tensiones compresivas obtenidas en el AISI 4140 resultan de gran interés, pues implican una mayor resistencia a la propagación de grietas, factor crítico en la fatiga por contacto de rodadura (RCF).
4. Durante los ensayos tribológicos se compararon repetidamente los CdF de los materiales aportados frente al de la rueda, obteniéndose un elevado CdF en el recubrimiento con Stellite 6. Este hecho es consecuencia del desprendimiento de partículas del material que actúan como una capa intermedia y aumentan considerablemente el CdF. Aunque este desgaste abrasivo es visible también en la rueda, es mucho más notable en el Stellite 6 debido a la superior dureza de estas partículas; erosionando más fuertemente en la superficie, y a que se origina más rápidamente; lo cual podría estar influenciado por las tensiones residuales de tracción que se generaron en la fabricación. Por lo que para reperfilado de ruedas el Stellite 6 no es, al menos, tan eficaz como se podía esperar.
5. Por otro lado, el AISI 4140 es capaz de mantener unos valores del CdF bastante bajos, incluso inferiores al de la rueda sin recubrimiento. Lo que se traducen en menores fuerzas de contacto y presupone un menor desgaste. Y aunque el desgaste es muy similar al de la rueda, finalmente la máxima profundidad fue ligeramente mayor. No obstante, el uso de materiales similares a la rueda ha demostrado ofrecer el mejor potencial para su funcionalidad en términos de fricción y tensiones residuales, así como un perfil de dureza uniforme. De hecho, emplear el mismo material de rueda otorgaría otras ventajas como densidad

y coeficiente de expansión térmica equivalentes a los de la rueda, sin embargo, la utilización de aceros comerciales facilita la realización de estudios sobre la viabilidad técnica y económica de la fabricación aditiva en técnicas de reperfilado.

En general, el uso de la fabricación aditiva para ruedas de ferrocarril resulta de especial interés para aquellas en las que el desgaste este concentrado en la pestaña, dado que para restaurar el perfil completo de rodadura es necesario reducir notablemente el diámetro, y por tanto eliminar una gran cantidad de material con el siguiente desperdicio económico. Sin embargo, para afianzarlo son necesarias más investigaciones sobre el uso de la fabricación aditiva en el reperfilado del perfil completo de rodadura, y el proceso de desgaste por rodadura.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de Horizon Europe: Europe's Rail Joint Undertaking Academics4Rail [101121842], del Gobierno Vasco [IT1764-22, KK-2023/00029], y del Ministerio de Ciencias y Universidades MICINN, Ministerio de Economía, Comercio y Empresa MINECO y MCI/AEI [PID2019-109483RB-I00], incluyendo la financiación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER. No obstante, los puntos de vista y opiniones expresados son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o la Empresa Común Ferroviaria Europea. Ni la Unión Europea ni la autoridad otorgante pueden considerarse responsables de las mismas. Los autores también agradecen el servicio técnico y humano de los SGIker (UPV/EHU/ FEDER, EU).



Referencias

- [1] UNE-EN ISO 3095:2013, Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles. International Organization for Standardization, 2013.
- [2] UNE-EN 12299:2010, Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation. European Standard, 2010.
- [3] UNE-EN ISO 13715:2021, Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Tread profile. International Organization for Standardization, 2021.
- [4] Åhrén T., Waara P., Larsson-Kräik P.-O., "Technical and economic evaluation of maintenance for rail and wheels on Malmbanan," in Implementation of heavy haul technology for network efficiency: proceedings: International Heavy Haul Conference, Dallas, Texas, May 5-9, 2001, International Heavy Haul Association, 2003, pp. 5.81–5.86.
- [5] Shen M., Mei L., Gong F., Li C., Li Q., "Damage behaviour of rail flash-butt welding joints under controlled impact kinetic energy," *Wear*, vol. 552–553, p. 205435, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.WEAR.2024.205435.
- [6] Pereira H. B., Echeverri E. A. A., Alves L. H. D., Yildirimli K., Lewis R., Goldenstein H., "Influence of HAZ microstructure on RCF under twin-disc test of a flash-butt welded rail," *Wear*, vol. 546–547, p. 205324, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.WEAR.2024.205324.
- [7] Vafadar A., Guzzomi F., Rassau A., Hayward K., "Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, 2021, doi: 10.3390/app11031213.
- [8] Nellian A. S., Pang J. H. L., "Laser metal deposition characterization study of metal additive manufacturing repair of rail steel specimens," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 18, no. 1, p. e2134042, Jan. 2023, doi: 10.1080/17452759.2022.2134042.
- [9] Nellian A. S., Tan K. E., Hoh H. J., Pang J. H. L., Christian I., Chua S. Y., "Microstructure and Wear Performance Assessment of Laser Cladded Rail Steel for Service Life Extension at Sharp-Radius Curves," in 2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641613.
- [10] Lewis S. R., Fletcher D. I., "Assessment of laser cladding as an option for repairing/enhancing rails," *Wear*, vol. 330–331, pp. 581–591, May 2015, doi: 10.1016/J.WEAR.2015.02.027.
- [11] Vasić G., Franklin F. J., "Plastic deformation and crack initiation in hard pearlitic rail steels," in IoM3 Conference on 20th Century Rail, York, United Kingdom, Nov. 2011.
- [12] Lewis S. R. et al., "Improving rail wear and RCF performance using laser cladding," *Wear*, vol. 366–367, pp. 268–278, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.WEAR.2016.05.011.
- [13] Roy T. et al., "Effect of deposition material and heat treatment on wear and rolling contact fatigue of laser cladded rails," *Wear*, vol. 412–413, pp. 69–81, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.WEAR.2018.07.001.
- [14] Fasihi P. et al., "Tribological Properties of Laser Cladded Alloys for Repair of Rail Components," *Materials*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/ma15217466.
- [15] Guo H. M., Wang Q., Wang W. J., Guo J., Liu Q. Y., Zhu M. H., "Investigation on wear and damage performance of laser cladding Co-based alloy on single wheel or rail material," *Wear*, vol. 328–329, pp. 329–337, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.WEAR.2015.03.002.
- [16] Wang W. J., Hu J., Guo J., Liu Q. Y., Zhu M. H., "Effect of laser cladding on wear and damage behaviors of heavy-haul wheel/rail materials," *Wear*, vol. 311, no. 1–2, pp. 130–136, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.WEAR.2014.01.011.
- [17] Wang W.-J., Fu Z.-K., Guo J., Zhang Y.-Q., Liu Q.-Y., Zhu M.-H., "Investigation on Wear Resistance and Fatigue Damage of Laser Cladding Coating on Wheel and Rail Materials under the Oil Lubrication Condition," *Tribology Transactions*, vol. 59, no. 5, pp. 810–817, Sep. 2016, doi: 10.1080/10402004.2015.1107926.
- [18] Xiao Q. et al., "High-temperature tribological properties of coatings repaired by laser additive manufacturing on railway wheel tread damage," *Wear*, vol. 520–521, p. 204674, May 2023, doi: 10.1016/J.WEAR.2023.204674.
- [19] Lu P., Lewis S. R., Fretwell-Smith S., Engelberg D. L., Fletcher D. I., Lewis R., "Laser cladding of rail; the effects of depositing material on lower rail grades," *Wear*, vol. 438–439, p. 203045, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.WEAR.2019.203045.

- [20] Fasihi P., Abrahams R., Mutton P., Yan W., "Tribological Properties of a New Alloy Laser Cladded on Hypereutectoid Rails," *J Tribol*, vol. 143, no. 5, Apr. 2021, doi: 10.1115/1.4050896.
- [21] Xie T. et al., "Investigation on the Rolling Contact Fatigue Behaviors of Different Laser Cladding Materials on the Damaged Rail," *J Tribol*, vol. 143, no. 5, Apr. 2021, doi: 10.1115/1.4050690.
- [22] Meng L., Zhu B., Hu Q., Zeng X., Wang D., "Laser-induction hybrid cladding of different coatings on rail surface: Microstructure, wear properties and contact fatigue behaviors," *Appl Surf Sci*, vol. 566, p. 150678, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.APSUSC.2021.150678.
- [23] Zhang B., He B., Wang H., "Microstructural investigation and mechanical performance of laser cladding repaired bainite steel with AerMet100 steel," *Surf Coat Technol*, vol. 440, p. 128498, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2022.128498.
- [24] Tomlinson K., Fletcher D. I., Lewis R., "Evaluation of laser cladding as an in-situ repair method on rail steel," *Tribol Int*, vol. 180, p. 108210, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2022.108210.
- [25] Yildirimli K., Tomlinson K., Fletcher D. I., Lewis R., "Small-scale testing of rail laser cladding longevity, parameter tolerance and in-situ repairs in preparation for field implementation," in *12th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, Melbourne, Australia, Sep. 2022.
- [26] Wang W. J., Fu Z. K., Cao X., Guo J., Liu Q. Y., Zhu M. H., "The role of lanthanum oxide on wear and contact fatigue damage resistance of laser cladding Fe-based alloy coating under oil lubrication condition," *Tribol Int*, vol. 94, pp. 470–478, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2015.10.017.
- [27] Fu Z. K., Ding H. H., Wang W. J., Liu Q. Y., Guo J., Zhu M. H., "Investigation on microstructure and wear characteristic of laser cladding Fe-based alloy on wheel/rail materials," *Wear*, vol. 330–331, pp. 592–599, May 2015, doi: 10.1016/J.WEAR.2015.02.053.
- [28] Ding H. et al., "Effect of laser claddings of Fe-based alloy powder with different concentrations of WS2 on the mechanical and tribological properties of railway wheel," *Wear*, vol. 488–489, p. 204174, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.WEAR.2021.204174.
- [29] Zhu Y., Yang Y., Mu X., Wang W., Yao Z., Yang H., "Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels," *Wear*, vol. 430–431, pp. 126–136, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.WEAR.2019.04.028.
- [30] Hernandez-Martinez J.; Santamaria J.; Arrizubieta J.I., Correa N., "Experimental evaluation of novel alloy powders for extending service life of railway wheels worn by use", *Wear*, p. 205945, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.WEAR.2025.205945.
- [31] UNE-EN 13262, Railway applications. Wheelsets and bogies. Wheels. Product requirements. European Standard, 2021.
- [32] Urresti A., Murua O., Arrizubieta J. I., Lamikiz A., "In-situ monitoring of the DED-LB process for defect detection," *Procedia CIRP*, vol. 124, pp. 314–317, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PROCIR.2024.08.125.
- [33] ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, 2017.
- [34] Duan S., Ren W., Lei W., Wang Y., "Study on the microstructure and properties of rail cladding layer after laser quenching," *J Manuf Process*, vol. 108, pp. 180–193, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2023.10.079.
- [35] Li N., Wang Q., Niu W., Han P., Guo N., Li S., "Microstructure and wear behaviors of 17-4 PH stainless steel fabricated by laser cladding with post laser shock peening treatment," *Wear*, vol. 538–539, p. 205207, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.WEAR.2023.205207.
- [36] Kendall O., Fasihi P., Abrahams R. Paradowska A. "Application of a New Alloy and Post Processing Procedures for Laser Cladding Repairs on Hypereutectoid Rail Components," *Materials*, vol. 15, no. 15, 2022, doi: 10.3390/ma15155447.
- [37] Narayanan A., Mostafavi M., Pirling T., Kabra S., "Residual stress in laser cladded rail," *Tribol Int*, vol. 140, p. 105844, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2019.105844.
- [38] Chen W., Xu L., Han Y., Zhao L., Jing H., "Control of residual stress in metal additive manufacturing by low-temperature solid-state phase transformation: An experimental and numerical study," *Addit Manuf*, vol. 42, p. 102016, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.102016.
- [39] Rahman Rashid R. A., Nazari K.A., Barr C., Palanisamy S., "Effect of laser reheat post-treatment on the microstructural characteristics of laser-cladded ultra-high strength steel," *Surf Coat Technol*, vol. 372, pp. 93–102, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2019.05.021.

- [40] Wright R. N., "Relevant Aspects of Carbon and Low Alloy Steel Metallurgy," *Wire Technology*, pp. 199–228, Jan. 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-382092-1.00014-2.
- [41] Archard J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, 1953, doi: 10.1063/1.1721448.
- [42] Poshtahani A. G., Roostaie S., Azadi M., "Plasma nitriding effect on tribological and corrosion properties of Stellite 6 and 12 PTA weld clad hardfaced on stainless steel 410," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 11, p. 100108, May 2023, doi: 10.1016/J.RSURFI.2023.100108.
- [43] Suh J., Chun Y. B., Jin H. H., Kang S. H., Han H. N., "Control of the grain structure and wear behavior of a Y₂O₃ nanoparticle dispersed Stellite 6 alloy fabricated by laser-directed energy deposition," *J Alloys Compd*, vol. 1002, p. 175326, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2024.175326.
- [44] Ostolaza M., Zabala A., Arrizubieta J. I., Llavori I., Otegi N., Lamikiz A., "High-temperature tribological performance of functionally graded Stellite 6/WC metal matrix composite coatings manufactured by laser-directed energy deposition," *Friction*, vol. 12, no. 3, pp. 522–538, 2024, doi: 10.1007/s40544-023-0790-2.
- [45] Glascott J., Stott F. H., Wood G. C., "The effectiveness of oxides in reducing sliding wear of alloys," *Oxidation of Metals*, vol. 24, no. 3, pp. 99–114, 1985, doi: 10.1007/BF00664227.
- [45] Rowe W. B., "Mechanics of Abrasion," *Principles of Modern Grinding Technology*, pp. 341–363, Jan. 2009, doi: 10.1016/B978-0-8155-2018-4.50023-9.
- [46] Rowe W.B., "Mechanics of Abrasion," *Principles of Modern Grinding Technology*, pp. 341–363, Jan. 2009, doi: 10.1016/B978-0-8155-2018-4.50023-9.
- [47] Harrison H., "Producing and Measuring the 3rd Body Layer," in *Proceedings of the 2020 Joint Rail Conference*, St. Louis, Missouri, USA: Joint Rail Conference, Apr. 2020, doi: 10.1115/JRC2020-8095.