






## Evaluación microestructural y mecánica del recubrimiento duro de Stellite 6 depositado por láser sobre acero inoxidable austenítico 316L

### Microstructural and mechanical evaluation of Stellite 6 hard coating laser-deposited on austenitic stainless steel 316L

A.I. Callejas-Hernández <sup>a</sup>, V.M. López-Hirata <sup>a,\*</sup>, M.L. Saucedo-Muñoz <sup>a</sup>, V. Miranda-López <sup>a</sup>,  
N.A. López-López <sup>a</sup>

<sup>a</sup>. Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, 07300, CDMX, México

#### Resumen

En el presente trabajo se llevó a cabo la evaluación del recubrimiento Stellite-6 por deposición láser sobre un acero inoxidable austenítico AISI 316L para incrementar su resistencia al desgaste. La caracterización microestructural se realizó de forma experimental haciendo uso de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. La caracterización mecánica del recubrimiento se obtuvo mediante un perfil de microdureza Vickers, así como por la evaluación de la resistencia al desgaste y coeficiente de fricción. La microestructura del recubrimiento Stellite-6 está compuesta por la fase  $\alpha$  rica en Co y carburos tipo  $M_7C_3$ , lo que concuerda con lo obtenido con los cálculos de Thermo-Calc. El recubrimiento Stellite-6 proporciona mayor resistencia al desgaste debido a la presencia de un microconstituyente eutéctico  $\alpha$  rico en Co y carburos de tipo  $M_7C_3$ . La zona de la intercara entre el Stellite-6 y el acero presenta una microestructura homogénea. Los resultados de la caracterización microestructural mostraron buena concordancia con los de Thermo-Calc.

**Palabras Clave:** Recubrimiento duro, Stellite 6, evolución microestructural, depositado por láser thermo-calc, propiedades mecánicas.

#### Abstract

In the present work, the evaluation of the Stellite-6 coating on 316 L austenitic stainless steel was carried out to increase the wear resistance. Microstructure characterization of the coating was conducted by optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis. The mechanical characterization of the coating included Vickers hardness, wear resistance and friction coefficient determination. The microstructure of Stellite-6 consisted of Co-rich  $\alpha$  phase and  $M_7C_3$  carbides, which agrees with Thermo-Calc calculations. The wear resistance of Stellite-6 is attributable to the presence of a eutectic microconstituent composed of  $\alpha$  phase and  $M_7C_3$  carbides dispersed in the Co-rich  $\alpha$  phase. The interface between Stellite-6 and steel showed a homogeneous microstructure. Experimental results are consistent with the Thermo-Calc ones.

**Keywords:** Hard coating, Stellite 6, microstructure evolution, laser deposition thermo-calc, mechanical properties.

#### 1. Introducción

El desarrollo de tecnología de películas delgadas trajo consigo el avance en los recubrimientos metálicos duros, los cuales se caracterizan por poseer alta dureza, puntos de fusión altos y alta resistencia al ataque químico. Estas características han marcado su uso en aplicaciones industriales donde se requieren superficies con una o más de estas propiedades. La

aplicación de recubrimientos metálicos duros ha permitido incrementar la vida útil de diversos componentes industriales y obtener dispositivos más eficientes, logrando con ello reducir los costos de producción, ahorrar energía, mejorar la seguridad y optimizar el uso de recursos materiales. Este hecho se debe principalmente a que los recubrimientos de este tipo modifican las propiedades tribológicas del sustrato mediante la selección del tipo de proceso de deposición utilizado y la naturaleza

\*Autor para la correspondencia: [vmlopezh@ipn.mx](mailto:vmlopezh@ipn.mx)

**Correo electrónico:** [acallejash1400@alumno.ipn.mx](mailto:acallejash1400@alumno.ipn.mx) (Alondra Ibeth Callejas-Hernández), [vmlopezh@ipn.mx](mailto:vmlopezh@ipn.mx) (Víctor Manuel López-Hirata), [msaucedom@ipn.mx](mailto:msaucedom@ipn.mx) (Maribel Leticia Saucedo-Muñoz), [vmirandal1600@alumno.mx](mailto:vmirandal1600@alumno.mx) (Valeria Miranda-López), [nlopez11800@alumno.ipn.mx](mailto:nlopez11800@alumno.ipn.mx) (Nora Azeneth López-López).

química del recubrimiento, ejemplo de ello es la serie de recubrimientos Stellite (Holberg y Mathews, 2009).

Los recubrimientos duros de la serie Stellite (Haasan, 2016) son aleaciones base cobalto que consisten en la formación un carburo complejo disperso en una matriz metálica; estos son resistentes al desgaste y a la corrosión, manteniendo dichas propiedades a altas temperaturas.

En las últimas décadas se han desarrollado numerosos procesos de deposición buscando hacer más eficiente la interacción recubrimiento-sustrato y de esta forma reducir el daño generado en sistemas mecánicos. Se ha demostrado que el proceso por deposición láser (Toyserkani, y colaboradores, 2005) es uno de los procesos más efectivo cuando se busca tener buena precisión dimensional y control sobre entrada de calor, para poder obtener una zona afectada por el calor reducida. Durante el proceso de deposición ocurren transformaciones de fases de no equilibrio que necesitan estudiarse para entender el desempeño mecánico de los recubrimientos, como lo es el proceso de solidificación; por ello se han desarrollado diversos programas comerciales que hoy en día se utilizan para la predicción de las fases de equilibrio y no equilibrio de aleaciones multicomponentes aún en estado de colada, como es el caso del software Thermo-Calc (Thermo-Calc. 2025)

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es la caracterización microestructural de forma experimental y numérica con Thermo-Calc del recubrimiento Stellite-6 depositado por láser sobre una flecha redonda de 10 cm de diámetro acero inoxidable austenítico AISI 316L, así como analizar el efecto de la microestructura sobre la resistencia al desgaste del recubrimiento.

## 2. Metodología numérica

El programa de cómputo Thermo-Calc (Anderson y colaboradores, 2002) utilizó las bases de datos termodinámica TCNi9 y de difusión o movilidad atómica MobNi6 (Thermo-Calc, 2025). Adicionalmente, se requiere proporcionar la composición química del Stellite-6. Este programa permitió determinar las fases de equilibrio y no equilibrio usando el módulo Scheil.

## 3. Metodología experimental

La composición química del Stellite se ilustra en la tabla 1. Esta aleación es una aleación base Co con una gran cantidad de elementos formadores de carburos tales como, W, Mo y Cr. Estos carburos le otorgan la resistencia al desgaste y protección contra la corrosión.

El recubrimiento se realizó sobre una flecha redonda de 100 mm de diámetro de un acero inoxidable austenítico AISI 316L. La superficie de la flecha estaba como se recibió, con un acabado liso y brillante. No fue requerido precalentamiento, ni tratamiento posterior en la flecha. En la Tabla 2 se encuentran las condiciones de operación del láser con las que se realizó el recubrimiento duro.

Ni	4.29
Si	1.03
Mn	2.0
C	0.74
Mo	0.43
Co	Bal.

Tabla 2: Condiciones de operación del depósito Láser.

Parámetro	Valor
Densidad de Potencia	150 W/mm <sup>2</sup>
Velocidad de alimentación del polvo	7.0 g/min
Velocidad de avance	650.0 mm/min
Flujo de gas Ar en el Láser	6.0 L/min
Flujo de gas Ar en el polvo	4.0 L/min

La muestra del recubrimiento se obtuvo en una cortadora metalográfica. Esta muestra se preparó metalográficamente y se atacó con un reactivo de Vilella, 5 ml HCl, 1 g de ácido pícrico en 10 ml de etanol. La muestra atacada se observó en un microscopio óptico MO Nikon MA200 y en un microscopio electrónico de barrido MEB JEOL 6300 a 40 kV, con electrones secundarios, equipado con microanálisis químico EDX La muestra se analizó por difracción de rayos X con barrido continuo en un difractómetro Bruker D8 Advanced con radiación  $\alpha$  de cobre de 20 a 120° con una velocidad de barrido de 1°/min. Asimismo, se determinó la dureza Vickers en un microdurómetro Future-Tech modelo F-410 con 200 g y 12 s, siguiendo la norma ASTM (ASTM E-92, 2024). La prueba de desgaste fue pin-on-disk en un tribómetro CESM con una carga de 5 N y una distancia de recorrido de 300 m, usando como penetrador (pin) una bola de WC con un diámetro de 5 mm. Los resultados fueron la determinación del coeficiente de fricción como una función de la distancia de recorrido y la pérdida de peso por desgaste. También se midió la profundidad de la huella con un rugosímetro marca Mitutoyo con una distancia de barrido de 3mm.

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Fases de Equilibrio

La Figura 1 muestra que el líquido es estable por arriba de 1320 °C. La solidificación eutéctica aparece alrededor de 1285 °C; es decir,  $L \rightarrow \alpha + M_7C_3$ . La fase  $\alpha$  tiene una estructura cristalina bcc y el carburo  $M_7C_3$  es hexagonal y rico en Cr. Al disminuir la temperatura, el carburo  $M_7C_3$  puede transformar en el carburo rico en Cr  $M_{23}C_6$  con estructura fcc. A temperaturas más bajas continua la presencia de la fase  $\alpha$ . La resistencia al desgaste del Stellite-6 se basa en una mezcla de la fase  $\alpha$  y el eutéctico compuesto por  $\alpha + M_7C_3$ .

Tabla 1: Análisis químico del Stellite 6.

Elemento	% peso
Cr	26.38
Fe	11.58
W	4.80

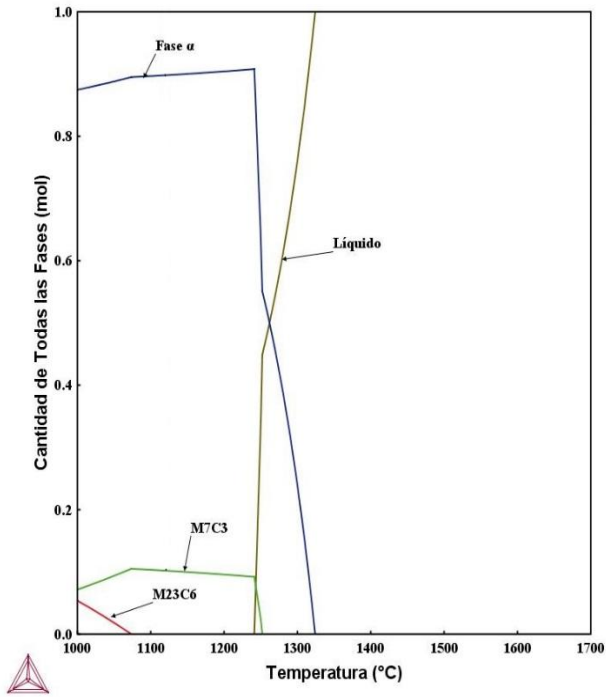


Figura 1: Gráfica de Thermo-Calc para fracción volumen de las fases vs. temperatura para el Stellite en condiciones de equilibrio.

Durante la solidificación la primera fase sólida que se forma es la fase  $\alpha$  en forma dendrítica y posteriormente el carburo rico en Cr  $M_7C_3$ . Subsecuentemente, el carburo rico en Cr  $M_{23}C_6$  y la fase Lave también se pueden formar. Esto es, la microestructura en estado de colada está compuesta por dendritas de la fase  $\alpha$  y el eutéctico,  $\alpha + M_7C_3$ .

### 4.3. Caracterización Microestructural

La micrografía del MEB del recubrimiento de Stellite 6 se presenta en la Figura 3. Asimismo, el microanálisis EDS se muestra en la Figura 4. Esta Figura muestra claramente que las dendritas de la fase  $\alpha$  son ricas en Co, Cr y Fe. Se tiene alrededor de 35 % vol., del eutéctico y 65 % vol. de la fase  $\alpha$ . La velocidad del enfriamiento del depósito para este proceso es alrededor de 100 °C/s.

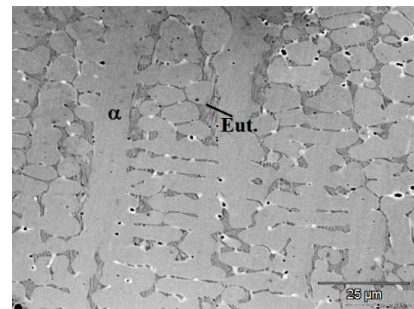


Figura 3: Micrografías del MEB para el recubrimiento de Stellite.

### 4.2. Fases de No Equilibrio

Por otro lado, la Figura 2 ilustra la gráfica de Scheil (Porter y colaboradores, 2021), temperatura contra fracción mol de sólido, en condiciones de no equilibrio.

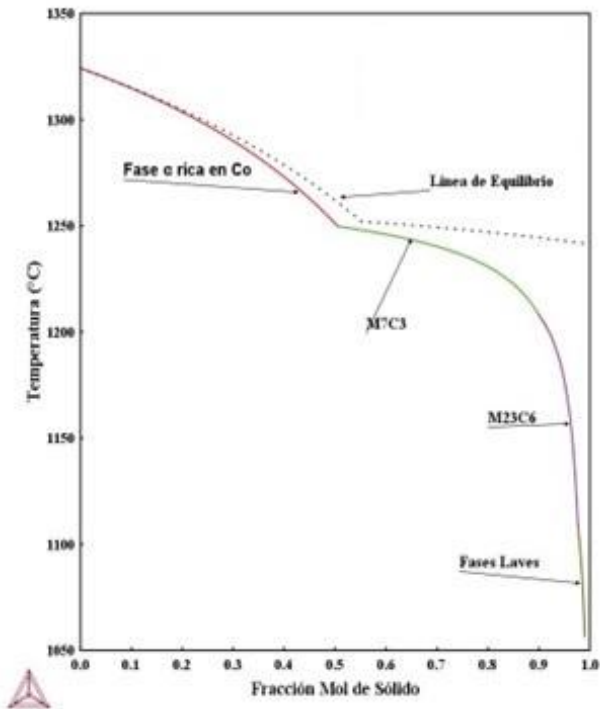


Figura 2: Diagrama de Thermo-Calc de Scheil, temperatura vs. fracción mol de sólido para el Stellite 6 en condiciones de no equilibrio.

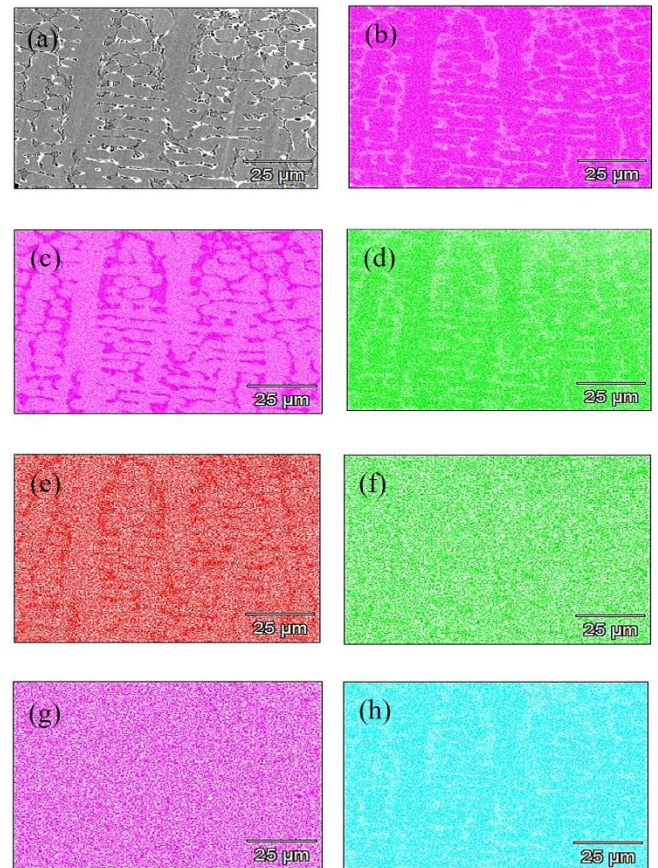


Figura 4: Micrografías del (a) MEB y mapeo elemental EDS de (b) Co, (c) Cr, (d) Fe, (e) Mn, (f) W, (g) Mo y (h) Ni para el recubrimiento de Stellite.

En contraste, el eutéctico tiene Cr, W y Mn, principalmente localizado en el carburo  $M_7C_3$ , lo cual concuerda con los resultados de Thermo-Calc por ejemplo a 500 °C, la fase  $\alpha$  contiene principalmente 56 % Co, 23.0 % Cr, 11.3 % Fe y 5.20 % Ni, mientras que el carburo  $M_7C_3$  está formado primariamente por 8.5 % C, 9 % Co, 73.5 % Cr, 3.5 % Fe, 5 % Mn y 3.5 % W

El patrón de difracción de rayos X, mostrado en la Figura 5, confirma las fases predichas por Themo-Calc y la observación en el MEB para el Stellite-6. Esto es, los picos de difracción corresponden principalmente con el carburo  $Cr_7C_3$ , JCPDS No.11-0550, y la fase  $\alpha$  rica en Co, JCPDS No. 150806 (JCPDS, 2025).

La Figura 6 ilustra la micrografía del MEB para la sección transversal del recubrimiento que incluye el acero inoxidable, zona de unión y el recubrimiento de Stellite. El espesor del recubrimiento fue de aproximadamente 600  $\mu m$ . Aquí se muestra la presencia de la fase  $\alpha$ , el eutéctico  $\alpha + M_7C_3$  y la austenita del acero inoxidable. La penetración del Stellite 6 fue uniforme y se observa la presencia de carburos  $M_7C_3$  en la zona de unión. No se detectó la presencia de carburos del tipo  $M_{23}C_6$ .

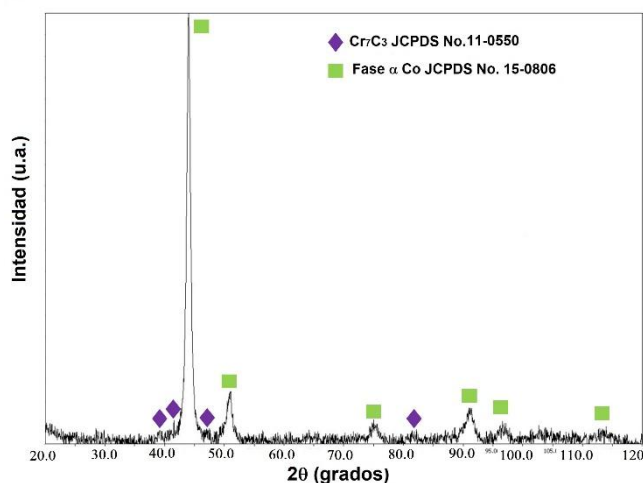


Figura 5: Patrón DRX para el recubrimiento de Stellite (JCPDS, 2025).

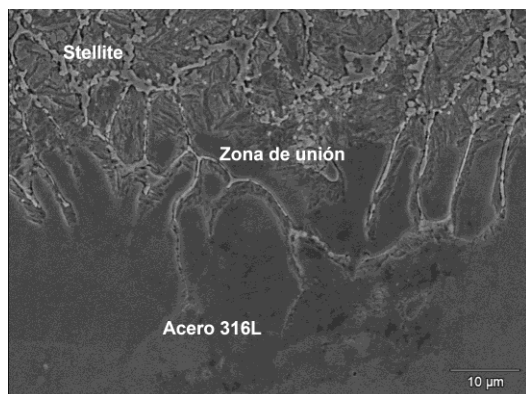


Figura 6: Micrografías del MEB para el recubrimiento de Stellite en su sección transversal.

#### 4.4. Propiedades Mecánicas

El perfil de dureza Vickers se determinó desde el sustrato hacia el recubrimiento de Stellite 6 y se ilustra en la Figura 7. La dureza del acero inoxidable AISI 316L es de aproximadamente 194 HV, mientras que la dureza promedio del recubrimiento duro de Stellite 6 es aproximadamente 510 HV. En la literatura se reportan valores entre 390 y 500 HV para este recubrimiento (Haasan y colaboradores, 2016), lo que concuerda con los vales de este trabajo.

Por otra parte, la Figura 8 muestra la gráfica del coeficiente de fricción contra la distancia de recorrido para el recubrimiento de Stellite-6, así como para el acero inoxidable. En el comportamiento de las curvas obtenidas se destacan tres etapas características: un súbito aumento del coeficiente cuando el pin o penetrador de carburo de tungsteno hace contacto con la muestra, luego un aumento moderado con la distancia y por último la etapa donde se estabiliza el coeficiente de fricción respecto a la distancia recorrida. En el caso del acero, el coeficiente de fricción aumenta continuamente hasta aproximadamente 250 m para alcanzar un valor aproximado de 0.8. La curva del Stellite-6 permanece por debajo de la del metal base, con un coeficiente de fricción de 0.65. Este hecho sugiere que el desgaste generado por el penetrador de carburo de tungsteno sobre el recubrimiento no ha sido mayor que 0.6 mm de profundidad (medida del espesor del recubrimiento). En general, el mecanismo de desgaste observado en el Stellite-6 fue de tipo abrasivo debido a la presencia de partículas duras de carburo  $M_7C_3$ .

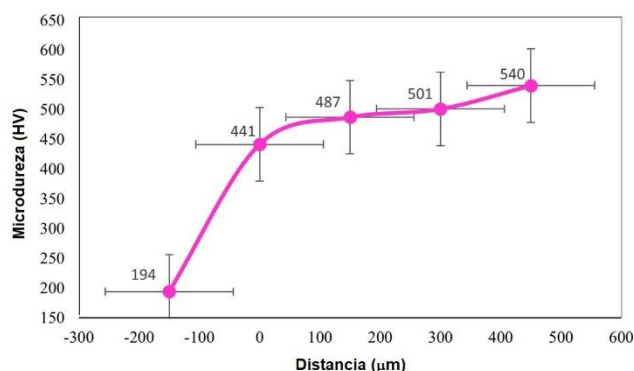


Figura 7: Perfil de dureza Vickers del recubrimiento de Stellite.

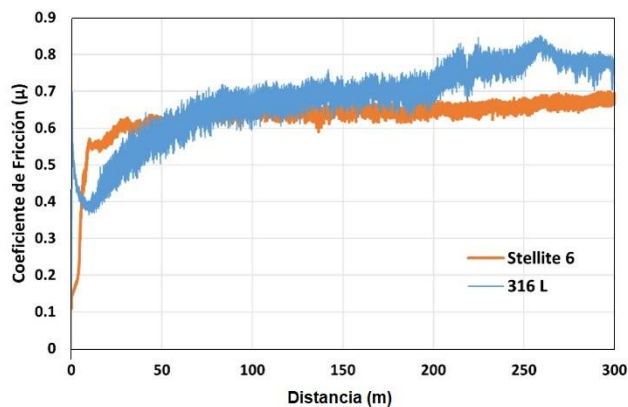


Figura 8: Gráfica de coeficiente de fricción contra distancia de recorrido para el recubrimiento y el acero.

La Figura 9 muestra la gráfica de rugosidad para el recubrimiento y para el sustrato, y se aprecia que el acero presenta mayor irregularidad en su superficie en comparación con los resultados obtenidos para el recubrimiento Stellite-6.

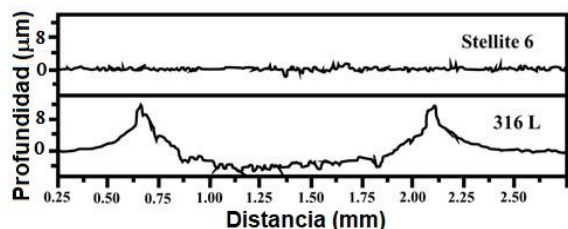


Figura 9: Gráfica de rugosidad, profundidad versus distancia en la huella para los materiales ensayados con el tribómetro.

## 5. Conclusiones

Se llevó a cabo un estudio de la evaluación microestructural y mecánica del recubrimiento Stellite-6 depositado por láser sobre un acero inoxidable austenítico AISI 316L y las conclusiones son:

- Las fases y observadas en el recubrimiento Stellite-6, dendritas de la fase  $\alpha$  rica en Co y carburos tipo  $M_7C_3$  en la región interdendrítica, concuerdan con las predichas por el módulo Scheil de Thermo-Calc para condiciones de no equilibrio.
- El recubrimiento del Stellite-6 por deposición láser fue uniforme y adherente lo que proporcionó una mayor resistencia al desgaste que el sustrato debido a la presencia de un microconstituyente eutéctico,  $\alpha + M_7C_3$ , duro y disperso sobre una matriz dúctil de la fase  $\alpha$  rico en Co.

- La zona de la intercara entre el Stellite-6 y el acero inoxidable austenítico AISI 316L presenta una microestructura homogénea, concordando con lo esperado por método de deposición láser.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de IPN- SIP-Beifi-IPN.

## Referencias

- ASTM E-92. (2024). Standard test method for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials, ASTM.
- Andersson, J-O., Helander, T., Hoglund, L., Shi, P. y Sundman, B. (2002). THERMO-CALC & DICTRA, Computational tools for materials science. *Calphad*, 26, 273-312.
- Hasan, S., Mazid, A. y Clegg, R. E. (2016). The basics of stellites in machining perspective. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture* 13, 36-38.
- Holmberg, K. y Matthews, A. (2009). *Coatings tribology: properties, Mechanisms, techniques and applications in surface engineering*. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.
- JCPDS. (2025). X-ray data base. ICDD.
- Porter, D.A., Easterling, K.E. y Sherif, M.Y. (2021). *Phase transformations in metals and alloys*, CRC press, EUA.
- Thermo-Calc (2025). Thermo-Calc Software.
- Toyserkani, E., Corbin, S. y Khajepour, A. (2005). *Laser cladding*. CRC Press, EUA.