

## EFECTO DE LA ENERGÍA PROMEDIO EN EL CRECIMIENTO DE PARTÍCULAS DE WC EN RECUBRIMIENTOS DE WC-10Co-4Cr MEDIANTE LASER CLADDING

# TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN MANUFACTURA AVANZADA

PRESENTA

M en C. ENRIQUE ALEJANDRO LÓPEZ BALTAZAR ASESOR: DR. VÍCTOR HUGO BALTAZAR HERNÁNDEZ

AGUASCALIENTES, AGUASCALIENTES, JUNIO 2020.

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES Avenida Ramón López Velarde No. 801, Centro, Zacatecaa, Naisico, C.P. 98000 Tel. +52 (492) 925 6500 ext. 4261, 4265 e-mail: vidor baltazar@uaz.edu.mx http://muteriales.uaz.edu.ma

MCIM-2020-06

Zacatecas, Zacatecas 12/02/2020

Mtro. Geovany González Carlos

Coordinador Académico de Posgrado

CIATEQ, A.C.

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del M en C. Enrique Alejandro López Baltazar, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Efecto de la energía promedio en el crecimiento de particulas de WC en recubrimientos de WC-10Co-4Cr mediante laser cladding", autorizo que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de Doctor en Manufactura Avanzada.

Sin más por el momento, me despido enviándole un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Victor Hugo Baltazar Hernández Coordinador de la Maestria en Ciencia e Ingeniería de los Materiales



MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES



Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Saltillo, Coahuila, 07 de Mayo del 2020.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero Directora de Posgrado CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **Enrique Alejandro López Baltazar**, cuyo título es:

## "Efecto de la energía promedio en el crecimiento de partículas de WC en recubrimientos de WC-10Co-4Cr mediante laser cladding"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. Jose Jorge Ruíz Mondragón Profesor Investigador COMIMSA

), Col. Saltillo 400, CP. 25290, Saltillo, Coah., México. /w.comimsa.com.mx



## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR





Querétaro, Querétaro, 11 de mayo del 2020.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero Directora de Posgrado CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **M en C. ENRIQUE ALEJANDRO LÓPEZ BALTAZAR**, cuyo título es:

"EFECTO DE LA ENERGÍA PROMEDIO EN EL CRECIMIENTO DE PARTÍCULAS DE WC EN RECUBRIMIENTOS DE WC-10Co-4Cr MEDIANTE LASER CLADDING"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Corporativo, Qro.

+52 (442) 211 2600

01 800 800 3798 | mkt@ciateg.mx

www.ciateq.mx

#### AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme su bendición en la vida, salud y la oportunidad de finalizar una etapa más en mi formación académica y superación personal.

A mi familia que a lo largo de este camino de preparación estuvieron a mi lado dándome aliento, su tiempo y espacio en cada situación familiar, laboral, académica y apoyarme en infortunios en este Doctorado. Gracias a mi esposa Sandra Dávila y mis hijos Damián Alejandro y Elías, los amo muchísimo.

A mi familia que a lo largo de mi vida he recibido su apoyo incondicional, así como las herramientas que me han proporcionado para lograr ser un buen humano, y desarrollarme profesional y laboral. Gracias a mi querido Padre Alejandro López Ibarra, mi hermosa madre Elena de los Santos Baltazar Castro y a mi estimada y querida hermana Yessica López Baltazar.

A mi asesor el Dr. Víctor Hugo Baltazar Hernández por orientarme académicamente en esta etapa del Doctorado, brindarme su apoyo, sus grandes consejos, contagiarme de su calma en afrontar contratiempos en la creación del artículo y a lo largo de esta investigación, Gracias.

Por otra parte, le agradezco a la Dra. Haideé Ruiz Luna por su interés, aportación y consejos para aventurarme en la generación de este estudio por el proceso de Laser Caldding.

Reconocer al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por facilitar el equipo de Laser Cladding y generar los recubrimientos, reconocer su apoyo al Dr. Juansethi Ibarra Medina en la etapa de parametrización y Dr. Juan Manuel Alvarado Orozco por el acceso al equipo.

Al Dr. José Jorge Ruiz Mondragón por su enorme apoyo en la disposición y manejo del equipo de MEB, sus consejos y experiencia en el tema, por otra parte quiero agradecerle la colaboración a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A de C.V. en la ciudad de Saltillo. Reconocimiento a CIATEQ (Centro de Tecnología Avanzada) sede Aguascalientes por abrirme sus puertas y brindarme el conocimiento académico para mi formación como Doctor en Manufactura.

A la Universidad Autónoma de Zacatecas por contribuir en la realización de esta investigación y obtención del grado, la cual me otorgó consentimiento en permisos laborales y de un gran apoyo económico.

También quiero agradecer a todos mis compañeros que laboran con un servidor en la Universidad Autónoma de Zacatecas que aportaron su conocimiento en la obtención de cortes para caracterización, metalografía, medición mediante software, entre otros, en cada momento de la investigación.

Finalmente, a todos mis queridos alumnos de nivel licenciatura y maestría que entendían algunas ausencias, pero les expresaba que todo esto es para su bien, con el objetivo de prepararnos y generar nuevo conocimiento, y darles a conocer nuevos procesos de manufactura que podemos implementar en nuestra alma máter la Benemérita Universidad Autónoma de Zacatecas.

Gracias a todos.

Atentamente

Enrique Alejandro López Baltazar

#### RESUMEN

En esta investigación, se analizó la evolución microestructural de los depósitos de polvo WC-10Co-4Cr, mediante el proceso de revestimiento por láser (Laser Cladding-LC) sobre un sustrato de acero AISI-SAE 1020, se configuró el proceso de LC a diferentes valores de energía promedio por unidad de área; los revestimientos se obtuvieron empleando un láser Yb: YAG. Todas las muestras se caracterizaron en sus secciones transversales a los depósitos.

Los resultados indicaron que de acuerdo con los parámetros seleccionados para el revestimiento por el proceso de LC; la dilución se encuentra entre 15 y 25% para la mínima y máxima energía suministrada respectivamente, y con respecto a la porosidad resultó por debajo de 12%. Según los análisis de la microestructura; se desarrolla un considerable crecimiento de grano de WC dentro de la sección central del revestimiento (región interna); además, se observa el desarrollo de morfología triangular y/o poligonal junto con una clara reducción de la dureza cuando se emplea una entrada de alta energía. Cabe señalar que, a pesar de los rápidos ciclos térmicos desarrollados en el proceso de LC con WC-10Co-4Cr; se presenta el crecimiento del grano el cual se atribuye al mecanismo de coalescencia debido a la no presencia de interfaces entre partículas al ser observadas por MEB de WC en partículas más grandes.

Finalmente, la presencia de pequeñas partículas redondeadas o elipsoidales dentro de la región interna del revestimiento es asociada a partículas no fusionadas debido a la dispersión no homogénea y la falta de partículas de WC con forma facetada.

**Palabras clave:** Ingeniería y tecnología, Tecnología de materiales, Propiedades de los materiales, WC-10Co-4Cr, Laser cladding, Energía promedio por unidad de área, Crecimiento de grano.

#### ABSTRACT

In this investigation, the microstructure evolution of the laser cladding WC-10Co-4Cr powder deposited on AISI-SAE 1020 steel substrate was evaluated by establishing different values of average energy per unit area by employing a Yb: YAG laser system. Results indicated that according to the selected laser cladding parameters; dilution and porosity lied within established acceptable ranges.

According to the microstructure evaluation; considerable grain growth is revealed within the central area of the clad (namely inner region); furthermore, the development of triangular and/or polygonal morphology along with a clear reduction in hardness is observed when using high energy input. It is worth noting, that in spite of the rapid thermal cycles developed upon laser cladding processing of WC-10Co-4Cr; grain growth is accredited to the coalescence mechanism due to the complete merge of WC into larger particles.

Finally, the presence of small rounded or ellipsoidal particles within the inner region of the clad imply non-merged particles due to inhomogeneous dispersion and lack of faced shaped WC particles.

**Keywords:** Engineering and technology, Materials technology, Materials properties, WC-10Co-4Cr, Laser cladding, Average energy per unit area, Grain growth.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

resumen		VI
ABSTRAC	Т	VII
ÍNDICE D	ECONTENIDO	VIII
ÍNDICE D	EFIGURAS	XI
ÍNDICE D	ETABLAS	XV
1. INTRO	DDUCCIÓN.	1
1.1 A	NTECEDENTES.	2
1.2 E	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	4
1.3 J	USTIFICACIÓN.	5
1.4 (	DBJETIVO GENERAL.	6
1.4.1	Objetivos específicos.	6
1.5 H	IIPÓTESIS.	6
2. MAR	CO TEÓRICO.	7
2.1 0	GENERALIDADES DEL RECUBRIMIENTO WC-Co-Cr.	7
2.2 L	ASER CLADDING.	9
1.5.1	Parámetros del recubrimiento por láser.	11
2.2.1	Forma del pulso del láser.	15
2.2.2	Energía promedio por unidad de área efectiva ( $E_{\alpha}$ ).	16
2.3 🗟	ECUBRIMIENTOS MEDIANTE EL PROCESO DE LÁSER CON POLVO	) WC-Co.18
2.3.1	Microestructura en recubrimiento con láser con WC-Co.	19

2.3.2 Propiedades mecánicas mediante recubrimiento por láser con WC-Co. 21

2.3.3 Mecanismo de porosidad en recubrimientos mediante láser en polvos WC-Co.22

	2.3.	.4	Crecimiento de partículas de WC.	22
3.	ME	IOD	OLOGÍA, MATERIAL, EQUIPO Y PROCEDIMIENTO.	27
	3.1	ME	TODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	27
	3.2	MA	TERIAL.	28
	3.3	EQ	UIPO.	31
	3.4	PRC	OCEDIMIENTO.	34
	3.4.	1	Preparación del sustrato.	34
	3.4. pol	.2 vo V	Calibración y determinación del sistema del flujo de alimentación VC-10Co-4Cr.	del 34
	3.4.	.3	Calibración de la trayectoria del láser y sujeción del sustrato.	37
4.	PAF 39	RAM	ETRIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE POLVO WC-10Co-4Cr POR LÁS	ER.
	4.1 LÁSEF	PAI R.	rametrización de recubrimientos de polvo wc-10co-4cr p	OR 39
	4.2 MEDI	AN ANTI	ÁLISIS MACROESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENID E EL PROCESO DE LC CON POLVO DE WC-10CO-4CR.	)OS 47
5.	AN.	Álisi	IS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.	53
,	5.1	PO	rosidad y dilución.	53
	5.2	MIC	CROESTRUCTURA.	55
	5.3	FAS	SES.	60
				IX

5.4	MICRODUREZA.	61
5.5	INFLUENCIA DE LA ENERGÍA PROMEDIO POR UNIDAD DE ÁREA ( $E_a$ ).	62
CONC	lusiones.	69
APORTACIÓN DE LA TESIS.		71
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.		72
recomendaciones.		73
REFERE	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	74
ANEXC	DS.	1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Cristal de WC [12]7
Figura 2-2 Esquema del proceso de recubrimiento por láser [27]11
Figura 2-3 Geometría de un revestimiento mediante láser [27]13
Figura 2-4 Forma del láser pulsante, donde E es la energía, W es ancho del pulso, y F la frecuencia del pulso [27]16
Figura 2-5 Imagen mediante MEB de muestra recubierta mediante el proceso LC con polvo de WC-12Co [19]20
Figura 2-6 a) Evidencia del proceso de coalescencia en partículas de WC en sinterizado en polvo de WC-10Co, b) porosidad remanente y eliminación de los límites de grano de la partícula de WC [78]
Figura 2-7 Granos de WC adheridos con un tamaño menor a 40 nm [82]25
Figura 3-1 Diagrama de bloques de la metodología experimental en recubrimientos mediante el proceso de LC de WC-10Co-4Co28
Figura 3-2 Elementos químicos mediante la técnica de EDS, a) Polvo de WC-10Co- 4Cr, b) W, c) Co, d) Cr y e) W-Co-Cr
Figura 3-3 Sección transversal de la partícula del polvo WC-10Cr-4Co a 10.0 kx, HV: 15 kV, WD 29.71 mm y Det: BSE31
Figura 3-4 Equipo láser para realizar recubrimiento mediante LC y manufactura aditiva, a) Laboratorio de manufactura aditiva, b) Controlador ABB de brazo robótico y c) Equipo de alimentación de polvos mediante transportador de oscilación
Figura 3-5 a) Ventana de caída del polvo mediante un sistema de transportador oscilatorio y b) Control de dosificación del flujo másico en % de trabajo y flujo del gas transportador (L/min)

Figura 3-6 Obtención del flujo másico del polvo WC-10Co-4Cr36
Figura 3-7 a) Alineación del láser y b) Sistema de sujeción de muestras38
Figura 3-8 a) Proceso mediante LC y b) enfriamiento de la muestra posterior a la trayectoria del recubrimiento
Figura 4-1 Condiciones de las 30 muestras en el proceso de parametrización del proceso LC con polvo WC-10Co-4Cr
Figura 4-2 Graficas estadísticas de efecto de los parámetros sobre la energía promedio por unidad de área $E_a$ , a) Grafico de Pareto, b) Efectos principales, c) y d) $E_a$ vs potencia y velocidad de avance
Figura 4-3 Graficas estadísticas de efecto de los parámetros sobre el porcentaje de dilución %D, a) Grafico de Pareto, b) Efectos principales, c) %D vs potencia y velocidad de avance y d) %D vs potencia y pulsos activos42
Figura 4-4 Graficas estadísticas de efecto de los parámetros sobre la altura (h), a) Grafico de Pareto, b) Efectos principales, c) Altura vs potencia y pulsos activos y d) Altura vs potencia y velocidad de avance
Figura 4-5 Análisis en sección transversal de los recubrimientos 3, 4, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23 y 24
Figura 4-6 Recubrimientos por láser con onda continua, a) Ea24, b) Ea26, c) Ea29, d) Ea32 y e) Ea39
Figura 4-7 Recubrimientos por láser con onda discontinua con pulsos de 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.a) Ea16, b) Ea18, c) Ea21 y d) Ea2451
Figura 4-8 Recubrimientos por láser con onda discontinua con pulsos de 14 ms y una frecuencia de 50 Hz. a) $E_{a26}$ , b) $E_{a29}$ , c) $E_{a32}$ y d) $E_{a39}$
Figura 4-9 Recubrimientos por láser con onda discontinua con pulsos de 10 ms y una frecuencia de 50 Hz

Figura 5-3 Macrografías de corte transversal de las muestras con revestimiento por láser: a)  $E_{a24}$ , b)  $E_{a32}$ , c)  $E_{a39}$  y d) Esquema que indica varias regiones dentro del revestimiento de estudio. Condición: MAG: 91 x, HV: 15.0 kV, WD 17.83 mm y Det: BSE.

Figura 5-6 Mapeo lineal mediante EDS-MEB. a) Perfil de recubrimiento de la muestra  $E_{\alpha 39}$ , b) mapa de exploración lineal y c) EDS de exploración lineal......60

Figura 5-7 Patrones de DRX de las muestras de revestimiento de láser depositadas utilizando diferentes energías promedio de $E_{a39}$ ,  $E_{a32}$ ,  $E_{a24}$ y polvo de WC-10Co-4Cr.

Figura 5-8 Perfil de microdureza del revestimiento para  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y $E_{a39}$ .....62

 Figura 10-1 Energía lineal entrada con respecto a la velocidad de enfriamiento *R* en recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

Figura 10-2 Energía lineal entrada con respecto al tiempo de solidificación  $S_t$ , en recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros de entrada en el proceso de recubrimiento por láser [27]. 12
Tabla 2-2 Fenómenos físicos durante el proceso y parámetros de salida en el proceso de recubrimiento mediante láser [27]
Tabla 3-1 Composición de elementos del polvo WC-10Co-4Cr (wt.%) [88]29
Tabla 3-2 Relación del % de trabajo y flujo másico (g/s) en un tiempo de 10 s para el polvo WC-10Co-4Cr con un flujo de transporte del polvo de 18 L/min con gas Ar. 
Tabla 4-1 Duración del pulso para una frecuencia de 50Hz39
Tabla 4-2 Ecuaciones de regresión para la energía promedio por unidad de área $E_{\alpha}$ , dilución %D y altura h en recubrimientos por láser con polvo WC-10Co4Cr44
Tabla 4-3 Parámetros para el recubrimiento por láser con polvo de WC-10Co-4Cr.
Tabla 4-4 Obtención de la $E_a$ , medición geométrica y dilución de recubrimientos mediante el proceso de LC con onda continua (CW) a una frecuencia de 50 Hz.
Tabla 4-5 Evaluación geométrica y condiciones de muestras de recubrimiento por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz50
Tabla 4-6 Evaluación geométrica y condiciones de recubrimiento por láser cononda discontinua con 10 ms y una frecuencia de 50 Hz.52
Tabla 4-7 Medición geométrica, dilución y % de porosidad de las muestras $E_{a24}$ , $E_{a32}$ y $E_{a39}$ , mediante LC con WC-10Co-4Cr
Tabla 5-1 Velocidad de enfriamiento (R) y tiempo de solidificación (St) para los recubrimientos $E_{a24}$ , $E_{a32}$ y $E_{a39}$

Tabla 9-1 Diseño de experimentos de parametrización, diámetro del láser del 0.4 mm y una frecuencia de 50Hz.

Tabla 10-1 Propiedades del WC-Co y condiciones del material.

Tabla 10-2 Cálculo de la velocidad de enfriamiento para las condiciones de recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

Tabla 10-3 Predicción del tiempo de solidificación para las condiciones de recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La industria minera, automotriz, aeroespacial, marítima entre otras, requiere disminuir los costos de reparación o recuperación de componentes, dispositivos o piezas que en operación disminuyen sus dimensiones por mecanismos como desgaste y corrosión. El reducir el desgaste y la corrosión disminuirá los costos de mantenimiento o remplazo total de componentes y se incrementarán los beneficios para la empresa en la productividad [1–4].

La ingeniería verde se ha convertido en un objetivo dentro de la industria manufacturera donde diseñar productos o proceso en armonía con el medio ambiente, sin disminuir el rendimiento y vida útil, está ahora entre el diseño y tareas de ingenieros actuales [5].

Actualmente hay alternativas en procesos de recubrimientos en los componentes para disminuir el desgaste y la corrosión. Dependiendo del material del componente que se va a recubrir (sustrato), es necesario seleccionar el proceso de recubrimiento, el tipo o clase de recubrimiento, parámetros de aplicación y finalmente realizar una evaluación microestructural del sustrato/revestimiento, propiedades mecánicas, pruebas de desgaste, entre otras, donde los resultados otorguen las bases y sustento de ser implementados en diferentes áreas de la industria [6–10].

Los recubrimientos con partículas de carburo de tungsteno WC tienen propiedades de alta dureza, resistencia al desgaste y corrosión [11, 12]. Las partículas de WC están embebidas en un aglomerante metálico, el cual le proporciona la tenacidad necesaria al recubrimiento. El recubrimiento de WC-10Co-4Cr contiene simultáneamente resistencia al desgaste y corrosión, este recubrimiento es usado en la industria aeronáutica, minera, construcción, entre otras [6, 13, 14].

Diferentes procesos de recubrimiento para WC-10Co-4Cr existen tales como recubrimiento térmico por flama, oxi-combustibles de alta velocidad (High Velocity Oxy-Fuel-HVOF), rociado de plasma atmosférico (Atmospheric Plasma Spraying-APS), rociado

por pistola de detonación (Detonation Gun Spray) y revestimiento o recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC), entre otros [15].

El recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC) es un proceso de manufactura que se aplica propiamente para recubrir superficies de componentes [16–18]. El recubrimiento generado mediante esta técnica resulta denso, libre de fracturas, mínima porosidad, buena adherencia y baja cantidad de calor generada, lo que lo hace atractivo para diferentes sectores industriales [19–21], y actualmente se está desarrollando componentes mediante manufactura aditiva [22, 23].

Los parámetros para recubrimientos mediante el proceso LC son la potencia del láser, la velocidad de avance y la velocidad de alimentación del polvo, que influyen fuertemente en las características geométricas de los recubrimientos de LC, incluidos aspectos como la dilución, ancho y ángulo de humectación [17, 18, 24].

Con el fin de establecer una relación entre los tres principales parámetros del proceso de LC, es decir, potencia del láser (*P*), velocidad de avance (*v*) y diámetro del punto del láser (*D*), se usa frecuentemente el concepto de energía promedio por unidad de área  $(E_{\alpha})$ ,  $(E_a = \frac{P}{vD} [J/mm^2])$ , el cual se puede configurar ajustando los parámetros mencionados para generar un recubrimiento de buena calidad [19].

En esta investigación se realiza un recubrimiento por LC de polvo de WC-10Co-4Cr en un acero de bajo carbono (AISI/SAE 1020), donde se analiza el efecto de la energía promedio por unidad de área ( $E_a$ ) sobre la geometría, microestructura, fases y propiedades mecánicas.

#### 1.1 ANTECEDENTES.

Se han utilizado una gran variedad de polvos o alambres de aleaciones ferrosas y no ferrosas en el proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC) desde 1988 en aplicaciones industriales donde se incluye la aeroespacial, automotriz, química, de

petróleos y minera [25, 26]; estas áreas utilizan recubrimientos por el proceso LC para prolongar la vida útil de sus productos, aumentar su eficiencia de producción y reducir los costos de mantenimiento; este proceso se ha estado utilizando en años recientes en la manufactura aditiva para la creación de componentes de alta complejidad [27].

Las compañías mineras localizadas en el estado de Zacatecas, están interesadas en minimizar y controlar las tasas de desgaste en componentes tales como martillos y conos quebradores de mineral. Los componentes o dispositivos de la industria minera están sujetos a desgaste por fricción, por abrasión e impacto-abrasión. Y después de un periodo de tiempo en servicio necesitan ser restaurados o en su caso realizar la compra total del componente lo cual resulta ser muy costoso y con tiempos de respuesta largos [28, 29].

Se han aplicado en la Universidad Autónoma de Zacatecas procesos de recubrimiento mediante soldadura por el proceso de arco eléctrico con electrodos revestido (Shielded Metal Arc Welding- SMAW) y soldadura por arco metálico con gas (Gas Metal Arc Welding- GMAW) donde se ha observado una disminución en la tasa de desgaste en los componentes, sin embargo la industria requiere que esta tasa de desgaste sea más menor en sus componentes [30–33].

Una alternativa, es utilizar el proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC) y en particular con polvos de WC-10Co-Cr, donde se caracteriza por su alta dureza, excelentes propiedades de resistencia al desgaste, erosión y resistencia a la corrosión.

Esta investigación se ha enfocado en realizar un recubrimiento mediante el proceso de LC con polvos de WC-10Co-4Cr; ya que se han registrado estudios con anterioridad de recubrimientos mediante los procesos de recubrimiento térmico por flama, el cual es un proceso complejo en la proyección de polvos WC-10Co-4Cr, donde en la microestructura obtenida se presenta partículas sin fundir, parcialmente fundidas, óxidos y porosidad entre el 3-16%, asimismo se presentan fases de WC, W<sub>2</sub>C, W y Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C, lo cual indica un proceso de descarburación y disolución del WC, en este proceso se generan espesores de 200-500 µm [14, 15, 34]. Por otra parte, en el proceso de oxi-

combustibles de alta velocidad (High Velocity Oxy-Fuel-HVOF) para WC-10Co-4Cr se genera a alta velocidad de partículas y temperaturas 3200 °C aproximadamente, lo cual provoca una disolución del WC a W<sub>2</sub>C, con respecto a la porosidad se presenta entre 0.6-8.5 % y durezas de 1300-1370 HV en el recubrimiento [8, 12, 13, 35]. En el rociado por pistola de detonación (Detonation Gun Spray) las partículas de WC se elevan a una temperatura de 3000 °C y proyecta la partículas a una velocidad de 700 m/s, donde el sustrato se mantiene entre 80-150 °C para generan espesores de 500 µm, se ha detectado igualmente la descomposición del WC a W<sub>2</sub>C degradando la resistencia al desgaste de los recubrimientos [9, 36]. Y finalmente, el proceso de rociado de plasma atmosférico (Atmospheric Plasma Spraying- APS) genera recubrimientos densos y una unión metalúrgica entre el polvo y el sustrato debido a las temperaturas entre 12000-16000 °C, presentándose la descomposición del WC [37].

Por lo anterior, resulta de suma importancia la protección de componentes mediante el proceso de LC con polvos de WC-10Co-4Cr para uso industrial.

#### 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Sin embargo, hasta ahora, poca información se ha generado de la influencia de la energía promedio por unidad de área  $E_a$  en recubrimientos mediante láser (Laser Cladding-LC) en las características geométricas, porosidad, microestructural y propiedades mecánicas para la aleación WC-10Co-4Cr depositada sobre sustrato de acero con bajo contenido de carbono.

Por otra parte, es importante mencionar que el crecimiento de partículas de WC durante el proceso de recubrimiento por LC de la aleación WC-Co hay escasa información en la literatura [18, 23]. Erfanmanesh *et al.* [23], señala que utilizó polvo de WC con un tamaño de 1-2 µm y posterior al proceso de LC este tamaño de partículas creció 20 veces, sin revelar el origen del crecimiento. Valsecchi *et al.* [7], considera que el crecimiento de partículas de WC es relacionado con la aglomeración de las fases originales. Por otro lado, la aleación WC-10Co-4Cr ha sido depositada usando un sistema de CO<sub>2</sub> mediante LC sobre sustratos de acero inoxidable; Angelastro *et al.* [38] describe la macroestructura

en sección transversal, analiza el contenido de porosidad, la dureza y sin observar cambios en el tamaño o morfología de las partículas.

Vale la pena señalar que el mecanismo de crecimiento de las partículas de WC en recubrimientos de WC-10Co-4Cr mediante el proceso de LC donde se presenta un ciclo térmico de tiempo corto en calentamiento y enfriamiento, no se ha reportado hasta ahora.

Por otra parte, un área de estudio es ofertar aceros ferrosos y no ferrosos recubiertos mediante el proceso LC que disminuya la tasa de desgaste, el cual ha mantenido su ritmo creciente actualmente, convirtiéndose en áreas muy atractivas para investigadores, fabricantes y comerciantes; con base a estimación económica del equipo, parametrización entre el polvo y sustrato, que se refleje en la caracterización microestructural, análisis geométrico y propiedades mecánicas de acuerdo a la aplicación del componente.

#### 1.3 JUSTIFICACIÓN.

El proceso de revestimiento mediante láser (Laser Cladding-LC) es un método de manufactura avanzada propuesto para reparar estos componentes o dispositivos en el sector minero u otras áreas de interés, sin embargo es necesario encontrar los parámetros operativos para la aplicación de un recubrimiento por el proceso LC con polvo de WC-10Co-4Cr sobre un acero AISI/SAE 1020 y obtener una calidad adecuada del revestimiento en la geometría, microestructura y propiedades mecánicas que aporten en la disminución de la tasa de desgaste.

Es importante mencionar que es necesario relacionar la influencia de la energía promedio por unidad de área ( $E_{\alpha}$ ) con las características geométricas de los recubrimientos, porcentaje de porosidad, evolución microestructural y dureza generada en un recubrimiento de WC-10Co-4Cr por el proceso LC. En particular este trabajo se centró en investigar el efecto de  $E_{\alpha}$  en el mecanismo crecimiento de partículas de WC durante ciclos térmicos rápidos.

De lo anterior nuestra investigación se basará en un análisis inferencial, y el control de variables experimentales, y el número de variables es multivariado.

#### 1.4 OBJETIVO GENERAL.

En este trabajo de investigación se evalúa el efecto de la energía promedio por unidad de área ( $E_{a}$ ) sobre las características geométricas, la porosidad, la microestructura y la evolución de la dureza en recubrimientos mediante láser Yb: YAG (Laser Cladding-LC) de la aleación WC-10Cr-4Co sobre un sustrato de acero AISI/SAE 1020.

#### 1.4.1 Objetivos específicos.

- Encontrar los parámetros para generar un revestimiento por láser con una dilución entre 5-30 %, y porosidad por debajo del 15 %.
- Realizar una evaluación geométrica de los recubrimientos por láser.
- Evaluación mediante difracción de rayos X si hay presencia de descomposición del WC en W<sub>2</sub>C.
- Analizar mediante microscopia óptica (MO) y microscopia electrónica de barrido (MEB) la morfología de la microestructura en los revestimientos.
- Evaluar la microdureza (HV) a lo largo de la sección transversal de los revestimientos.
- Efecto de la energía promedio por unidad de área E<sub>α</sub> sobre las partículas de WC durante el proceso de LC.

#### 1.5 HIPÓTESIS.

Es posible que el aumento de la energía promedio por unidad de área ( $E_{\alpha}$ ) en el proceso revestimiento por láser (Laser Cladding-LC) de polvos de WC-10Co-4Cr sobre un acero de bajo carbono, tenga influencia en las características geométricas, microestructura y propiedades mecánicas.

## 2. MARCO TEÓRICO.

#### 2.1 GENERALIDADES DEL RECUBRIMIENTO WC-Co-Cr.

El compuesto o aleación WC-10Co-4Cr se usa ampliamente para aplicaciones de recubrimiento en aeronáutica, minería, industria de la construcción y maquinaria pesada [6, 14]. En general, los recubrimientos a base de WC-Co-Cr se caracterizan por tener alta dureza y ser resistentes al desgaste, la erosión y la corrosión [11, 12].

Este tipo de aleación WC-Co-Cr, está compuesta de cristales de WC con una estructura hexagonal cuyos parámetros de red son a= 0.291 nm y c= 0.284 nm y tiene tres tipos de facetas, una basal {0001} y dos prismáticas {1010}, como se observa en la Figura 2-1 (12). El monocarburo de tungsteno (WC) tiene una red de metal aglomerante dúctil más blando del grupo de hierro de los metales. Se puede encontrar en polvos de tamaño sub-micron con un tamaño de grano de hasta 0,6 µm o polvos ultrafinos de grano de hast



Figura 2-1 Cristal de WC (12).

Los carburos cementados son en efecto compuestos de matriz metálica que contiene una fase cerámica. El primer carburo fue desarrollado por Karl Schroeter en 1923 de un monocarburo de W aglutinado con Fe, Ni y Co, respectivamente (40). Los resultados mostraron que la combinación de WC-Co presentaban mejores propiedades a alta temperatura y alta densidad [41]. El punto de fusión del WC es de 2776 °C, sin embargo a alta temperatura y tiempos de exposición de 2-3 h, los átomos de WC pueden presentar difusión a través de los límites y que las partículas de WC se disuelvan [42]. WC es el material más duro, Co es el material más resistente, pero WC-Co es uno de los mejores sistemas para combinación de alta dureza y resistencia. El tamaño de partícula WC y la composición del Co determina en gran medida las propiedades mecánicas [19]. Tradicionalmente el WC-Co se obtienen por pulvimetalurgía, donde etapas de molienda, compactación y sinterización se generan para producirlos [43]. Las aplicaciones del carburo cementado incluye herramientas para construcción, minería, túneles, instalaciones en la industria del petróleo y gas [12]. La mayoría de las aplicaciones industriales usan Co en el rango de 3-30% [5, 12].

Durante las últimas décadas el carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co) se han utilizado ampliamente por su alta dureza y excelentes propiedades de resistencia al desgaste, erosión y resistencia a la corrosión [5, 44, 45]. El WC-Co, representa una clase de materiales cermet que consiste en partículas de WC incrustadas en una matriz dúctil (Co)[46], las fase aglutinantes como Co le otorga propiedades superiores por su afinidad a altas temperaturas [12, 47]; debido a sus propiedades de adhesión y mojabilidad con los CW evitando la formación de grietas [48].

Durante un calentamiento excesivo o la fusión parcial del WC da como resultado una disminución de carbono en las aleaciones de WC-Co, debido a la precipitación del carbono como grafito y oxidación; la fase descarburizada de W<sub>2</sub>C precipita a lo largo del grano WC en los límites del W metálico entre el grano del WC, esta descomposición se presenta en tres etapas [12, 13, 49]:

 $2WC \rightarrow W_2C + C$  $W_2C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow W_2(C, O)$  $W_2(C, O) \rightarrow 2W + CO$ 

Este grafito reacciona con el oxígeno atmosférico y forma CO y CO<sub>2</sub>; a menudo aparece como porosidad en el sistema WC-Co. Por lo tanto, hay una disminución de carbono en la matriz y esto lleva a la formación de una fase eutéctica ternaria frágil de W, Co y C [19]. La morfología inicial del polvo se tiene que verificar, la cual puede resultar con formas de partículas irregulares con mínima porosidad o de tamaño sub-micron, con un tamaño de grano de hasta 0,6 µm o polvos ultrafinos con un tamaño de grano de hasta 0.3 µm, esto se puede generar debido al procesamiento de molienda del polvo [39].

#### 2.2 LASER CLADDING.

El termino láser es un acrónimo en inglés que significa Luz amplificada por emisión estimulada de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation-LASER); los componentes para la generación de un láser son: 1) el medio del láser que puede ser un gas (CO<sub>2</sub>), sólido (Nb-YAG Ytterbium-doped Yttrium Aluminium Garnet Nd-YAG) ó un líquido, 2) mecanismo de excitación (corriente eléctrica, descarga eléctrica, fuente de luz, entre otros), y finalmente 3) el resonador óptico [50, 51].

El principio de generación de láser ocurre en tres etapas [51, 52]:

• Emisión simultánea: La bomba suministra un estímulo que lleva a los electrones de los átomos que se encuentran en el medio de un estado basal a un estado de mayor de energía, como todo en la naturaleza tiende a estar en su estado donde se requiere de menor energía, estos electrones que "saltaron" a un mayor nivel energético regresan a un estado basal regresando la energía que les fue suministrada en forma de luz o de fotones.

- Emisión estimulada: Debido a que el proceso de excitación de electrones ocurre en un "túnel" reflectivo, un fotón producido estará reflejándose a lo largo del arreglo de láser por lo que va a encontrarse en su reflexión con electrones excitados produciéndose otro fotón que se generará de manera coherente respecto al primer fotón, es decir, estarán ambos fotones en fase y en la misma dirección, lo cual se conoce como emisión estimulada.
- Amplificación: Los fotones que fueron generados normalmente viajan en todas direcciones, pero durante esta etapa los fotones se encaminan hacia una sola dirección. Así pues, de manera sencilla se puede definir al láser como un arreglo donde electrones son excitados y la luz generada durante el proceso de relajación es concentrada y amplificada mediante un sistema reflector.

El láser de granate de itrio y aluminio dopado con iterbio (Yb: YAG Ytterbium-doped Yttrium aluminum garnet) es uno de los materiales activos del láser que son más adecuados y prometedores para el bombeo de diodos que los sistemas dopados con Nd tradicionales. Los cristales Yb: YAG tienen un ancho de banda de absorción mayor que el cristal Nd: YAG de uso común para minimizar los requisitos de gestión térmica de los láseres de diodo y facilitar una vida útil más larga del nivel del láser superior y una baja carga térmica.

El proceso de revestimiento por láser (Laser Caldding-LC), inició a mediados de los años 70's, posteriormente se realizó la primer patente con el proceso LC en 1976 por el Laboratorio de Investigación Avco Everentt [25]. El proceso mediante LC es un proceso de manufactura industrial para realizar depósitos de polvo o alambre (metálico y no metálico) sobre un sustrato, su aplicación es proteger piezas o componentes para disminuir la tasa de desgaste y generar superficies resistentes a la corrosión [18, 20, 53].

Las ventajas de este proceso es obtener recubrimientos con una estructura densa, sin grietas, poca porosidad, mínima dilución, alta velocidad de enfriamiento, excelente adherencia y baja y controlable entrada de calor al componente [26]. Este proceso se aplicado ampliamente en la industria aeroespacial, generación de potencia, automotriz, marítima, minería entre otras [22].

El principio del proceso LC, se realiza mediante la incidencia de un haz de láser sobre un substrato, el cual funde la superficie y el polvo que se suministra, dando como resultado una capa fina llamada revestimiento o recubrimiento, este haz está protegido mediante un gas protector, el dispositivo del proceso de LC cuenta con una boquilla que tiene conductos donde se realiza la alimentación del polvo mediante un gas de arrastre [27], como se observa en la Figura 2-2.



Figura 2-2 Esquema del proceso de recubrimiento por láser [27].

#### 1.5.1 Parámetros del recubrimiento por láser.

Generalmente, los parámetros de entrada o los parámetros de operación son el haz de láser, el dispositivo de movimiento, alimentador de polvo y las propiedades del sustrato y el polvo, en cada parámetro mencionado tiene sus condiciones de ajuste [27], como se muestra en la Tabla 2-1.

El proceso de LC tiene una gran cantidad de parámetros de entrada que determina la calidad del revestimiento que en una forma decisiva afecta la geometría, microestructura, porosidad, tensiones residuales, dilución y la distribución de los compuestos de los recubrimientos [26, 27], como se exhibe en la

#### Tabla 2-2.

Un revestimiento mediante el proceso de LC es afectado por la potencia del láser, flujo de masa del polvo, velocidad de avance, tipo de polvo y material del sustrato (54); por ejemplo, dependiendo de la composición química/carbono equivalente de los sustratos, habrá una gran diferencia en parámetros de precalentamiento y revestimiento para obtener un recubrimiento libre de grietas para cada aplicación [7].

Parámetros de entrada			
Láser	Dispositivo de movimiento	Material	
<ul> <li>Potencia promedio</li> <li>Tamaño del láser</li> <li>Longitud de onda</li> <li>Pulsado/Onda continua</li> <li>Perfil del haz</li> <li>Forma del pulso del láser</li> </ul>	<ul> <li>Velocidad</li> <li>Aceleración</li> <li>Sistema de exactitud</li> <li>Distancia entre boquilla y sustrato</li> </ul>	<ul> <li>Geometría del sustrato</li> <li>Composición</li> <li>Metalurgia, termofísica y propiedades ópticas</li> <li>Tamaño del polvo</li> <li>Tensión superficial</li> </ul>	
<ul> <li>Velocidad de alimentación</li> <li>Flujo del gas inerte</li> <li>Especificaciones de la boquilla</li> <li>Perfil del flujo del polvo</li> </ul>	<ul> <li>Precalentamiento</li> <li>Velocidad del gas protector</li> <li>Tipo de protección del gas</li> </ul>		

Tabla 2-1 Parámetros de entrada en el proceso de recubrimiento por láser [27].

Tabla 2-2 Fenómenos físicos durante el proceso y parámetros de salida en el proceso de recubrimiento mediante láser [27].

Proceso (fenómenos físicos)	Parámetros de salida
<ul> <li>Absorción</li> <li>Conducción</li> <li>Difusión</li> <li>Dinámica de la pileta</li> <li>Convección del fluido</li> <li>Interacción entre el gas /pileta</li> <li>Atenuación del láser por el polvo</li> <li>Solidificación rápida</li> </ul>	<ul> <li>Geometría</li> <li>Microestructura</li> <li>Dureza</li> <li>Grietas</li> <li>Porosidad</li> <li>Esfuerzos residuales</li> <li>Rugosidad superficial</li> <li>Dilución</li> </ul>

De acuerdo a los parámetros utilizados durante el proceso por LC se genera la geometría del revestimiento (vista en sección transversal al recubrimiento), las mediciones geométricas consisten en la profundidad (b), altura (h), ancho (w) y ángulo de mojado( $\theta$ ), como se exhibe en la Figura 2-3.



Figura 2-3 Geometría de un revestimiento mediante láser [27].

Uno de los factores para la generación del proceso de LC es el anclaje o denominado porcentaje de dilución (%D). El porcentaje de dilución se define como el porcentaje del volumen total de la capa superficial favorecida por la fusión del sustrato y se puede representarse por la ecuación 2-1; para la obtención de la dilución es necesario medir la altura y profundidad del revestimiento, como se observa en la Figura 2-3 [17, 23, 27].

$$\%D = \frac{b}{b+h}(100)$$
ecuación 2-1

Dónde: b es la profundidad (mm), h la altura del recubrimiento (mm).

La dilución es considerada uno de los resultados importantes en un proceso de LC; donde la altura (*h*) y la profundidad (*b*) son los factores principales; los parámetros combinados de potencia, alimentación del polvo y velocidad de avance pueden controlar principalmente la dilución, pero el que tiene mayor influencia es la potencia aplicada [17, 55].

Se consideran la potencia, la velocidad de avance y alimentación los parámetros más importantes donde una buena combinación de estos se puede obtener un recubrimiento de alta calidad; estos parámetros afectan la altura (h), la profundidad (b), el ancho (W) y el ángulo ( $\theta$ ) del revestimiento, es decir tienen efecto en la geometría del recubrimiento.

Para el control de la **altura (h)** los parámetros de mayor influencia es la velocidad de avance y potencia, por lo tanto para generar altura en el revestimiento es necesario una velocidad de avance baja, alta potencian seguida por la cantidad de alimentación del polvo [17, 18, 23, 55, 56].

Con respecto a la **profundidad (b)**, si la velocidad de alimentación y velocidad del avance son constantes y aumentamos la potencia, se transfiere una gran cantidad de energía compartida al sustrato y hace que la profundidad aumente, por lo tanto la combinación de potencia y alimentación juegan un papel importante [23]. M. Erfanmanesh *et al.* [17], menciona que si la potencia es constante y aumenta la tasa de alimentación y/o la velocidad disminuye hay un aumento de material depositado por unidad de longitud, por lo tanto la profundidad es reducida, esto debido a que el polvo

entrante absorbe una mayor cantidad de energía y la resultante se absorbe por el substrato.

Con respecto al **ancho (w)** depende mayormente de la potencia y en menor medida del avance [57], el w se reduce con la disminución de la potencia y aumento de la velocidad de alimentación del láser, ya que la energía promedio por unidad de área de entrada disminuye correspondientemente [17, 18, 23, 27].

Para el **ángulo (0)** los parámetros que más influyen es la velocidad de avance y la alimentación [17]. L. Costa *et al.* [56], recomiendan que debe ser menor a 80° y una dilución del 10%, esto evitara una porosidad insignificante.

Por otra parte, un aumento del diámetro del punto del láser, la altura y la dilución aumenta y la energía promedio por unidad de área disminuye (58).

#### 2.2.1 Forma del pulso del láser.

En el proceso de revestimiento por láser (Laser Cladding-LC), se puede configurar en forma continua (Continuos Wave-CW) o pulsante (Discontinuos Wave-DW). El láser en forma de pulsos utiliza varios parámetros asociados los cuales son: energía del pulso del láser [E], ancho del pulso (duración del pulso) [W], frecuencia del pulso del láser (velocidad de repetición del pulso) [F], potencia promedio. Por lo tanto de acuerdo a la Figura 2-4, se muestra que se tiene un tiempo donde el pulso no se aplica, es decir la relación  $\frac{1-FW}{F}$ ; por ejemplo si se maneja una F=50 Hz, el periodo (T) sería 0.02 s (20 ms) al 100%, pero se requiere utilizar el 70% de la frecuencia del láser resultando en 0.014s (14 ms) el ancho del pulso, es decir que si utiliza se la relación  $\frac{1-FW}{F}$ , resulta en 0.006 s (6 ms) que está inactivo el pulso del láser. Si se realiza la suma de W y  $\frac{1-FW}{F}$ , resulta en 0.02 s (20 ms) que corresponde al 100% [27, 55].



Figura 2-4 Forma del láser pulsante, donde E es la energía, W es ancho del pulso, y F la frecuencia del pulso [27].

#### 2.2.2 Energía promedio por unidad de área efectiva $(E_{\alpha})$ .

Existen varios parámetros que se involucran en el proceso de LC; se ha establecido que los siguientes se consideran parámetros de procesamiento clave los cuales son potencia del láser, velocidad de avance y flujo de alimentación del polvo que influyen fuertemente en las características geométricas los revestimiento, incluidos aspectos tales como: dilución, ancho y/o ángulo de humectación [17, 18, 24]. Además, vale la pena mencionar que existen una serie de otros parámetros de procesamiento, tales como: tamaño de punto láser, pulsos, velocidad de flujo de gas, perfil del haz, entre otros, que podrían tener algún tipo de efecto en las propiedades finales del revestimiento [27].

Con el fin de establecer una relación entre tres diferentes principales parámetros del proceso de LC, es decir, potencia del láser, velocidad de avance y diámetro del punto del láser, el concepto de energía promedio ( $E_a$ ) [19], también llamado energía promedio por unidad de área [17, 19, 23], energía específica [27, 59–62], energía efectiva [27, 63, 64] y/o densidad de energía [19, 22, 55, 65, 66], estos conceptos se utilizan con frecuencia en la literatura; por lo tanto,  $E_a$  es la cantidad de calor por una unidad de área y se establece básicamente ajustando los parámetros correspondientes que se muestran en la ecuación 2-2.

$$E_{a} = \frac{Ef}{vD} \left[ J/mm^{2} \right]$$
  
Ef = P (potencia del láser)

ecuación 2-2

Donde *E* es la energía por pulso del láser [*J*], *f* es la frecuencia del láser por pulso [*Hz*], *v* es la velocidad de avance del proceso [*mm* s<sup>-1</sup>], *y D* es el diámetro del láser [*mm*].

Para establecer un valor específico para  $E_{\alpha}$ , los diversos parámetros involucrados deben establecerse, configurar o modificarse durante el proceso de LC.

Por otro lado, entrada de energía (energy input) [10, 67, 68], energía lineal (linear energy) [10, 67], densidad de energía linear (linear energy density) [68] y energía entregada por unidad de longitud (energy delivered per unit length) [69] son términos comúnmente utilizados que indican la misma relación entre solo dos parámetros en el proceso LC, los cuales son potencia del láser (P) y velocidad de escaneo (v), como se muestra en la ecuación 2-3:

$$E_a = \frac{P}{v} \left[ J/mm \right]$$

#### ecuación 2-3

Donde P es la potencia [W], y v es la velocidad de avance del proceso [mm s<sup>-1</sup>].

Debido a que la energía promedio tiene en cuenta un factor más que la energía lineal; se decidió adoptar ese concepto en este trabajo de investigación. Por lo tanto, el término energía promedio por unidad de área o energía promedio ( $E_a$ ) se utiliza en toda la investigación.

Los otros parámetros para el proceso de LC, pueden tomar en cuenta la densidad de pico de potencia ( $I_p$ ) que controla la temperatura y fundición del revestimiento, y finalmente la superposición por puntos (spot overlap (SO)) el cual muestra el efecto de la velocidad del avance con el ancho del pulso del láser y la frecuencia, estos parámetros se pueden calcular de acuerdo a las siguientes expresiones [19, 27].

$$I_p = \frac{E}{tD^2} [W/mm^2]$$

ecuación 2-4

$$SO = \left(1 - \frac{v}{Df}\right)$$

ecuación 2-5

Donde E es la energía por pulso del láser [J], f es la frecuencia del láser por pulso [Hz], v es la velocidad de avance del proceso [mm s<sup>-1</sup>], D es el diámetro del láser [mm] y t es la duración del pulso [s].

#### 2.3 RECUBRIMIENTOS MEDIANTE EL PROCESO DE LÁSER CON POLVO WC-Co.

Los recubrimientos de aleaciones WC-Co se han depositado utilizando el proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC). Se ha observado que la potencia del láser tiene un efecto predominante en las características geométricas de los recubrimientos mediante el proceso LC con WC-12Co; por lo tanto, la altura, el ancho del revestimiento y la profundidad de penetración están fuertemente correlacionadas con la potencia del láser, mientras que la última no es efectiva en el ángulo de humedecimiento [17, 70]. La aleación WC-8Co se ha depositado empleando dos gases de protección (argón y nitrógeno); la dilución no resultó afectada y se mantuvo constante, mientras que la porosidad y las grietas se redujeron al mínimo cuando se usaba protección de gas argón [18].

Además, se ha llevado a cabo el recubrimiento mediante el proceso de LC de WC-12Co, aplicando varias capas mediante el láser Nd: YAG pulsado; se infirió que se requiere un valor de energía promedio mínimo para evitar un revestimiento discontinuo y para reducir aún más la dilución; por lo tanto, el láser pulsante fue efectivo para promover valores de energía promedio adecuados [19, 24].

El análisis de la microestructura resultante en el proceso de LC con polvos de WC-Co resultó con una distribución uniforme de partículas de WC y valores de dureza de aproximadamente 1000 HV [19, 70]. Cabe señalar que el engrosamiento y el crecimiento de las partículas de WC en las aleaciones LC WC-Co se han revelado [18, 23]. Se ha 18 informado que el tamaño de las partículas originales de WC en el rango entre 1-2 µm crece veinte veces ese valor [23]. Además, se reportó que el engrosamiento de las partículas de WC está relacionado con la aglomeración de las fases originales mediante el proceso de láser por fibra [18]. Sin embargo, el mecanismo de crecimiento o engrosamiento de las partículas de WC en los recubrimientos de WC-Co-Cr durante tiempos cortos de calentamiento y enfriamiento no se ha reportado hasta el momento.

En particular, la aleación WC-10Co-4Cr ha sido aplicada en capas utilizando un sistema de revestimiento láser de CO<sub>2</sub> sobre un sustrato de acero inoxidable; aunque se reportó que la macroestructura de la sección transversal, el contenido de porosidad y la dureza. Sin embargo, no se revelaron detalles en términos del crecimiento de las partículas de WC [38].

Actualmente, no está investigado en su totalidad sobre la influencia de la energía promedio por unidad de área en las características geométricas y la porosidad de la LC de WC-10Co-4Cr depositada en un acero bajo en carbono.

#### 2.3.1 Microestructura en recubrimiento con láser con WC-Co.

La microestructura presente en un recubrimiento mediante el proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC) con polvo de WC-Co, se han encontrado diferentes tipos de morfología en la interface del sustrato y recubrimiento.

Se observó que mediante el proceso LC con polvos de WC-Co en un acero de bajo C, que en la matriz de WC-Co se presenta una dilución del Fe con el Co en la zona de la interface, y que conforme se va alejando de la interface el Fe disminuye y aumenta la concentración de WC y Co. En la Figura 2-5 se muestra una microestructura típica de WC-12Co posterior al proceso de LC, se puede observar una matriz de Co (color oscuro) y partículas de WC (zonas claras) [19].




B. Valsecchi et al. [9] menciona que observó en la sección transversal del recubrimiento la presencia en la parte media y superior de partículas de WC semejantes al tamaño del polvo original de WC-8Co mediante el proceso LC, y en la zona de la interfase (sustrato/recubrimiento) se revelan aglomeraciones de partículas de WC y fases dendríticas.

Algunos autores explican que en el límite de la interface se generan morfologías debido a los gradientes de enfriamiento por la interacción entre el acero y los depósitos, donde puede presentarse aglomeración de partículas de WC y fases dendríticas [18, 21, 23, 71].

La morfología en la interface ocurre por las condiciones de solidificación tal como es el gradiente de temperatura G y la velocidad de solidificación R. En la interfase, la morfología en el recubrimiento por láser de polvos de WC –Co se da de la siguiente manera:

- En el límite de la interfase se presenta un gradiente de temperatura alto y una velocidad de solidificación baja en la interfase, lo cual induce a un crecimiento planar con un espesor de unas cuantas micras y posteriormente una matriz de Fe.
- Conforme se incrementa la distancia con respecto al sustrato, el gradiente de temperatura G disminuye gradualmente, mientras que la velocidad de solidificación se incrementa gradualmente, generando carburos tipo M<sub>6</sub>C y una mezcla de dendritas columnares relativamente finas.

3. Posteriormente se mantiene la partícula original de WC con su aglutinante sin evidencia de la presencia del Fe.

Algunos investigadores mencionan que la dilución está relacionada con la formación de carburos, es decir: a mayor dilución, mayor formación de fases con Fe, pero la formación de los carburos disminuyen [23, 71]. Por lo tanto, generar un recubrimiento por el proceso de LC con partículas distribuidas uniformemente es complejo debido a las alta densidad del WC y aglutinantes con menor densidad [72].

### 2.3.2 Propiedades mecánicas mediante recubrimiento por láser con WC-Co.

El WC tiene una alta dureza en un rango de 3000-4000 HV y son estables a altas temperaturas, estas propiedades las hacen atractivas para recubrimientos [73]. Sin embargo, la aleación de WC-12Co aplicada mediante el proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC), se obtienen valores de microdureza entre 1250-1700HV [19].

Por otra parte, B. Valsecchi *et al.* [18], señala que cuando hay una buena homogeneidad en el recubrimiento (WC-Co) los valores de la microdureza se pueden encontrar en un rango de 900-1100 HV, con recubrimientos sin presencia de porosidad.

La microdureza puede variar de acuerdo a los porcentajes de dilución que se genere en el recubrimiento, esto debido a que la mayor parte del sustrato se mezcla con el revestimiento, generando mezclas eutécticas como en el caso del polvo WC-Co y un sustrato de acero de medio C; se ha observado que los depósitos aplicados mediante el proceso de LC con composiciones en polvo de W, C, Co y WC sobre el acero al carbono. Si la dilución está aproximadamente al 45% o mayor, la microestructura consiste principalmente en (Co, Fe)<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C y una mezcla eutéctica de (Co, Fe)<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C y a´-(Fe, Co), conforme va a aumentando la dilución una mezcla binaria del eutectoide entra más al revestimiento. A diluciones bajas contiene los elementos y tienes más WC sin fundir y un menor contenido de Fe y carburos del tipo M<sub>6</sub>C [13].

# 2.3.3 Mecanismo de porosidad en recubrimientos mediante láser en polvos WC-Co.

La generación de porosidad en el proceso de recubrimientos mediante láser (Laser Cladding-LC), se le puede atribuir a la alta tendencia del material a la oxidación y formación de gas durante el proceso, así como al flujo de alimentación de polvo [74]. Otro factor es el calentamiento excesivo o la fusión parcial de WC da como resultado una deficiencia de C en las aleaciones de WC-Co debido a la precipitación de C como grafito 2WC  $\leftrightarrow$  W<sub>2</sub>C + C, este grafito reacciona con el oxígeno atmosférico y forma CO y CO<sub>2</sub> [19]; estos productos gaseosos no tienen tiempo suficiente para salir de la zona de fusión, por lo cual quedan atrapados generando la porosidad; este tipo de reacción promueve la formación de algunas fases indeseables como W<sub>2</sub>C, Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C<sub>2</sub> y Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C [75].

La fusión parcial de WC depende de los parámetros del proceso LC; un aumento en la potencia del láser puede de alguna manera prolongar el tiempo de solidificación y disminuir el porcentaje de porosidad y resulta en más descomposición del carbono en aleaciones WC-Co [13]. Otro factor de la generación de porosidad es la falta de fusión debido a la alta velocidad de avance y baja potencia del láser [76].

La formación de porosidad podría ser atribuida a las propiedades físico-mecánicas de los materiales y de los parámetros de procesamiento en LC, por lo cual es difícil encontrar la fuente de generación.

### 2.3.4 Crecimiento de partículas de WC.

Se han observado en diversas investigaciones el fenómeno del crecimiento de partícula de WC en el proceso de sinterizado para diferentes concentraciones de Co; el crecimiento de partículas de WC se le atribuye a tiempos prolongados de exposición, presión y temperatura alta [76, 77]; por otra parte, algunos autores mencionan aglomeración de partículas de WC en recubrimientos por láser (Laser Cladding-LC), con polvo de WC-Co [18, 23].

G. R. Goren-Munginstein [44], estudió el proceso de sinterizado en partículas de WC con un tamaño de partícula de 0.6 µm, demostrando que el crecimiento del grano de WC comienza a los 1200 °C, el crecimiento de partícula de WC se da en los planos prismáticos (1010) y el piramidal (1103) de acuerdo a la estructura hexagonal de las partículas de WC.

El crecimiento de las partículas de WC se presenta por el proceso de coalescencia durante la sinterización, donde se ve afectado por los límites de grano entre WC-WC y WC-Co, donde la baja viscosidad entre los límites del WC y Co existe a 800 °C debido a la propagación de Co en los granos de WC [76].

La coalescencia es la combinación de dos partículas para formar una sola, en el proceso de sinterización forman un cuello entre las partículas o bien la eliminación del límite de grano [78]. Evidencia de la coalescencia se puede presenciar por poros residuales en los límites de grano o en el centro de los granos de WC [79]. En la Figura 2-6 se puede apreciar zonas de coalescencia y eliminación de límites de grano de partículas de WC mediante el proceso de sinterizado a 1400 °C de polvo de WC-10Co con un tamaño de 10 nm.



Figura 2-6 a) Evidencia del proceso de coalescencia en partículas de WC en sinterizado en polvo de WC-10Co, b) porosidad remanente y eliminación de los límites de grano de la partícula de WC [78].

Diversos autores definen la coalescencia como el crecimiento de granos y la eliminación de sus límites por la migración, donde se da un mecanismo de transporte de masa y varios procesos de difusión [47, 77, 80].

Z. Fang and J. W. Eason [81], da a conocer que durante el proceso de sinterizado de WC-Co los granos de WC se orientan girando y coincidiendo sus planos cristalográficos dando lugar a la eliminación del límite y la coalescencia; esto puede ocurrir antes y después de la forma líquida parcial durante el calentamiento a la temperatura de sinterización.

En el proceso de sinterizado de WC-10Co se han encontrado un cambio de estructura de la partícula de WC en función de la temperatura y el tiempo; donde se presenta un cambio estructural del WC, en la cual dentro del rango de 800 a 1200 °C cambia de forma equiaxial a plaquetas facetadas (la forma de equilibrio de los cristales de WC). Las superficies de baja energía son los planos basales y prismáticos de los triángulos que son los  $\{0001\}$  y  $\{1\overline{1}00\}$  planos, respectivamente. Entre 800 y 1200 °C, el número de granos facetados aumenta a medida que aumenta la temperatura [79].

Y Xiong et al [82], deduce que no se puede representar el tamaño de partícula de WC debido a que partículas pequeñas de WC pueden unirse (coalescencia) y conformar otras partículas más grandes, si estas tienen superficies facetadas, en la Figura 2-7 se muestran granos de WC-Co, donde el aglutinante de Co se retiró mediante ataque químico. La coalescencia se debido al acomodo aleatorio de la partículas de WC formando partículas más grandes, esto se evita limitando la fusión y tiempo de calentamiento mediante recubrimiento por láser.



Figura 2-7 Granos de WC adheridos con un tamaño menor a 40 nm [82].

Y. Zhong et al. [83], realizó sinterizado de WC-5.75 wt% Co a temperaturas entre 1100 a 1400 °C por dos horas. Donde determinó que la coalescencia se puede presentar durante el calentamiento entre 1100-1200 °C en partículas finas de WC-Co, los factores que influyen son la distancia entre partículas de WC desplazamiento y/o rotación de partículas WC y una mínima cantidad de Co contribuye a la coalescencia.

El mecanismo responsable del crecimiento de grano es la coalescencia; esta ocurre antes y después de generar forma líquida de la matriz (temperatura de sinterización). La coalescencia de granos se da cuando los granos de WC giran y se orientan con otro y coincide, y por ende el límite de grano migra a través de uno de ellos, este proceso se favorece por tamaños más finos de partículas de WC [81].

Estudios de recubrimientos de Ni alrededor de las partículas de WC-Co en polvo y posteriormente aplicar LC tiene efecto sobre la microestructura, descarburación y el crecimiento de partículas WC. Con respecto al crecimiento, el efecto es la absorción de calor reduciendo la temperatura de partículas de WC y como consecuencia reduce la movilidad en la matriz de Co [84].

Comúnmente los inhibidores para el crecimiento de grano en el WC-Co son el VC>Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>>NbC>TaC en orden de efecto inhibidor. El VC o Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> son más efectivos en inhibir el crecimiento del grano porque tienen mayor solubilidad y difusividad en fase

aglutinante de Co, donde algunos granos de WC cambian su forma de una forma equiaxial a una forma típica de prisma al disminuir su energía superficial [76, 80, 85, 86].

Con respecto al crecimiento de partículas de WC en el proceso de LC se ha estudiado el efecto de los parámetros principales en el proceso de recubrimiento por LC utilizando polvos WC-Co en un acero para herramientas, evaluando la geometría, microestructura y microdureza; se observó que cercas de la región límite del sustrato hay una presencia de aglomeración o crecimiento de partículas y fases detríticas de WC [18].

Se han realizado estudios estadísticos para obtener un mapa de procesamiento que ayude a la selección de los parámetros para obtener un recubrimiento de alta calidad mediante el proceso LC con polvos de WC-12Co sobre acero inoxidable; se menciona que la microestructura en la parte media y superior del recubrimiento es semejante 1-2 µm, pero se llegan a observar algunas partículas de WC que crecen hasta 20 µm en algunas regiones [23].

Por otra parte, en recubrimientos con diferentes % volumétricos de WC aleado con Fe-30Ni que fueron generados mediante reacción metalúrgica de transferencia de arco por plasma (plasma transferred arc metallurgic reaction-PTAMR), zonas de crecimiento o engrosamiento de partículas de WC. Este crecimiento de partículas de WC se presenta en la parte superior y media del recubrimiento de sección transversal, disminuyendo en la parte inferior e interfase del recubrimiento, debido a que la cantidad de calor se conserva en la parte superior, dando mayor tiempo que dos o más granos se encuentren en contacto [87].

# 3. METODOLOGÍA, MATERIAL, EQUIPO Y PROCEDIMIENTO.

En este capítulo se detalla la metodología experimental, material, equipo y procedimientos para realizar la evaluación geométrica, microestructural y propiedades mecánicas del proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC) con polvos WC-10Co-4Cr.

### 3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

De acuerdo al diagrama de bloques que se presenta en la Figura 3-1, se muestran las etapas principales realizadas donde se distinguen: 1) Revisión y análisis de parámetros con base al tipo de sustrato, al recubrimiento WC-10Co-4Cr y al láser Yb: YAG, 2) Puesta a punto del equipo de LC, 3) Experimentos de parametrización, 4) Generación de recubrimientos, posterior a esta etapa se realiza una evaluación superficial y macroestructural, en caso de presencia de defectos se modificaba parámetros de equipo, finalmente 5) Caracterización de recubrimientos y finalmente un análisis de los recubrimientos generados mediante LC de WC-10Co-4Cr sobre un acero AlSI/SAE 1020.



Figura 3-1 Diagrama de bloques de la metodología experimental en recubrimientos mediante el proceso de LC de WC-10Co-4Co. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 MATERIAL.

El material (sustrato) utilizado para depositar el WC-10Co-4Cr mediante LC fue un acero AISI/SAE 1020 (0.23 %C, 0.03 %Si, 1.09 %Mn, 0.028 %P y <0.15 %S) con dimensiones de 25.4X76.2X6.35 mm, la composición química se obtuvo en un espectrómetro de chispa marca Bruker, modelo Q4 TASMAN.

El polvo manejado en esta investigación fue WC-10Co-4Cr con marca comercial Oerlikon metco conocido comercialmente como WOKA [88], en la Tabla 3-1 se muestra la composición de los elementos de acuerdo al fabricante.

Tabla 3-1 Composición de elementos del polvo WC-10Co-4Cr (wt.%) [88]. Fuente: Elaboración propia.

WC	Co	Cr	Mesh (µm)
86	10	4	-45±11

La Figura 3-2a), muestra el polvo comercial WC-10Co-4Cr con forma esférica de dimensiones de -45+11 µm, se pueden observar las partículas de WC (áreas blancas) embebidas en el aglutinado de Co y Cr (zonas grises).

En el análisis realizado al polvo WC-10Co-4Cr mediante MEB y la técnica de EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy- espectrometría de dispersión de energía de rayos X) se realizó en un equipo Mira3 Tescan con espectometro XFlash Detector 6 | 60 Bruker a 2.0 kx, HV: 15 kV y WD 29.5 mm. En la Figura 3-2 b-e) se muestra la distribución del W, Co y Cr en el polvo y zonas de concentración. Finalmente, en la Figura 3-2 e) se presenta la distribución en conjunto de los elementos.



Figura 3-2 Elementos químicos mediante la técnica de EDS, a) Polvo de WC-10Co-4Cr, b) W, c) Co, d) Cr y e) W-Co-Cr. Fuente: Elaboración propia.

En la sección transversal de una partícula de WC-10C-4Cr (Figura 3-3), se pueden observar las partículas de WC con un tamaño de grano de 0.96 ± 0.52 µm con morfologías mixta de partículas equiaxiales y semiesféricas, así mismo se aprecia el aglutinante de Co-Cr que rodea las partículas WC y la presencia de porosidad.



Figura 3-3 Sección transversal de la partícula del polvo WC-10Cr-4Co a 10.0 kx, HV: 15 kV, WD 29.71 mm y Det: BSE. Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis metalográfico se realizó las etapas de desbaste con número de lijas del 80 al 4000 y el pulido final (Ultra lap diamond extender, aerosol diamond spray heavy concentration 1 µm), y finalmente para revelar la microestructura del WC se utilizó el ataque químico basado en la norma ASTM B 657-18 [89], denominado Murakami´s (K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>, KOH y agua destilada).

Para el caso de la degradación del aglutinante de Co y Cr se sometió a las muestras al proceso de ataque electroquímico con una solución de 5-10 mL HCl y 100 mL de agua a 3 V por 2 min de acuerdo a la norma ASTM E407-07 [90].

# 3.3 EQUIPO.

Con respecto al equipo utilizado en el proceso de recubrimiento mediante LC de WC-10Co-4Cr fue el siguiente:

Para obtener el peso del polvo WC-10Co-4Cr que se utilizó en esta investigación, fue una balanza electrónica Ve-1000 Marca Velab con una máxima carga de 1000g.

Para generar los revestimientos se utilizó un láser de 4000 W pulsed Yb: YAG, marca Trumpf modelo TruDisk 6002 del laboratorio de manufactura aditiva del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) en la Ciudad de Querétaro, México. El equipo consta con un brazo robótico con un controlador ABB, cámara de visión, mesa de depósitos con configuración para sujeción de piezas, extractor de polvos, como se muestra en la Figura 3-4 a) y b). El sistema de alimentación de polvos marca Medicoat se exhibe en la Figura 3-4 c), el cual consta de un contenedor de polvos y un sistema de alimentación del tipo transportador oscilatorio, en el cual está integrado por un controlador para regular el flujo de alimentación del polvo, a partir de un % de trabajo y un flujo de gas protector.

El corte del sustrato AISI/SAE 1020 con recubrimiento de WC-10Co-4Cr se realizó en una electroerosionadora CNC, tipo hilo modelo BKDK marca Titanium con máximo de corriente de 2 A, 90 V, un ancho de pulsos de 5 µs y un avance de 3 mm/min.

La medición geométrica de los recubrimientos (altura, profundidad, ancho y ángulo) y el porcentaje de porosidad se evaluaron en tres secciones diferentes en sección transversal para cada condición.

Con respecto al tamaño de partícula de WC en los recubrimientos por LC fue mediante la técnica de diámetro de Feret en tres regiones para cada muestra, estas mediciones se realizaron utilizando el software de análisis de imágenes Imagen Pro Plus, versión 3.0.

Para la evaluación microestructural en la sección trasversal de los recubrimientos, se utilizó un microscopio óptico (MO) marca Unión Versament modelo 3. Por otra parte, el análisis microestructural a altos aumentos se efectuó en un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Tescan Mira3, equipado con un espectómetro de Rayos X de energía dispersiva (EDX, energy-dispersive X-rayspectrometer) XFlash Detector 6 | 60 Bruker a 60 eV en F Ka con una área activa de 60 mm<sup>2</sup>, con un tiempo de 15 min de escaneo, en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales SA de CV, Saltillo, México.

Los recubrimientos fueron evaluados por Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés) usando una radiación Cu-K $\alpha$  ( $\lambda$ = 0.15418 nm) a 40kV y 25 mA usando un modo de exploración continua (continuous scan mode) de 0.01°/s en un difractómetro

D8Advance Bruker en la Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales en la Universidad Autónoma de Zacatecas.

Para la obtención de los valores de microdureza Vickers se utilizó un microdurómetro marca Shimadzu con una carga de 300 g y un tiempo de permanecía de 15 s, los ensayos se realizaron en forma vertical al revestimiento tomando tres indentaciones para cada condición.





Figura 3-4 Equipo láser para realizar recubrimiento mediante LC y manufactura aditiva, a) Laboratorio de manufactura aditiva, b) Controlador ABB de brazo robótico y c) Equipo de alimentación de polvos mediante transportador de oscilación. Fuente: Elaboración propia.

# 3.4 PROCEDIMIENTO.

### 3.4.1 Preparación del sustrato.

Antes de realizar el recubrimiento por LC, las muestras de acero AISI/SAE 1020 (sustrato) se sometieron a un proceso de limpieza mediante sandblast con partículas de  $AI_2O_3$ , donde se obtuvo una acabado superficial de 6 µm de acuerdo a la norma JIS B 0601(1994).

# 3.4.2 Calibración y determinación del sistema del flujo de alimentación del polvo WC-10Co-4Cr.

Para la calibración del flujo de alimentación del polvo se realizaron los siguientes pasos:

- Se vertió en el contenedor del alimentador 249.95 g de polvo (WC-10Co-4Cr).
- Se realizó la configuración del flujo transportador del polvo a 18 L/min con gas Ar, y se evaluó la caída del polvo mediante el sistema de transportador oscilatorio (Figura 3-5 a), el flujo del transportador se puede elevar o disminuir de acuerdo a la densidad del polvo que se esté manejando durante el proceso.
- Se configuró el alimentador en un rango de 25 al 55% de trabajo (ver Figura 3-5 b), para obtener el flujo de alimentación del polvo en intervalos del 5%.



Figura 3-5 a) Ventana de caída del polvo mediante un sistema de transportador oscilatorio y b) Control de dosificación del flujo másico en % de trabajo y flujo del gas transportador (L/min). Fuente: Elaboración propia.

 En cada intervalo del % de trabajo, el brazo robótico realizaba una secuencia de 3 etapas programadas; el primer movimiento se realizaba a un recipiente (1) e inyecta el polvo durante 30 s hasta homogenizarse el flujo, posteriormente se trasladaba al recipiente (2) y permanecía durante 10 s inyectando polvo, y finalmente pasaba al recipiente (3) para inyectar el polvo restante en las vías de alimentación por 30 s, como se exhibe en la Figura 3-6.

- Posteriormente, se pesaba el recipiente (2) con el polvo y se restaba el peso del recipiente (peso del recipiente 33.02 g).
- Finalmente con el pesaje obtenido del polvo y el tiempo, se obtenía el flujo másico (g/s), para cada intervalo del % de trabajo del alimentador del polvo.
- Con los datos adquiridos se generó una de relación del % de trabajo con el flujo másico (g/s) para el polvo WC-10Co-4Cr (Ver

• Tabla 3-2).



Figura 3-6 Obtención del flujo másico del polvo WC-10Co-4Cr. Fuente: Elaboración propia.

% de trabajo del	Pesaje del polvo	Flujo de alimentación	Flujo de alimentación
alimentador del polvo.	WC-10Co-4Cr.	del polvo.	del polvo.
	(g)	(g/s)	(g/min)
25	0.16	0.016	0.96
30	0.28	0.028	1.68
35	0.76	0.076	4.56
40	1.51	0.151	9.06
45	2.59	0.259	15.54
50	3.94	0.394	23.64
55	4.25	0.425	25.5

Tabla 3-2 Relación del % de trabajo y flujo másico (g/s) en un tiempo de 10 s para el polvo WC-10Co-4Cr con un flujo de transporte del polvo de 18 L/min con gas Ar. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Calibración de la trayectoria del láser y sujeción del sustrato.

Se programó el brazo robótico para realizar un movimiento lineal de 60 mm, con una distancia de la boquilla al sustrato (AISI/SAE 1020) de 16 mm (Figura 3-7a), y un flujo de gas protector de 20 L/min. Las muestras fueron sujetadas mediante un sistema de sujeción para evitar algún desplazamiento durante el proceso en los ejes X, Y y Z de la mesa, como se observa en la Figura 3-7b.

Finalmente, se generaron corridas de prueba del proceso de LC para verificar el funcionamiento del equipo y realizar las adecuaciones pertinentes para evitar algún percance durante el proceso (Figura 3-8 a y b). Una estrategia que se realizó fue generar un pre-flujo de 30s de gas protector y gas de arrastre, con el objetivo de garantizar que el flujo de alimentación del polvo se homogenizará para posteriormente trasladarse al sustrato y proyectar el haz del láser, esta condición se aplicó para cada recubrimiento aplicado en este investigación.



Figura 3-7 a) Alineación del láser y b) Sistema de sujeción de muestras. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3-8 a) Proceso mediante LC y b) enfriamiento de la muestra posterior a la trayectoria del recubrimiento. Fuente: Elaboración propia.

# 4. PARAMETRIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE POLVO WC-10Co-4Cr POR LÁSER.

### 4.1 PARAMETRIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE POLVO WC-10CO-4CR POR LÁSER.

Experimentos previos se realizaron para observar el comportamiento del proceso de recubrimiento por láser (Laser Cladding-LC), aplicando un diseño de experimentos Taguchi con un arreglo de 4 factores y 5 niveles donde se consideraron potencia (kW), velocidad de avance (mm/s), flujo de alimentación del polvo (g/s), pulsos activo y desactivo del láser (ms). Se mantuvo constante la frecuencia (f) y el diámetro del punto o haz del láser de 0.4 mm, con un total de 25 experimentos, como se muestra en la Tabla 0-1 del Anexo I.

Para el cálculo de los pulsos se obtuvo el periodo (T) a partir de la frecuencia (f=50Hz) resultando 0.20 s cuando el láser se está proyectado totalmente (ecuación 4-1). En la Tabla 4-1s se muestra la duración del pulso en porcentajes de duración.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \, Hz} = 0.02 \, s = 20 ms$$

#### ecuación 4-1

	Duración (%)	Duración del pulso (s)	Láser Activo (%)	Láser Desactivo (%)
_	10%	0.002	10	90
	30%	0.006	30	70
	70%	0.014	70	30
	90%	0.018	90	10
	100%	0.20	100	0

Tabla 4-1 Duración del pulso para una frecuencia de 50Hz. Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron 25 recubrimientos (muestras de la 1 a la 25) donde se puede apreciar la apariencia superficial; algunas condiciones con exceso de calor generado por la potencia y velocidad de avance; es evidente que algunos recubrimientos tienen presencia de porosidad, topografía irregular y discontinuidad superficial (ver Figura 4-1).



Figura 4-1 Condiciones de las 30 muestras en el proceso de parametrización del proceso LC con polvo WC-10Co-4Cr. Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el efecto de los parámetros potencia (W), velocidad de avance (mm/s), flujo de alimentación del polvo (g/s), pulsos activo y desactivo del láser (ms), sobre la energía por unidad de área  $E_a$ , el porcentaje de dilución (%D) y la altura (h), se analizó mediante un ajuste de modelo por el diseño de Taguchi.

El estudio mostró que los parámetros que tienen mayor impacto sobre  $E_{\alpha}$  son: el flujo de alimentación y velocidad de avance, y de menor influencia la potencia, con respecto a los pulsos estos resultaron sin efecto, de acuerdo al gráfico de *Pareto* (ver Figura 4-2 a). En el estudio estadístico se evaluó para encontrar los parámetros para generar un mínimo de  $E_{\alpha}$ , que de acuerdo a la literatura se recomienda para polvos de WC-12Co de 30 J/mm<sup>2</sup> (19), lo cual se deduce que una potencia de 500 W, una velocidad de avance de 10 mm/s y un flujo de alimentación de 0.2 g/s es necesario para generar una  $E_{\alpha}$  menor, como se observa en la Figura 4-2 b-d); el recubrimiento obtenido con estas condiciones, resultó con porosidad y discontinuidad superficial en el depósito. Por otra parte, se debe considerar que un cambio en el diámetro del spot del haz del láser genera una reducción en la  $E_{\alpha}$  de acuerdo a la ecuación 2-2, lo cual indica que para obtener una  $E_{\alpha}$  de 30 J/mm<sup>2</sup> se debe calibrar el diámetro del spot del láser a 1.6 mm aproximadamente, utilizando los parámetros mencionados.



Figura 4-2 Graficas estadísticas de efecto de los parámetros sobre la energía promedio por unidad de área  $E_a$ , a) Grafico de Pareto, b) Efectos principales, c) y d)  $E_a$  vs potencia y velocidad de avance. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la dilución %D, de acuerdo a los datos tratados estadísticamente los parámetros que tienen mayor influencia son: pulsos del láser, flujo de alimentación, velocidad de avance y finalmente la potencia, como se muestra en la Figura 4-3 a-b), de acuerdo a la literatura el que tiene mayor influencia es la potencia [17, 55]. Se ha señalado que un rango admisible para la dilución en WC-Co es 10-45% para una pista de revestimiento [13, 17], por lo cual para generar una menor %D, se pueden seleccionar

una potencia de 500 y 1000 W con velocidades de avance entre un rango de 1-4 mm/s, asimismo la potencia entre 625 y 875 W con velocidades de avance entre 7 y 9 mm/s ( ver Figura 4-3 d). Con respecto a los pulsos activos, una selección de los pulsos activos menor a 10 ms y potencias entre 500-1000 W se creará una dilución menor al 40%, ver Figura 4-3 d). Por lo tanto, los parámetros combinados de potencia, alimentación del polvo y velocidad de avance pueden controlar principalmente la dilución [17, 55].



Figura 4-3 Graficas estadísticas de efecto de los parámetros sobre el porcentaje de dilución %D, a) Grafico de *Pareto*, b) Efectos principales, c) %D vs potencia y velocidad de avance y d) %D vs potencia y pulsos activos. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó el efecto de los parámetros con respecto a la altura del recubrimiento como respuesta, con el objetivo de obtener recubrimientos para aplicación industrial donde se genera alta cantidad de deposición. Encontrando que los pulsos del láser, seguido por la potencia, el flujo de alimentación y velocidad de avance son los parámetros con efecto en orden jerárquico, como se exhibe en la Figura 4-4 a) y b). Considerando que

la más grande mejor para generar recubrimiento con aceptable altura es necesario seleccionar una potencia de 500 W, velocidad de avance de 3 mm/s, con un flujo de alimentación de 0.066 g/s y un pulso activo de 20 ms, como se observa en la Figura 4-4 c). Los parámetros de mayor influencia es la velocidad de avance y potencia de acuerdo a la literatura [17, 18, 23, 55, 56], por lo tanto, si se utiliza una velocidad de avance entre 1 a 5 mm/s, aplicando potencias superior a los 1200 W, se obtendrá alturas mayor a 1000 μm (ver Figura 4-4 d).



Figura 4-4 Graficas estadísticas de efecto de los parámetros sobre la altura (h), a) Grafico de *Pareto*, b) Efectos principales, c) Altura vs potencia y pulsos activos y d) Altura vs potencia y velocidad de avance. Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron las ecuaciones de regresión para la energía promedio por unidad de área  $(E_{\alpha})$ , el porcentaje de dilución (%D) y la altura (h), en la Tabla 4-2, donde se puede Rcuadrado indicando la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

		R-				
Parámetro	Ecuaciones de regresión	cuadrada				
		(%)				
E	<b>E</b> <sub>a</sub> , <b>J</b> / <b>mm</b> <sup>2</sup> = 6068+ 0.879 Potencia, W+1085 Velocidad de avance, mm/s	74 79				
La	- 89575 Flujo de alimentación, g/s	70.70				
E	$E_{a}$ , J/ $mm^{2}$ = 22966 + 6.66 Potencia, W + 4798 Velocidad de avance, mm/s					
Ea	- 550260 Flujo de alimentación, g/s + 93.1 Pulso Activo, ms + 0.000028 P <sup>2</sup>	00 40				
Ajuste	- 462.7 V <sup>2</sup> + 2146459 FA <sup>2</sup> - 0.81 PA <sup>2</sup> + 1.044 P*V - 86.8 P*FA + 0.0033 P*PA	70.00				
cuadrática	+ 18.6 V*PA - 1349 FA*PA					
%D	%D = -75.3 + 0.0227 Potencia, W - 20.9 Velocidad de avance, mm/s	31.84				
/00	+ 1609 Flujo de alimentación, g/s + 1.359 Pulso Activo, ms					
97 D	%D = 885 - 0.118 Potencia, W + 229 Velocidad de avance, mm/s					
	- 22736 Flujo de alimentación, g/s + 23.22 Pulso Activo, ms - 0.000006 P <sup>2</sup>	00 00				
Ajuste	- 17.9 V² + 78295 FA² - 0.330 PA² - 0.0504 P*V + 3.56 P*FA - 0.00489 P*PA	00.07				
cuadratica	+ 1.57 V*PA - 135 FA*PA					
h	h, Altura, μm = 318 + 1.035 Potencia, W + 235 Velocidad de avance, mm/s	76 66				
	- 20244 Flujo de alimentación, g/s + 53.57 Pulso Activo, ms					
	h, Altura, μm = -634 + 0.78 Potencia, W - 229 Velocidad de avance, mm/s					
h	+ 13200 Flujo de alimentación, g/s - 96 Pulso Activo, ms + 0.000710 P <sup>2</sup> + 20 V <sup>2</sup>					
Ajuste	- 12186 FA <sup>2</sup> - 0.51 PA <sup>2</sup> - 21.3 P*FA + 0.155 P*V + 0.0682 P*PA - 26.2 V*PA					
cuadrática	+ 1691 FA*PA					

Tabla 4-2 Ecuaciones de regresión para la energía promedio por unidad de área  $E_{\alpha}$ , dilución %D y altura *h* en recubrimientos por láser con polvo WC-10Co4Cr. Fuente: Elaboración propia.

Potencia (P), velocidad de avance (V), flujo de alimentación del polvo (FA), Pulsos Activos (PA), Altura (h).

Con respecto a la variación del flujo de alimentación del polvo WC-10Co-5Cr se observó que algunos recubrimientos tenían una mínima cantidad de polvo suministrada y diluida con el sustrato. Por otra parte, recubrimientos con alto flujo de alimentación del polvo, alta potencia y mínima velocidad de avance se observa cavidades superficiales. Cabe señalar que las muestras de la 26 a la 30 corresponden a pruebas sin flujo de alimentación para evaluar el efecto de la potencia y velocidad de avance en el sustrato.

Se aplicó inspección visual y se seleccionaron los revestimientos denominadas 3, 4, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23 y 24 (ver Figura 4-1), a los cuales se les realizó un análisis metalográfico en sección transversal.

Los resultando revelaron una dilución por encima del 60%, además se presenta una gran cantidad de porosidad atribuyéndolo a la alta tendencia del material a la oxidación, formación de gas durante el proceso por el sobrecalentamiento donde el grafito reacciona con el oxígeno formando CO y CO<sub>2</sub>, por otra parte se observó fracturas dentro del recubrimiento debido a los gradientes de solidificación (Ver Figura 4-5). El rango de energía promedio por unidad de área ( $E_a$ ) para los recubrimientos seleccionados fue entre 125-3000 J/mm<sup>2</sup>, es decir se generó un exceso de calor, que de acuerdo a la literatura se recomienda para polvos de WC-12Co de 30 J/mm<sup>2</sup> [19]. Por otra parte, es importante mencionar que una alta potencia y baja velocidad de avance genera el efecto denominado keyhole (inestabilidad de la cavidad de vapor) que genera porosidad [91].

Con respecto a la presencia de grietas en los revestimientos en las pruebas preliminares, el factor principal es térmico, debido a velocidades altas de fusión, solidificación y enfriamiento en el proceso de LC, lo cual puede generar un estrés térmico que excede el límite de resistencia del material por tensión o compresión, pero principalmente es a tensión [26, 92]. Hasta ahora, el mecanismo de generación de grietas en el revestimiento está relacionado con la potencia del láser, el diámetro del láser y la velocidad de avance, aunque otros factores pueden influir [22, 26].

Vale la pena mencionar que en estas pruebas preliminares se realizaron con la finalidad de optimizar los parámetros para obtener revestimientos aceptables y sólidos; se presentaron defectos tales como: falta de adhesión, agujeros, humectación deficiente, interfaz delgada, topografía irregular de la superficie y sobre-dilución. Además, se ha encontrado en la literatura que una cantidad mayor 8% de Co y una buena selección de los parámetros principales se pueden obtener recubrimientos sin grietas [93].



Figura 4-5 Análisis en sección transversal de los recubrimientos 3, 4, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23 y 24. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los experimentos previos y el análisis, se propusieron los parámetros que se muestran en la Tabla 4-3 donde se seleccionó dos configuraciones del láser; forma continua (Continuos Wave-CW) y pulsante (Discontinuos Wave-DW) para valores de 0.014 y 0.001s a una frecuencia de 50Hz.

Por otra parte, se seleccionó un diámetro del punto del láser de 3.8 mm con la finalidad de disminuir la energía promedio por unidad de área  $E_{\alpha}$ , se mantuvo fijo la velocidad de avance y flujo de alimentación; el arreglo de los experimentos resultó en 14 recubrimientos, como se muestra en la Tabla 4-3.

Variable entrada					Variables constantes			
Energía	Potencia	Tipo	Diámetro	Velocidad	Flujo de	Tipo	Flujo	Flujo del gas
por	del láser	de	de láser	de avance	alimentación	de	del	de
pulso	(kW)	pulso	(mm)	(mm/s)	del polvo	gas	gas	transporte
del láser		(s)			(g/s)		(L/min)	del polvo (I /min)
18, 20,	0.9,1.0,1.1,	CW	3.8	10	0.42	Ar	20	18
22, 24 y	1.2 y 1.5							
30								
12, 14,	0.6, 0.7, 0.8,	0.014	3.8	10	0.42	Ar	20	18
16,18,	0.9, 1.0, 1.1,	DW						
20, 22,	1.2 y 1.5.							
24, 30								
12	0.6	0.010	3.8	10	0.42	Ar	20	18
		DW						

Tabla 4-3 Parámetros para el recubrimiento por láser con polvo de WC-10Co-4Cr. Fuente: Elaboración propia.

CW: Continuous Wave –Onda continua; DW: Discontinuos Wave –Onda discontinua

### 4.2 ANÁLISIS MACROESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROCESO DE LC CON POLVO DE WC-10CO-4CR.

En la Tabla 4-4, se observan los valores de energía promedio por unidad de área ( $E_a$ ) mediante láser con onda continua (CW), obtenidos a partir de la ecuación 2-2. Se muestran las mediciones geométricas de los recubrimientos como la altura (h), ancho (W), ángulo de mojado ( $\theta$ ), profundidad (b), dilución (D) y finalmente el % de porosidad para cada condición. Las mediciones geométricas de **h**, **w** y **b** se incrementan cuando aumenta  $E_{\alpha}$ . Se pueden apreciar valores mayores a 9.22% de porosidad para todas las condiciones (Figura 4-6), esto se le atribuye a la reacción del WC a la alta temperaturas durante el proceso debido a la precipitación del C como grafito, el cual reacciona con el oxígeno atmosférico formando productos gaseosos como CO y CO<sub>2</sub> los cuales pueden quedar atrapados sin tener tiempo de salir del recubrimiento [19, 74]. Finalmente, se puede apreciar que la dilución no aumenta con el incremento de  $E_{\alpha}$  (ver Figura 4-6).

Potencia	Ea	I	Mediciones geométricas del recubrimiento				
(kW)	(J/mm²)	h (µm)	w (μm)	θ (°)	b (μm)	D (%)	Porosidad
0.9	24	488.39±3.01	1871.76±3.2	67.67±3.84	167.91±7.32	25.74±0.78	16.47±0.57
1	26	402.81±7.68	2061.85±6.65	47.31±5.66	253.61±3.68	38.63±0.11	10.84±0.9
1.1	29	436.25±2.69	1986.39±6.32	52.22±1.89	125.83±4.93	20.55±0.55	13.14±0.28
1.2	32	452.7±7.1	2119.57±4.26	21.99±3.65	247.86±7.63	35.8±0.64	9.22±0.79
1.5	39	792.53±6.4	2127.34±6.1	53.05±6.14	347.165±7.19	33.54±0.59	21.77±0.19

Tabla 4-4 Obtención de la  $E_a$ , medición geométrica y dilución de recubrimientos mediante el proceso de LC con onda continua (CW) a una frecuencia de 50 Hz. Fuente: Elaboración propia.





Figura 4-6 Recubrimientos por láser con onda continua, a)  $E_{a24}$ , b)  $E_{a26}$ , c)  $E_{a29}$ , d)  $E_{a32}$  y e)  $E_{a39}$ . Fuente: Elaboración propia.

En el caso de recubrimientos con láser utilizando pulsos (DW) configurado a 14 ms con una frecuencia de 50 Hz, los resultados en la sección transversal de las muestras de la Figura 4-7 a)  $E_{a16}$ , b)  $E_{a18}$  y c)  $E_{a21}$  presentan un alto porcentaje de porosidad en un rango de 41-24% y diluciones de entre 14.65 a 23.71 % de acuerdo a las mediciones presentadas en la Tabla 4-5. Para el caso de la Figura 4-7 d), tiene una porosidad de 11.11% y una dilución del 15.05%. De acuerdo al conjunto de probetas mostradas en la Figura 4-7, la condición  $E_{a24}$  resultó con las condiciones para su estudio y análisis, ya que cuenta con anclaje al sustrato y mínima porosidad. Para el caso del otro conjunto de secciones (ver Figura 4-8) correspondiente a  $E_{a26}$  y  $E_{a29}$  es evidente una alta porosidad, sin embargo para c)  $E_{a32}$  y d)  $E_{a39}$  es mínima la presencia de porosidad y la dilución está entre 23-25%.

De lo anterior, se puede observar que las condiciones de  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ , son condiciones con valores de dilución y porosidad aceptable en el caso de esta serie de experimentos de los recubrimientos con WC-10Co-4Cr.

Potencia	E <sub>a</sub> (J/mm <sup>2</sup> )	I	Mediciones geométricas del recubrimiento				
(kW)		h (µm)	w (µm)	θ (°)	b (µm)	D (%)	Porosidad
0.6	16	305.77±4.47	1520.82±4.92	47.32±3.11	49.33±6.44	14.65±0.96	41.09±0.59
0.7	18	297.62±4.98	1500.27±5.14	39.64±5.64	80.35±10.21	20.74±0.51	29.97±0.61
0.8	21	359.39±3.61	1434.18±5.06	55.22±4.4	109.69±6.78	23.71±0.95	24.49±0.52
0.9	24	469.63±4.18	2003±6.56	43.29±5.14	83.10±7.35	15.04±0.6	11.11±0.24
1	26	452.11±2.71	1716.61±7.33	43.66±5.92	113.73±8.33	20.07+1.28	30.17±0.61
1.1	29	374.38±1.89	1966±5.38	41.67±6.8	132.18±10.51	26.10+1.39	14.37±0.83
1.2	32	551.74±3.72	2224.25±4.67	54.73±4.44	168.75±6.94	23.41±0.19	7.99 ± 0.43
1.5	39	596.37±3.86	2239.76±9.07	56.62±4.61	201.46±8.77	25.25±0.19	3.78 ± 0.41

Tabla 4-5 Evaluación geométrica y condiciones de muestras de recubrimiento por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-7 Recubrimientos por láser con onda discontinua con pulsos de 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.a)  $E_{a16}$ , b)  $E_{a18}$ , c)  $E_{a21}$  y d)  $E_{a24}$ . Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-8 Recubrimientos por láser con onda discontinua con pulsos de 14 ms y una frecuencia de 50 Hz. a)  $E_{a26}$ , b)  $E_{a29}$ , c)  $E_{a32}$  y d)  $E_{a39}$ . Fuente: Elaboración propia.

Para el recubrimiento en la condición con pulsos del láser de 10 ms, se observó desprendimiento del recubrimiento debido a la falta de penetración por el efecto de la potencia seleccionada (0.6 kW) con una  $E_{\alpha}$  de 16 J/mm<sup>2</sup> y un  $I_{\rho}$  de 831 W/mm<sup>2</sup>. En la Figura 4-9 se observa la sección transversal y es evidente que se aprecia alta porosidad

y falta de dilución. Las mediciones geométricas se presentan en la Tabla 4-6, donde el efecto de la penetración generó un valor nulo en la dilución.

Tabla 4-6 Evaluación geométrica y condiciones de recubrimiento por láser con onda discontinua con 10 ms y una frecuencia de 50 Hz. Fuente: Elaboración propia.

Potencia (kW)	$E_{\alpha}$ (J/mm <sup>2</sup> )	Medic	Mediciones geométricas del recubrimiento				
		h (µm)	w (µm)	θ (°)	b (µm)	D (%)	Porosidad
0.6	16	199.98±3.58	1126.47±6.22	19.07±3.56	0	0	59.62±1.42



Figura 4-9 Recubrimientos por láser con onda discontinua con pulsos de 10 ms y una frecuencia de 50 Hz. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la inspección realizada en el microscopio óptico (MO) se seleccionaron las muestras  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ , son condiciones con valores de dilución y porosidad aceptable en el LC con WC-10Co-4Cr y geométricamente como se puede observar en la Tabla 4-7. Las muestras  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ , se someterán un análisis detallado.

Tabla 4-7 Medición geométrica, dilución y % de porosidad de las muestras  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ , mediante LC con WC-10Co-4Cr. Fuente: Elaboración propia.

Potencia	Eα	Me	Mediciones geométricas del recubrimiento					
(kW)	(J/mm <sup>2</sup> )	h (μm)	w (µm)	θ (°)	b (µm)	D (%)	Porosidad	
0.9	24	469.63±9.11	2003±8.63	43.29±2.58	83.10±2.71	15.04±0.6	11.11±0.24	
1.2	32	551.74±19.18	2224.25±6.4	54.73±3.43	168.75±7.65	23.41±0.19	7.99 ± 0.43	
1.5	39	596.37±14.06	2239.76±4.5	56.62±2.87	201.46±4.88	25.25±0.19	3.78 ± 0.41	

# 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Se seleccionaron los recubrimientos con una energía promedio de  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ , para el análisis microestructural mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB), identificación de fases por DRX y microdureza.

### 5.1 POROSIDAD Y DILUCIÓN.

La influencia de la energía promedio por unidad de área ( $E_a$ ) con respecto al porcentaje de porosidad se muestra en la Figura 5-1. Los resultados revelaron un contenido de porosidad por debajo del 11.11±0.24% donde la porosidad se reduce al aumentar  $E_a$ , en consecuencia la muestra con  $E_{a39}$  mostró el contenido de porosidad más bajo de aproximadamente 3.78±0.41%. Cabe mencionar que el parámetro predominante que reduce la generación de poros es la potencia del láser (es decir, lógicamente al aumentar  $E_a$ ) esto se debe a una menor cantidad de gas atrapado dentro del metal fundido y debido a un mayor tiempo de solidificación, lo cual permite que el gas pueda salir antes de que el líquido solidifique por completo [13, 94].

La velocidad de enfriamiento (*R*) y el tiempo de solidificación (*S*<sub>t</sub>) en los recubrimientos por el proceso láser son factores que influyen en la microestructura y el porcentaje de porosidad en los recubrimientos, los cuales se pueden controlar con los parámetros principales en el proceso de recubrimiento por láser es decir, potencia del láser (*P*), velocidad de avance (*v*) y diámetro del punto del láser (*D*). Con base en fundamentos de cálculos analíticos de velocidades de enfriamiento y solidificación en soldadura (95– 98), se generó la Tabla 5-1, donde se observa que el aumento de la energía de entrada lineal suministrada, para los recubrimientos  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$  la velocidad de enfriamiento (*R*) disminuye, este efecto puede generar un cambio en la microestructura en los recubrimientos.

Con respecto al tiempo de solidificación ( $S_t$ ) en los recubrimientos (ver Tabla 5-1), es evidente que una alta cantidad de energía lineal suministrada permite mayor tiempo en

solidificación, donde resulta en un menor porcentaje de porosidad debido a que se permite expulsar el gas en la fusión del polvo y sustrato.

En el anexo II se expone las condiciones de cálculo, las propiedades físicas del material y ecuaciones para obtención de la velocidad de enfriamiento (R) y el tiempo de solidificación ( $S_t$ ) para los recubrimientos con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

Tabla 5-1 Velocidad de enfriamiento (R) y tiempo de solidificación (St) para los recubrin	nientos E <sub>a24</sub> ,
E <sub>a32</sub> y E <sub>a39</sub> . Fuente: Elaboración propia.	

Potencia	Ea	Energía	R	St
(kW)	(J/mm <sup>2</sup> )	lineal	(°C/s)	(ms)
		(J/mm)		
0.9	24	1.5	-6 170 421	0.40
1.2	32	2	-3 470 862	0.54
1.5	39	2.5	-2 221 351	0.68

Por el contrario, la dilución aumenta con el incremento de  $E_{\alpha}$  (Figura 5-2). La dilución fue de aproximadamente del 15.04±0.6% para  $E_{\alpha 24}$ , 23.4±0.19% y 25.25±0.19% para  $E_{\alpha 32}$  y  $E_{\alpha 39}$ , respectivamente. De acuerdo con los resultados mencionados anteriormente se ha establecido que un rango aceptable para la dilución en WC-Co está dentro del rango de 10-45% para una pista de revestimiento [13, 17]. Es evidente que el valor de dilución no puede ser constante y puede llegar a variar con el tipo de sustrato, el tipo de polvo, el haz de láser, el dispositivo de movimiento y la cantidad de polvo suministrada (27).



Figura 5-1 Influencia de la energía promedio por unidad de área ( $E_{\alpha}$ ) con respecto al porcentaje de porosidad. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5-2 Influencia de la energía promedio por unidad de área ( $E_{\alpha}$ ) con respecto al porcentaje de dilución. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2 MICROESTRUCTURA.

En la Figura 5-3 se presenta la microestructura de la sección transversal de las muestras del revestimiento para a)  $E_{a24}$ , b)  $E_{a32}$  y c)  $E_{a39}$ . De acuerdo con la Figura 5-3 a-c, en las
muestras se observa consistentemente un ancho de revestimiento simétrico con dimensiones dentro de 2.0 a 2.2 mm. De acuerdo con los resultados mencionados anteriormente, las características del revestimiento que se muestran (es decir, porosidad, dilución y ancho) son una indicación de pistas revestidas altamente densas y bien unidas [56]. Además, se ha declarado en la literatura que al tener una cantidad de Co mayor que 8%, se puede obtener un recubrimiento sin grietas [93].

La sección transversal del revestimiento se ha dividido en diferentes regiones: la interfaz (junto a la línea de sustrato/revestimiento), la región exterior y la región interior, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 5-3 d. El análisis detallado de la microestructura resultante para cada una de las regiones mencionadas anteriormente se analiza en los párrafos siguientes.





Figura 5-3 Macrografías de corte transversal de las muestras con revestimiento por láser: a)  $E_{a24}$ , b)  $E_{a32}$ , c)  $E_{a39}$  y d) Esquema que indica varias regiones dentro del revestimiento de estudio. Condición: MAG: 91 x, HV: 15.0 kV, WD 17.83 mm y Det: BSE. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-4, se observa una microestructura representativa de la interfaz (tomada como lo indica la posición del recuadro rectangular etiquetado como "a" en color rojo de la Figura 5-3d) para todas las condiciones que se exhiben en la Figura 5-3.

La microestructura de la interfaz se compone de un crecimiento de grano planar que se extiende desde la línea de sustrato/revestimiento hasta aproximadamente de 1 a 2 µm de distancia dentro del revestimiento (etiquetada como A); una zona de carburos eutécticos (marcada como B) presumiblemente formada por el tipo de carburo M<sub>6</sub>C [13]. Se ha reportado anteriormente que la formación de carburos eutécticos está relacionada con el efecto de dilución con el sustrato; cuanto mayor es la dilución, mayor es la formación de fases que contienen hierro, lo que disminuye la formación de carburos [23, 99]. Además, también se observa una mezcla de dendritas columnares relativamente finas (etiquetadas como C). Asimismo, la fase del aglutinante de Co-Cr (D) y las partículas de WC (E) se distinguen claramente a medida que se aleja de la interfaz, siendo esta distancia una función de los parámetros de procesamiento.

Por ejemplo, la fase del aglutinante Co-Cr en la muestra  $E_{a24}$  se localizó a 13 µm aproximadamente, mientras que las muestras  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$  fueron de aproximadamente 21 µm y 34 µm, respectivamente. Vale la pena mencionar que la extensión de la interfaz descrita anteriormente aumentó con la dilución; por lo tanto, la muestra  $E_{a39}$  resultó con una mayor dilución; también se observó con la mayor extensión de la región de la interfaz.



Figura 5-4 Microestructura representativa de la región de la interfaz de la muestra  $E_{\alpha 39}$ , mediante un mapeo por EDS para: b) Fe, c) Co, d) Cr y e) W. Condición: MAG: 5.0 kx, HV: 5.0 kV, WD: 5.3 mm y Det: BSE. Fuente: Elaboración propia.

Un análisis de mapeo EDS realizado en la interfaz, el cual se ilustra en la Figura 5-4b-e. La distribución del Fe (Figura 5-4b) dentro de la interfaz resultó lógicamente debido a una mezcla adecuada con la química del sustrato. De hecho, la concentración de Fe es mayor al lado del sustrato y esto se reduce si se mueve hacia el interior del recubrimiento. Por otro lado, Co y Cr (Figura 5-4c y d) se mezclan correctamente junto con la interfaz. Al comparar la Figura 5-4b y la Figura 5-4e; existe una región rica que contiene una gran cantidad de áreas de W, que corresponden a las partículas brillantes (etiquetadas como E) observadas en la Figura 5-4a, por lo tanto, se infiere que esas partículas brillantes corresponden a WC.

La Figura 5-5a) muestra la microestructura (tomado como lo indica la posición del recuadro cuadrado etiquetado como "b" en la Figura 5-3 d) de la región externa compuesta por una matriz continua de aglomerante de Co y Cr (región oscura) junto con partículas de WC (áreas claras) conservando el tamaño de partícula y la morfología de la materia prima original (1.0 µm en promedio). El análisis de mapeo mediante EDS realizado en la microestructura de la región externa que se exhibe en la Figura 5-5b-d confirmó la distribución de las partículas de WC, así como la concentración de aglomerante de Co y Cr.



Figura 5-5 Región exterior a) microestructura representativa. Mapeo EDS para: b) W, c) Co y d) Cr. Condición: MAG: 5.0 kx, HV: 5.0 kV, WD: 9.9 mm y Det: SE. Fuente: Elaboración propia.

Para ilustrar aún más la distribución de los elementos en la sección transversal del revestimiento se realizó un mapeo de exploración lineal mediante EDS, en la Figura 5-6 a y b se muestra el perfil lineal de exploración mediante EDS. Con respecto a la Figura 5-6 c, se muestra una región de concentración de Fe lo cual corresponde a la acero del bajo carbono y la interface del recubrimiento, conforme se entra a recubrimiento esta concentración Fe desaparece, es evidente que posterior a distancias de 200 µm se exhibe una mezcla de W, Co, Cr y C típica del recubrimiento WC-10Co-4Cr.



Figura 5-6 Mapeo lineal mediante EDS-MEB. a) Perfil de recubrimiento de la muestra  $E_{\alpha 39}$ , b) mapa de exploración lineal y c) EDS de exploración lineal. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.3 FASES.

Los patrones de difracción de rayos X del WC-10Co-4Cr obtenidos en la superficie del revestimiento correspondiente a las muestras  $E_{a39}$ ,  $E_{a32}$ ,  $E_{a24}$  se muestran en la Figura 5-7. El patrón correspondiente del polvo de WC-10Co-4Co también se proporciona como referencia. Los resultados evidencia que el WC es la fase principal presente en todas las muestras después de la deposición; los patrones de XRD también revelan los picos de fase del aglutinante, Co y Cr, y la fase W<sub>2</sub>Co<sub>4</sub>C. Las trazas de W<sub>2</sub>C solo se detectan en las muestras depositadas utilizando una energía promedio por unidad de área de 32 y 39 J/mm<sup>2</sup>; de hecho, esto podría ocurrir debido a los valores más altos de  $E_a$  durante la deposición y los tiempos prolongados para liberar calor.



Figura 5-7 Patrones de DRX de las muestras de revestimiento de láser depositadas utilizando diferentes energías promedio de $E_{a39}$ ,  $E_{a32}$ ,  $E_{a24}$ y polvo de WC-10Co-4Cr. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4 MICRODUREZA.

La Figura 5-8, muestra el perfil de dureza de Vickers (HV) medido a lo largo de la zona de revestimiento como se ilustra esquemáticamente en el recuadro, la línea de sustrato/revestimiento corresponde a cero en la abscisa. En realidad, la indentación ubicada en el sustrato/línea del revestimiento cubrió tanto el sustrato como la región de la interfaz. Se obtienen valores de dureza promedio más altos dentro de la zona recubierta para la muestra  $E_{a24}$ ; por el contrario, se observan valores de dureza promedio más bajos en las muestras  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ . En particular, en la región interior del revestimiento (Figura 5-3d), los valores promedios de dureza para las muestras de  $E_{a24}$  fueron de hasta 1114 HV, mientras que para las otras muestras la dureza alcanzó un valor máximo de 1015 HV. Es interesante observar que los valores de dureza medidos en la región exterior alcanzaron por encima de 1193 HV en todas las muestras.

De acuerdo a la literatura, la dureza se puede aumentar incrementando la densidad del material y control adecuado del crecimiento del grano del WC [82]. La dureza del material depende en gran medida del tamaño de grano de WC donde un tamaño de grano de WC menor significa un material con mayor dureza [100].



Figura 5-8 Perfil de microdureza del revestimiento para  $E_{a24}$ ,  $E_{a32}$  y $E_{a39}$ . Fuente: Elaboración propia.

### 5.5 INFLUENCIA DE LA ENERGÍA PROMEDIO POR UNIDAD DE ÁREA ( $E_{\alpha}$ ).

La interfaz y la región externa fueron similares en cuanto al desarrollo de la microestructura en todas las muestras evaluadas y se analizaron sistemáticamente en las secciones anteriores. El efecto de  $E_{\alpha}$  en la microestructura resultante en la región interna.

En la Figura 5-9 a-c se observa la microestructura en la región interna de los revestimientos obtenidos a diferentes valores de  $E_{\alpha}$ . El tamaño promedio de grano de WC y las gráficas de frecuencia de distribución se presentan en la Figura 5-9d-f. La microestructura del revestimiento resultante se compone de partículas de WC (fase gris clara) y fase de aglutinante Co-Cr (fase gris oscuro). Como se observa, la morfología y el tamaño del grano de WC variaron significativamente con  $E_{\alpha}$ ; a una  $E_{\alpha}$  relativamente baja (24 J/mm<sup>2</sup>), la microestructura consiste en una distribución uniforme predominante de granos finos de WC con un tamaño promedio de 1.3 µm rodeado homogéneamente por la fase de aglomerante Co-Cr (Figura 5-9a). Para un valor de  $E_a$  = 32 J/mm<sup>2</sup>, se obtiene una microestructura heterogénea; se desarrolla una fracción considerable de crecimiento de grano WC que tiene una morfología angular y un tamaño de grano promedio de 3.0 µm, como se observa en la Figura 5-9b) y Figura 5-9 e). De manera similar, un aumento adicional en  $E_{\alpha}$ =32 J/mm<sup>2</sup> resultó en granos de WC más grandes con un tamaño de grano promedio de hasta 3.5 µm y con una morfología triangular y/o poligonal predominante (Figura 5-9c). Es importante mencionar que el tamaño de grano promedio de las partículas de WC en el polvo de alimentación original es de aproximadamente de 1.0 µm; en consecuencia, el valor de Ea24 resultó en un tamaño de grano de WC casi comparable con el polvo de alimentación original. Sin embargo, cuando  $E_{\alpha}$  alcanza valores mayores a 32 J/mm<sup>2</sup>, se logra un crecimiento de grano considerable de casi tres veces el valor del polvo original. No obstante, para las condiciones E<sub>a32</sub> y E<sub>a39</sub>, el aumento del tamaño del grano del WC cubrió un área de la región interna de aproximadamente del 34% y 51%, respectivamente.

Los resultados mencionados anteriormente son bastante consistentes con los resultados de dureza que se muestran en la Figura 5-8; por ejemplo, los valores de dureza más altos se midieron en muestras de  $E_{a24}$  que correspondían a un tamaño de grano menor (Figura 5-9); por el contrario, las muestras que resultaron en un tamaño de grano de WC más alto ( $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ ) exhibieron valores de dureza menores.



Figura 5-9 Microestructura en la región interna para las condiciones de: a)  $E_{a24}$ , b)  $E_{a32}$  y c)  $E_{a39}$ . Frecuencia de distribución WC tamaño de partícula d)  $E_{a24}$ , e)  $E_{a32}$  y f)  $E_{a39}$ . Condición: MAG: 5.0 kx, HV: 15.0 kV, WD: 24.45 mm y Det: BSE. Fuente: Elaboración propia.

La coalescencia es un proceso donde pequeñas partículas vecinas (o granos) se fusionan para formar partículas más grandes; este proceso ocurre si áreas contiguas están en contacto entre dos o más granos WC existentes, lo que lleva a la eliminación de los límites contiguos de granos si se proporciona suficiente energía de activación [47, 78, 101]. Esta contigüidad puede verse favorecida debido a diferentes condiciones que incluyen: humectación incompleta de partículas de WC en la fase líquida, bajo contenido de fase aglutinante, dispersión no homogénea de partículas de WC en la fase líquida, orientación preferencial entre los granos de WC, partículas de WC con forma facetada e incluso rotación de grano [47, 79, 102–104].

A pesar de que LC es un proceso de ciclo térmico corto con velocidades de calentamiento y enfriamiento rápidas (ciclo térmico corto); el crecimiento del grano WC está asociado con la acumulación térmica en la zona interior de las pistas revestidas WC-10Co-4Cr, como se ilustra en la Figura 5-9 b-c. La Figura 5-10a) presenta la zona interna con una  $E_a$  más alta, donde los granos en contacto se han fusionado mediante la eliminación del límite de grano donde los poros remanentes entre los granos indican que se produjo coalescencia en los límites del grano. Se proporciona una imagen de mayor aumento en la Figura 5-10b) tomada del rectángulo marcado de la Figura 5-10a). Se observa un tamaño de grano WC más grande para la condición  $E_{a39}$  como se muestra en la Figura 5-9c), esto confirma además que cuanto mayor sea el  $E_a$  empleado, mayor será el tiempo requerido para liberar la acumulación térmica y mayor será la posibilidad de que ocurra la coalescencia; por lo tanto, en ambas condiciones  $E_{a32}$  y  $E_{a39}$ ; la coalescencia es casi inexistente.

Otra evidencia, se presenta en la Figura 5-11, donde fue removido el aglutinante Co-Cr del revestimiento mediante ataque electroquímico, se puede observar la eliminación del límite de grano entre dos partículas de WC (flecha A); igualmente se señala (flecha B) la zona incompleta de la eliminación del límite de grano.



Figura 5-10 Coalescencia de WC en la región interna para  $E_{\alpha 39}$ . Condición: MAG: 15.0 kx, HV: 15.0 kV, WD: 27.67 mm y Det: SE. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5-11 Muestra  $E_{a39}$  en la zona interna sometida a ataque electroquímico de acuerdo a la norma ASTM E407-07 [64]. Condición: MAG: 30.0 kx, HV: 15.0 kV, WD: 29.08 mm y Det: SE. Fuente: Elaboración propia.

Se ha documentado que durante el proceso de sinterización, los granos sólidos de WC desarrollan completamente una forma rectangular, triangular, poligonal truncada o prismas casi hexagonales debido a tiempos más largos de exposición y manteniendo una temperatura alta, lo que conduce a una coalescencia completa [47, 105, 106].

En este trabajo, el cambio de morfología de los granos de WC en forma triangular y/o poligonal fue incompleto, además, muchos otros granos exhibieron morfología redondeada o elipsoidal, lo que sugiere que no se alcanzó el equilibrio o la morfología habitual de los granos sólidos encontrados en el proceso de sinterización, no se alcanzó aquí durante la deposición de LC debido a que las velocidades de calentamiento y enfriamiento fueron cortas para completar este proceso [107, 108].

La presencia de granos redondeados o elipsoidales sugiere que las partículas de WC no alcanzaron condiciones para una mayor coalescencia; como resultado, diferentes razones incluyen: una dispersión no homogénea de partículas, una falta de partículas facetadas, tal vez a una rotación de grano restringida de partículas de WC, y posiblemente a una orientación no preferida. Además, las partículas redondeadas o elipsoidales son bastante similares en términos de tamaño y morfología en comparación con las partículas originales (materia prima en polvo) antes de LC; esto confirma que algunas partículas de WC no se fusionaron debido a los rápidos ciclos térmicos.

El esquema proporcionado en la Figura 5-12 representa la secuencia de crecimiento del grano de WC a medida que aumenta la energía promedio; por ejemplo, la morfología y el tamaño de las partículas de WC en el polvo se ilustran en el esquema de la Figura 9a, cuando se ingresa un promedio bajo de energía; las partículas de WC permanecen casi inalteradas pero se obtiene un revestimiento aceptable (ver esquema Figura 5-12 b), siempre que la energía promedio aumente (Figura 9 c y d), el crecimiento de las partículas de WC es evidente y la morfología desarrolla una forma triangular y / o poligonal debida a la coalescencia, por lo tanto, de acuerdo con la descripción anterior: la coalescencia es el único mecanismo para el crecimiento del grano que ocurre en el proceso de LC con polvos de WC-10Co-4Cr. Nuevamente, las partículas redondeadas y elipsoidales no se fusionaron entre sí, sin embargo, la presencia de estas partículas se debe a la solubilidad parcial de W/C dentro de la fase de aglomerante de Co-Cr, se cree que la fase de aglutinante de Co-Cr se funde completamente mientras que los granos de WC no se pueden derretir totalmente pero experimentan una disolución parcial de la superficie en la pileta fundida.

Laser cladding region interior

Desarrollo de la morfología y tamaño de partícula



Figura 5-12 Secuencia de crecimiento del WC a) polvo original, b)  $E_{a24}$ , c)  $E_{a32}$  c)  $E_{a39}$ . Fuente: Elaboración propia.

### CONCLUSIONES.

- Los resultados indicaron que con un valor de energía promedio de E<sub>a</sub> = 24 J/mm<sup>2</sup>; la porosidad era sobre 11%, mientras que el valor de dilución se mantuvo en 15%, siendo así valores aceptables para la porosidad y dilución. Con respecto a la geometría (altura, ancho, ángulo y profundidad) los recubrimientos E<sub>a24</sub>, E<sub>a32</sub> y E<sub>a39</sub>, se considera adecuada para aplicaciones industriales.
- La descomposición del WC en W<sub>2</sub>C solo se detectan en las muestras depositadas utilizando una energía promedio de 32 y 39 J/mm<sup>2</sup>; esto podría ocurrir debido a los valores más altos de E<sub>a</sub> durante la deposición y los tiempos prolongados para liberar calor.
- 3. La microestructura en la interfaz fue consistente para todas las condiciones; con la presencia de un crecimiento planar, presencia de carburos eutécticos y una mezcla de dendritas finas columnares; sin embargo, cuanto mayor es la energía promedio, mayor es la extensión del interfaz. Mientras que la microestructura de la región exterior reveló la presencia del aglutinante Co-Cr junto con partículas de WC que retienen el tamaño y la morfología originales del polvo original.
- 4. Se produjo un crecimiento considerable del grano en la región interna del revestimiento, particularmente cuando se emplea una entrada de alta energía (es decir, por encima de 32 J/mm<sup>2</sup>); Los granos de WC crecen tres veces si se comparan con el tamaño de partícula de polvo original, además, la morfología de las partículas de WC desarrolló un crecimiento en forma triangular y/o poligonal.
- 5. Una fusión completa de pequeños granos vecinos en partículas más grandes y presencia de poros residuales entre los límites de partículas WC parcialmente delimitados se observan en la región interna; por lo tanto, el crecimiento del grano es atribuible a un mecanismo de coalescencia. Además, la presencia de partículas redondeadas y elipsoidales de WC se da por la solubilidad parcial de

W y C dentro de la fase del aglutinante Co-Cr; por lo tanto, esas partículas no se fusionaron (falta de coalescencia) debido a la falta de dispersión homogénea y la falta de partículas facetadas.

6. Las mediciones de dureza en la región interna dieron como resultado valores más altos para una condición de energía promedio baja (es decir, 24 J/mm<sup>2</sup>), en la muestra con un crecimiento de grano apenas observable; por el contrario, se observó un crecimiento de grano evidente y una dureza menor en condiciones de energía promedio más altas.

# APORTACIÓN DE LA TESIS.

Actualmente algunas investigaciones mencionaban la aglomeración de partículas de WC con polvos de WC-Co usando el proceso de recubrimiento por láser, sin embargo no se tenía reportado el mecanismo de coalescencia de partículas de WC utilizando el proceso de recubrimiento de laser con polvo de WC-10Co-4Cr en un acero de bajo carbono (AISI/SAE 1020) con respecto a la energía promedio, se encontró que este mecanismo de coalescencia de partículas de WC se presenta utilizando energías mayor a 32 J/mm<sup>2</sup> durante el proceso, el crecimiento del WC se produce en la región interna del revestimiento, los granos de WC crecen tres veces si se comparan con el tamaño de partícula de polvo original, además, la morfología de las partículas de WC desarrolló un crecimiento en forma triangular y/o poligonal, por otra parte, la presencia de partículas redondeadas y elipsoidales de WC se da por la solubilidad parcial de W y C dentro de la fase del aglutinante Co-Cr; por lo tanto, esas partículas no se fusionaron (falta de coalescencia) debido a la falta de dispersión homogénea y la falta de partículas facetadas, del mecanismo de coalescencia las mediciones de dureza en la región interna dieron como resultado valores más altos para una condición de energía promedio baja (es decir, 24 J/mm<sup>2</sup>), por el contrario una dureza menor en condiciones de energía promedio más alta.

# APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.

El desarrollo de recubrimientos por Laser Cadding con polvos WC-10Co-4Cr, ayudará al sector industrial a disminuir los costos de reparación de componentes, dispositivos o piezas que reducen sus dimensiones por mecanismos como desgaste y corrosión, sin embargo, se pretende que la fabricación de componentes y el uso del proceso de Laser Cladding este en armonía con el medio ambiente, sin disminuir el rendimiento y vida útil, es decir, si un componente presenta desgaste o corrosión prematuramente la industria necesitará remplazarlo lo cual llevará a la industria de la manufactura a fabricarlo generando un alto consumo de energía, consumo de materiales, generación de residuos y contaminación al ambiente, por lo tanto el uso de este tipo de recubrimiento por láser pretende incrementar la vida de uso de los elemento.

### **RECOMENDACIONES.**

- Se tiene que considerar que este estudio es para una sola trayectoria de recubrimiento, cuando se tiene que generar un recubrimiento con una serie de trayectorias sobrepuestas (overlap) no solo implica la fusión del polvo, sino también es necesario fundir un área del revestimiento generado con anterioridad y un área del sustrato, lo cual conduce a una disminución de la dilución.
- Evaluar y analizar la tasa de desgaste en los recubrimientos mediante WC-10Co-4Cr en Laser Cladding y contrastarlo con el mecanismo de coalescencia en las partículas se WC que se presenta en la sección transversal.
- Falta una homogenización a nivel internacional del concepto de energía promedio por unidad de área E<sub>a</sub> en el área de recubrimientos por el proceso de Laser Cladding de acuerdo al uso de los parámetros potencia, velocidad de avance, diámetro del láser, flujo de alimentación, pulsos y frecuencias.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- [1] J.E FERNÁNDEZ, R. VIJANDE, R.TUCHO, J. RODRÍGUEZ, A. Martin. Effect of cold deformation on the abrasive resistance of coatings with applications in the mining industry. Wear. 2001. Vol. 250, no. 1–12, p. 28–31. DOI https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00626-3.
- [2] RAO, G Venkateswara. Corrosion in the Mining and Mineral Industry. International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology (IJISSET).
   2019. Vol. 5, no. 6, p. 11–17.
- [3] MARULANDA, Luddey and TRISTANCHO, Luis. The technology against the wearing is the thermal spray. *Prospectiva*. 2014. Vol. 12, p. 70–78.
- [4] MICHAEL B CORTIE, J.J MCEWAN, D. P Enrigth. Materials selection in the mining industry: Old issues and new challenges. South African Institute of Mining and Metallurgy. 2003. Vol. 96, no. 4, p. 145–175.
- [5] XIONG, Yuhong, LAU, Ki, ZHOU, Xiaoying and SCHOENUNG, Julie M. A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WC-Co cermets. Journal of Cleaner Production. 2008. Vol. 16, no. 10, p. 1118–1126. DOI 10.1016/j.jclepro.2007.05.007.
- [6] OFELIA MÉNDEZ-MEDRANO, Karla, JESÚS MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, Cecilio, ALVARADO-HERNÁNDEZ, Francisco, JIMÉNEZ, Omar, HUGO BALTAZAR-HERNÁNDEZ, Víctor, RUIZ-LUNA, Haideé, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, K O, -HERNÁNDEZ, Alvarado, JIMÉNEZ, F, BALTAZAR-HERNÁNDEZ, O, AND RUIZ-LUNA, V H and MÉNDEZ-MEDRANO, K O. Microstructure and Properties Characterization of WC-Co-Cr Thermal Spray Coatings. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2018. Vol. 6, no. August, p. 482–497. DOI 10.4236/jmmce.2018.64034.
- [7] L. JACOBS, M. M. Hyland & M. De Bonte. Study of the influence of microstructural properties on the sliding-wear behavior of HVOF and HVAF sprayed WC-cermet coatings. Journal of Thermal Spray Technology volume. 1999. Vol. 8, p. 125–132.
- [8] AMIN, Sagar, PANCHAL, Hemant and PROFESSOR, Assistant. A Review on Thermal Spray Coating Processes. International Journal of Current Trends in Engineering &

Research Scientific Journal Impact Factor [online]. 2016. Vol. 2, no. 4, p. 556–563. Available from: http://www.ijcter.com

- [9] BALAN, K. N. and BAPU, B. R.Ramesh. Process parameter optimization of detonation gun coating for various coating materials. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 38, p. 632–639. DOI 10.1016/j.proeng.2012.06.078.
- [10] GOODARZI, Dara Moazami, PEKKARINEN, Joonas and SALMINEN, Antti. Effect of process parameters in laser cladding on substrate melted areas and the substrate melted shape. Journal of Laser Applications. 2015. Vol. 27, no. S2, p. S29201. DOI 10.2351/1.4906376.
- [11] ZHANG, Shi Hong, CHO, Tong Yul, YOON, Jae Hong, FANG, Wei, SONG, Ki O., Ll, Ming Xi, JOO, Yun Kon and LEE, Chan Gyu. Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC-CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying. *Materials Characterization*. 2008. Vol. 59, no. 10, p. 1412–1418. DOI 10.1016/j.matchar.2008.01.003.
- WOOD, Robert J.K., HERD, Stephen and THAKARE, Mandar R. A critical review of the tribocorrosion of cemented and thermal sprayed tungsten carbide. *Tribology International* [online]. 2018. Vol. 119, no. September 2017, p. 491–509. DOI 10.1016/j.triboint.2017.10.006. Available from: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.006
- [13] YANG, Yongqiang and MAN, H. C. Microstructure evolution of laser clad layers of W-C-Co alloy powders. Surface and Coatings Technology. 2000. Vol. 132, no. 2–3, p. 130–136. DOI 10.1016/S0257-8972(00)00909-9.
- KUMARI, Kanchan, ANAND, K, BELLACCI, Michelangelo and GIANNOZZI, Massimo.
  Effect of microstructure on abrasive wear behavior of thermally sprayed WC 10Co
  4Cr coatings. Wear [online]. 2010. Vol. 268, no. 11–12, p. 1309–1319.
  DOI 10.1016/j.wear.2010.02.001.
  Available
  from: http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.001
- [15] DAVIS, J.R. Handbook of thermal spray technology. A. . 2004.

- [16] VERWIMP, Jo, ROMBOUTS, Marleen, GEERINCKX, Eric and MOTMANS, Filip. Applications of laser cladded WC-based wear resistant coatings. *Physics Procedia* [online]. 2011. Vol. 12, no. PART 1, p. 330–337. DOI 10.1016/j.phpro.2011.03.042. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.042
- [17] ERFANMANESH, Mohammad, ABDOLLAH-POUR, Hassan and MOHAMMADIAN-SEMNANI, Hamidreza. An empirical-statistical model for laser cladding of WC-12Co powder on AISI 321 stainless steel. Optics and Laser Technology [online]. 2017.
   Vol. 97, p. 180–186. DOI 10.1016/j.optlastec.2017.06.026. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.026
- [18] VALSECCHI, B., PREVITALI, B., VEDANI, M. and VIMERCATI, G. Fiber laser cladding with high content of WC-Co based powder. International Journal of Material Forming. 2010. Vol. 3, no. SUPPL. 1, p. 1127–1130. DOI 10.1007/s12289-010-0970-2.
- [19] PAUL, C. P., ALEMOHAMMAD, H., TOYSERKANI, E., KHAJEPOUR, A. and CORBIN, S. Cladding of WC-12 Co on low carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser. *Materials Science and Engineering A.* 2007. Vol. 464, no. 1–2, p. 170–176. DOI 10.1016/j.msea.2007.01.132.
- [20] BRANT, M., SCOTT, D.A., EMMS, S.B and YELLUP, J.M. Laser cladding with a pulsed Nd: YAG laser and optical fibers. *Journal of Laser Applications*. 1996. Vol. 9, no. 2, p. 67–75. DOI 10.2351/1.4745446.
- [21] JIANHUA YAO, JIE ZHANG, GUOLONG WU, LIANG WANG, QUNLI ZHANG, Rong Liu. Microstructure and wear resistance of laser cladded composite coatings prepared from pre-alloyed WC-NiCrMo powder with different laser spots. Optics and Laser Technology. 2018. Vol. 101, p. 520–30.
- FU, Fuxing, ZHANG, Yanli, CHANG, Gengrong and DAI, Jun. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors. Optik [online]. 2016.
   Vol. 127, no. 1, p. 200–202. DOI 10.1016/j.ijleo.2015.10.043. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.10.043
- [23] ERFANMANESH, Mohammad, SHOJA-RAZAVI, Reza and ABDOLLAH-POUR, Hassan. Influence of using electroless Ni-P coated WC-Co powder on laser cladding of

stainless steel. Surface & Coatings Technology [online]. 2018. Vol. 348, no. April, p. 41–54. DOI 10.1016/j.surfcoat.2018.05.016. Available from: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.016

- [24] TOYSERKANI, Ehsan, KHAJEPOUR, Amir and CORBIN, Steve. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: Effects of laser pulse shaping on the process. Optics and Lasers in Engineering. 2004. Vol. 41, no. 6, p. 849–867. DOI 10.1016/S0143-8166(03)00063-0.
- [25] INC, Avco Everett Research Laboratory. US Patent n. 3 952 180. 1976.
- [26] HALDAR, Barun and SAHA, P. Identifying defects and problems in laser cladding and suggestions of some remedies for the same. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2018. Vol. 5, no. 5, p. 13090–13101. DOI 10.1016/j.matpr.2018.02.297. Available from: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.297
- [27] KHAJEPOUR, Amir, TOYSERKANI, Ehsan and CORBIN, Stephen. Laser Cladding
  [online]. 2004. ISBN 978-0-8493-2172-6. Available from: https://www.taylorfrancis.com/books/9781420039177
- [28] ALVARADO HERNÁNDEZ FRANCISCO, LÓPEZ IBARRA ALEJANDRO, MARTÍNEZ GONZÁLEZ CECILO, BALTAZAR HERNÁNDEZ VÍCTOR HUGO, López Baltazar E. A. Evaluación y análisis del proceso de recuperación de martillos de trituradora de minerales. Memorias del XXI Congreso Internacional Anuial de la SOMIM. 2015.
- [29] ALVARADO HERNÁNDEZ FRANCISCO, MALDONADO RUIZ SIMITRIO I., LÓPEZ IBARRA ALEJANDRO, BALTAZAR HERNÁNDEZ VÍCTOR HUGO, López Baltazar Enrique Alejandro. Recubrimiento de cono quebrador de mineral mediante el proceso de soldadura SMAW. Memorias del XXIII Congreso Internacional Anuial de la SOMIM. 2017. P. 21–27.
- [30] GUTIÉRREZ, Cesar Alejandro Hernández and DE LA ROSA, Christian. Blindaje por Proceso de soldadura de cono quebrador de roca. Universidad Autónoma de Zacatecas, 2015.
- [31] LARA, José Cuitlahuac García. Análisis de la resistencia al desgaste por fricción de

los depósitos de soldadura obtenidos mediante el electrodo ER 70S-6 sobre hierro gris. Universidad Autónoma de Zacatecas, 2015.

- [32] RAMÓN LLAMAS MARTÍNEZ. Diseño y construcción de la máquina de desgaste por abrasión en base a la norma ASTM G-65. Universidad Autónoma de Zacatecas, 2015.
- [33] SALINAS, José Israel Nuñez. Blindaje resistente al desgaste de un martillo de molino de trituración. Universidad Autónoma de Zacatecas, 2015.
- [34] ENRIQUE ALEJANDRO LÓPEZ BALTAZAR, HAIDEÉ RUIZ LUNA, ALEJANDRO LÓPEZ IBARRA, FRANCISCO ALVARADO HERNÁNDEZ, Víctor Hugo Baltazar Hernández. Estudio de la resistencia al desgaste por deslizamiento de recubrimientos de carburo de tungsteno. Revista Bistua Facultad de Ciencias Basicas. 2019. Vol. 3, p. 90–97. DOI https://doi.org/10.24054/01204211.v3.n3.2019.3569.
- [35] KUMARI, Kanchan, ANAND, K., BELLACCI, Michelangelo and GIANNOZZI, Massimo.
  Effect of microstructure on abrasive wear behavior of thermally sprayed WC-10Co-4Cr coatings. Wear [online]. 2010. Vol. 268, no. 11–12, p. 1309–1319.
   DOI 10.1016/j.wear.2010.02.001. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.001
- [36] T. CHANDRA, K. TSUZAKI, M. MILITZER, C. Ravindran. Improvement in Wear Resistance of Nano WC-Co Coatings Fabricated by Detonation Gun Spraying. Material Science Forum. 2007. Vol. 539–543, p. 1264–1269. DOI https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.1264.
- [37] ZHAN, Qing, YU, Ligen, YE, Fuxing, XUE, Qunji and LI, Hua. Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC-Co during plasma spraying. Surface and Coatings Technology [online]. 2012. Vol. 206, no. 19–20, p. 4068–4074. DOI 10.1016/j.surfcoat.2012.03.091. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.091
- [38] ANGELASTRO, Andrea, CAMPANELLI, Sabina L, CASALINO, Giuseppe and LUDOVICO, Antonio D. Optimization of Ni-Based WC / Co / Cr Composite Coatings Produced by Multilayer Laser Cladding. Advances in Materials Science and

Engineering. 2013. Vol. 2013, p. 1–7. DOI http://dx.doi.org/10.1155/2013/615464.

- [39] R. PORAT, S. Berger and A. Rosen. Dilatometric study of the sintering mechanism of nanocrystalline cemented carbides. NanoShucturcd Makaials. 1996. Vol. 7, no. 4, p. 429–436.
- [40] GURLAND, R. K. ViswanadhamD. J. RowcliffeJ. Science of Hard Materials. Springer, Boston, MA, 1983. ISBN 978-1-4684-4321-9.
- [41] ISAKOV EDMUND. Cutting data for turning of steel. New York: Industrial Press,
  ©2009., 2009. ISBN 9781613448496 161344849X 9780831191740 0831191740.
- YUAN, Youlu and LI, Zhuguo. Growth mechanism of in-situ WC grain in Fe-Ni-W-C alloys system. Journal of Alloys and Compounds [online]. 2018. Vol. 738, p. 379–393.
  DOI 10.1016/j.jallcom.2017.11.382.
  Available
  from: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.382
- [43] YANG, Qiumin, YANG, Jiangao, WEN, Yan, ZHANG, Qinying, CHEN, Liyong and CHEN, Hao. A novel route for the synthesis of ultrafine WC-15 wt %Co cemented carbides. Journal of Alloys and Compounds [online]. 2018. Vol. 748, p. 577–582.
   DOI 10.1016/j.jallcom.2018.03.197.
   Available
   from: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.197
- [44] G.R. GOREN-MUGINSTEIN, S. Berger and A. Rosen. Sintering study of nanocrystalline tungsten carbide powders. Annual meeting of the Society for Economic and Social Cybernetics. 1998. Vol. 10, no. 5, p. 795–804.
- [45] OKADA, K. and OSADA, A. Microstructural study on the grain growth inhibition of VC-doped WC-Co cemented carbides. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials [online]. 2017. Vol. 62, p. 149–154. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2016.06.009. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.06.009
- [46] MANNESSON, Karin, JEPPSSON, Johan, BORGENSTAM, Annika and GREN, John. Carbide grain growth in cemented carbides. Acta Materialia. 2011. Vol. 59, no. 5, p. 1912–1923. DOI 10.1016/j.actamat.2010.11.056.

- [47] KUMAR, Vineet, FANG, Zhigang Zak, WRIGHT, S. I. and NOWELL, M. M. An analysis of grain boundaries and grain growth in cemented tungsten carbide using orientation imaging microscopy. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2006. Vol. 37, no. 3, p. 599–607. DOI 10.1007/s11661-006-0032-z.
- [48] DE VILLIERS LOVELOCK, H.L. Powder/Processing/Structure Relationships in WC-Co Thermal Spray Coatings: A Review of the Published Literature. Journal of Thermal Spray Technology. 1998. Vol. 7, no. 3, p. 357–373. DOI 10.1361/105996398770350846.
- [49] VERDON, C, KARIMI, A and MARTIN, J.-L. A study of high velocity oxy-fuel thermally sprayed tungsten carbide based coatings. Part 1: Microstructures. Materials Science and Engineering. 1998. Vol. 246, p. 11–24. DOI 10.1016/S0921-5093(97)00759-4.
- [50] WALSH, C.A. Laser Welding. England, 2002.
- [51] AMADA MIYACHI AMERICAN, INC. Laser Welding Fundamentals. Amada Miya. Monrovia, CA 91016 US, 2016.
- [52] HALEY, Daniel. Oliver Pratt. Basic principles of lasers. Anaesthesia and Intensive Care Medicine. 2017. Vol. 18, no. 12, p. 648–650.
- [53] LU, JZ, CAO, J, LU, HF, ZHANG, LY and LUO, KY. Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding. Surface & Coatings Technology. 2019. Vol. 369, no. April, p. 228–237. DOI 10.1016/j.surfcoat.2019.04.063.
- [54] SUN, S., BRANDT, M., HARRIS, J. and DURANDET, Y. Effect of increment and singletrack geometry on the formation of multitrack laser cladding. PICALO 2006 - 2nd Pacific International Conference on Applications of Laser and Optics - Conference Proceedings. 2006.
- [55] CORBIN, S. F., TOYSERKANI, E. and KHAJEPOUR, A. Cladding of an Fe-aluminide coating on mild steel using pulsed laser assisted powder deposition. *Materials Science and Engineering A.* 2003. Vol. 354, no. 1–2, p. 48–57. DOI 10.1016/S0921-

5093(02)00863-8.

- [56] COSTA, Lino, FELDE, Imre, RÉTI, Tamás, KÁLAZI, Zoltán, COLAÇO, Rogerio, VILAR, Rui and VERŐ, Balázs. A Simplified Semi-Empirical Method to Select the Processing Parameters for Laser Clad Coatings. *Materials Science Forum* [online]. 2003. Vol. 414–415, no. January, p. 385–394. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.414-415.385. Available from: https://www.scientific.net/MSF.414-415.385
- [57] LIU, Huaming, QIN, Xunpeng, HUANG, Song, HU, Zeqi and NI, Mao. Geometry modeling of single track cladding deposited by high power diode laser with rectangular beam spot. Optics and Lasers in Engineering. 2018. Vol. 100, no. November 2016, p. 38–46. DOI 10.1016/j.optlaseng.2017.07.008.
- [58] PAREKH, Ravi, KUMAR, Ramesh and PATEL, R I. Multiphysics simulation of laser cladding process to study the effect of process parameters on clad geometry. *Procedia Technology* [online]. 2016. Vol. 23, p. 529–536. DOI 10.1016/j.protcy.2016.03.059. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.059
- [59] PEKKARINEN, Joonas, KUJANP, Veli and SALMINEN, Antti. Laser cladding with scanning optics: Effect of power adjustment. *Journal of Laser Applications*. 2012. Vol. 24. DOI 10.2351/1.4706582.
- [60] AMINE, Tarak, NEWKIRK, Joseph W. and LIOU, Frank. An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers. Case Studies in Thermal Engineering [online]. 2014. Vol. 3, p. 21–34. DOI 10.1016/j.csite.2014.02.002. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2014.02.002
- [61] PENG, Li, TAIPING, Yang, SHENG, Li, DONGSHENG, Liu and QIANWU, Hu. Direct laser fabrication of nickel alloy samples. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2005. Vol. 45, p. 1288–1294. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.014.
- [62] T, Htli O L O, WU, Xinwei, ZHU, Beidi, ZENG, Xiaoyan, HU, Xiang and CUI, Kun. Critical state of laser cladding with powder auto-feeding. Surface & Coatings Technology. 1996. Vol. 79, p. 200–204.

- [63] EMAMIAN, Ali, CORBIN, Stephen F and KHAJEPOUR, Amir. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe – TiC composite coatings. Surface & Coatings Technology [online]. 2010. Vol. 205, no. 7, p. 2007–2015. DOI 10.1016/j.surfcoat.2010.08.087. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.087
- [64] YA, Wei, PATHIRAJ, B and LIU, Shaojie. 2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 230, p. 217–232.
- [65] ANTONY, K and ARIVAZHAGAN, N. Studies on Energy Penetration and Marangoni Effect During Laser Melting Process. Journal of Engineering Science and Technology. 2015. Vol. 10, no. 4, p. 509–525.
- [66] KUMAR, L Jyothish and KRISHNADAS, Prof C G. Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, p. 11068–11077. DOI 10.1016/j.matpr.2017.08.068.
- [67] GOODARZI, Dara Moazami, PEKKARINEN, Joonas and SALMINEN, Antti. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. Welding in the World. 2017. Vol. 61, p. 883–891. DOI 10.1007/s40194-017-0495-0.
- [68] JANG, Jeong-hwan, JOO, Byeong-don, TYNE, Chester J Van and MOON, Younghoon. Characterization of Deposited Layer Fabricated by Direct Laser Melting Process. Metals and Materials International. 2013. Vol. 19, no. 3, p. 497–506. DOI 10.1007/s12540-013-3018-6.
- [69] OLIVEIRA, U De, OCELI, V and HOSSON, J Th M De. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. Additive Manufacturing. 2005. Vol. 197, p. 127–136. DOI 10.1016/j.surfcoat.2004.06.029.
- [70] BALLA, Vamsi Krishna, BOSE, Susmita and BANDYOPADHYAY, Amit. Microstructure and wear properties of laser deposited WC-12%Co composites. Materials Science and Engineering A [online]. 2010. Vol. 527, no. 24–25, p. 6677–6682. DOI 10.1016/j.msea.2010.07.006. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.006

- [71] FANG, Z. Zak, WANG, Xu, RYU, Taegong, HWANG, Kyu Sup and SOHN, H. Y. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide - A review. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials [online]. 2009. Vol. 27, no. 2, p. 288–299. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.011. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.07.011
- [72] ORTIZ, A, GARCÍA, A, CADENAS, M, FERNÁNDEZ, M R and CUETOS, J M. WC particles distribution model in the cross-section of laser cladded NiCrBSi + WC coatings, for different wt % WC. Surface & Coatings Technology. 2017. Vol. 324, p. 298–306. DOI 10.1016/j.surfcoat.2017.05.086.
- [73] VAN ACKER, K., VANHOYWEGHEN, D., PERSOONS, R. and VANGRUNDERBEEK, J. Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings. Wear. 2005. Vol. 258, no. 1-4 SPEC. ISS., p. 194–202. DOI 10.1016/j.wear.2004.09.041.
- [74] WANG, L., PRATT, P., FELICELLI, S. D., EL KADIRI, H., BERRY, J. T., WANG, P. T. and HORSTEMEYER, M. F. Pore Formation in Laser-Assisted Powder Deposition Process. Journal of Manufacturing Science and Engineering [online]. 2009. Vol. 131, no. 5, p. 051008-1- 051008–9. DOI 10.1115/1.3184087. Available from: http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articlei d=1468997
- [75] C.W.LEE, J.H.HAN, J. YOON, M.C.SHIN, S.I.Kwun. A study on powder mixing for high fracture toughness and wear resistance of WC–Co–Cr coatings sprayed by HVOF. Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 204, no. 14, p. 2223–2229.
- [76] GARY K LEWIS, Eric Schlienger. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials and Design*. 2000. Vol. 21, no. 4, p. 417– 423.
- [77] BORGH, Ida, HEDSTRÖM, Peter, PERSSON, Tomas, NORGREN, Susanne, BORGENSTAM, Annika, ÅGREN, John and ODQVIST, Joakim. Microstructure, grain size distribution and grain shape in WC – Co alloys sintered at different carbon activities. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2014. Vol. 43, p. 205–

211.

- [78] WANG, Xu, FANG, Zhigang Zak and SOHN, Hong Yong. Grain growth during the early stage of sintering of nanosized WC-Co powder. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2008. Vol. 26, no. 3, p. 232–241. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2007.04.006.
- [79] FANG, Z., MAHESHWARI, P., WANG, X., SOHN, H. Y., GRIFFO, A. and RILEY, R. An experimental study of the sintering of nanocrystalline WC-Co powders. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2005. Vol. 23, no. 4-6 SPEC. ISS., p. 249–257. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2005.04.014.
- [80] YAKOVLEV, A., BERTRAND, Ph and SMUROV, I. Laser cladding of wear resistant metal matrix composite coatings. Thin Solid Films. 2004. Vol. 453–454, p. 133–138. DOI 10.1016/j.tsf.2003.11.085.
- [81] JIMMYW.EASON, ZhigangFang and. Study of Nanostructured WC-Co Composites. Int. J. of Refractory Metals & Itard Materials. 1995. Vol. 13, p. 297–303.
- [82] XIONG, Yuhong, SMUGERESKY, John E, AJDELSZTAJN, Leonardo and SCHOENUNG, Julie M. Fabrication of WC – Co cermets by laser engineered net shaping. Materials Science and Engineering A. 2008. Vol. 493, p. 261–266. DOI 10.1016/j.msea.2007.05.125.
- [83] ZHONG, Yang and SHAW, Leon L. Growth mechanisms of WC in WC 5.75 wt %
  Co. Ceramic International. 2011. Vol. 37, p. 3591–3597.
  DOI 10.1016/j.ceramint.2011.06.016.
- [84] ERFANMANESH, Mohammad, ABDOLLAH-POUR, Hassan and MOHAMMADIAN-SEMNANI, Hamidreza. Kinetics and oxidation behavior of laser clad WC-Co and Ni / WC-Co coatings. Ceramics International [online]. 2018. Vol. 44, no. 11, p. 12805– 12814. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.04.087. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.087
- [85] DE MACEDO, H. R., DA SILVA, A. G P and DE MELO, D. M A. The spreading of cobalt, nickel and iron on tungsten carbide and the first stage of hard metal sintering.

Materials Letters. 2003. Vol. 57, no. 24–25, p. 3924–3932. DOI 10.1016/S0167-577X(03)00242-8.

- [86] ZHONG, Yang and SHAW, Leon L. Growth mechanisms of WC in WC-5.75 wt% Co.
  Ceramics International. 2011. Vol. 37, no. 8, p. 3591–3597.
  DOI 10.1016/j.ceramint.2011.06.016.
- [87] YUAN, Youlu and LI, Zhuguo. Microstructure and tribology behaviors of in-situ WC / Fe carbide coating fabricated by plasma transferred arc metallurgic reaction. Applied Surface Science. 2017. Vol. 423, p. 13–24. DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.080.
- [88] METCO, Oerlikon. Material Product Data Sheet Tungsten Carbide 10 % Cobalt 4
  % Chromium Sintered and Crushed Powders for Thermal Spray. 2017.
- [89] B09.06, Developed by Subcommittee: Standard Guide for Metallographic Sample Preparation of Cemented Tungsten Carbides. In : ASTM B665 - 08(2012). 2012.
- [90] SUBCOMMITTEE E04.01 ON SPECIMEN PREPARATION. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys ASTM E407 - 07. In: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 2015. p. 9.
- [91] LE, K. Q., TANG, C. and WONG, C. H. On the study of keyhole-mode melting in selective laser melting process. International Journal of Thermal Sciences. 2019. Vol. 145, no. April. DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2019.105992.
- [92] ZHOU, Shengfeng, ZENG, Xiaoyan, HU, Qianwu and HUANG, Yongjun. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crackfree realization. Applied Surface Science. 2008. Vol. 255, p. 1646–1653. DOI 10.1016/j.apsusc.2008.04.003.
- [93] COATINGS, W C Fe, DAI, Qiu-lian, LUO, Can-bin and YOU, Fang-yi. Crack Restraining Methods and their Effects on the Microstructures and Properties of Laser Cladded. . 2018. DOI 10.3390/ma11122541.
- [94] ZHOU, Chunyang, ZHAO, Shusen, WANG, Yibo, LIU, Falan, GAO, Wenyan and LIN, Xuechun. Mitigation of pores generation at overlapping zone during laser cladding.

Journal of Materials Processing Technology [online]. 2015. Vol. 216, no. 1, p. 369– 374. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.025. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.025

- [95] SCIENCE, Sindou Kou (Department of Materials and WISCONSIN), University of. Welding Metallurgy. Second Edi. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2003. ISBN 0-471-43491-4.
- [96] CHAU, T., PARADIS, A. and MASSON, J. A simple method for evaluating the 3D welding effects on thin stiffened panel assemblies in shipbuilding. *Transactions on the Build Environment*. 1999. Vol. 42.
- [97] GRAVILLE, B. A. Weld Cooling Rates and Heat-Affected Zone Hardness in a Carbon Steel. Welding Journal (Miami, Fla). 1973. Vol. 52, no. 9.
- [98] POORHAYDARI, K, PATCHETT, B M and IVEY, D G. Estimation of Cooling Rate in the Welding of. Welding journal. 2005. No. October, p. 149–155.
- [99] ZHOU, Shengfeng and ZENG, Xiaoyan. Growth characteristics and mechanism of carbides precipitated in WC-Fe composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2010. Vol. 505, no. 2, p. 685–691. DOI 10.1016/j.jallcom.2010.06.115. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.115
- [100] WEIDOW, Jonathan, ZACKRISSON, Jenni, JANSSON, Bo and ANDRÉN, Hans Olof. Characterisation of WC-Co with cubic carbide additions. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials [online]. 2009. Vol. 27, no. 2, p. 244–248. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2008.11.007. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.11.007
- [101] C.W. MORTON, D.J. WILLS, K. Stjernberg. The temperature ranges for maximum effectiveness of grain growth inhibitors in WC – Co alloys. *Refractory Metals & Hard Materials*. 2005. Vol. 23, p. 287–293. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2005.05.011.
- [102] NOMURA, H., KISHINO, J., MATSUBARA, H., TANASE, T. and SHIN, S.-G. Computational study on grain growth in cemented carbides. *International Journal of Refractory*

Metals and Hard Materials. 2003. Vol. 20, no. 1, p. 31-40. DOI 10.1016/s0263-4368(01)00068-3.

- [103] BORGH, Ida, HEDSTRO, Peter, ODQVIST, Joakim, BORGENSTAM, Annika, JOHN, A, GHOLINIA, Ali, WINIARSKI, Bartlomiej, WITHERS, Philip J, THOMPSON, George E, MINGARD, Ken and GEE, Mark G. On the three-dimensional structure of WC grains in cemented carbides. Acta Materialia. 2013. Vol. 61, p. 4726–4733. DOI 10.1016/j.actamat.2013.05.008.
- [104] WARREN, R and WALDRONT, M B. Microstructural development during the liquidphase sintering of cemented carbides. I. Wettability and grain contact. Symposium on "The Role of Surface Properties in Powder Metallurgy" (20 and 21 November 1972). 1972. Vol. I, no. 30, p. 166–201.
- [105] ZHONG, Yang, ZHU, Hong, SHAW, Leon L and RAMPRASAD, R. The equilibrium morphology of WC particles – A combined ab initio and experimental study. Acta Materialia. 2011. Vol. 59, p. 3748–3757. DOI 10.1016/j.actamat.2011.03.018.
- [106] LEE, Hyoung R and KIM, Deug J. Role of Vanadium Carbide Additive during Sintering of WC – Co: Mechanism of Grain Growth Inhibition. J. Am. Ceram. Soc., 2003. Vol. 86, p. 152–154.
- [107] GU, D D, MEINERS, W, WISSENBACH, K, POPRAWE, R, GU, D D, MEINERS, W, WISSENBACH, K and POPRAWE, R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2017. Vol. 6608, no. October. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000014.
- [108] ZHONG, M and LIU, W. Laser surface cladding: the state of the art and challenges.
  . 2009. Vol. 224, p. 1041–1060. DOI 10.1243/09544062JME\$1782.
- [109] HONGTAO WANG, TIM WEBB, Jonathan W. Bitler. Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC-Co composite. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. Vol. 49. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2014.06.009.
- [110] DE ASSIS LÉO MACHADO, Francisco, RODRIGUES, Márcio Ferreira, VARGAS, Helion,

FILGUEIRA, Marcello and DA TRINDADE FARIA JÚNIOR, Roberto. Thermal properties of WC-10 wt. (%) Co alloys. *Materials Research*. 2008. Vol. 11, no. 1, p. 37–41. DOI 10.1590/S1516-14392008000100007.

- [111] KAPLAN, Bartek, NORGREN, Susanne, SCHWIND, Martin and SELLEBY, Malin. Thermodynamic calculations and experimental verification in the WC-Co-Cr cemented carbide system. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. Vol. 48, p. 257–262. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.016.
- BAX, Benjamin, RAJPUT, Rohan, KELLET, Richard and REISACHER, Martin. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition. Additive Manufacturing [online]. 2018. Vol. 21, no. April, p. 487–494. DOI 10.1016/j.addma.2018.04.002. Available from: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.002

## ANEXOS.

#### ANEXO I.

Tabla 0-1 Diseño de experimentos de parametrización, diámetro del láser del 0.4 mm y una frecuencia de 50Hz.

Recubrimiento	Energía por pulso del láser (J)	Potencia (kW)	Velocidad de avance (mm/s)	Flujo de alimentación (g/s)	Pulso Activo láser (ms)	Pulso Desactivo láser (ms)	E <sub>a</sub> (J/mm²)	% Dilución	Altura (µm)
1	10	0.5	1	0.066	2	18	1250	6.54	10
2	10	0.5	3	0.1	6	14	416.66	4.76	10
3	10	0.5	5	0.133	14	6	250	81.36	135.8
4	10	0.5	8	0.1666	18	2	156.25	86.49	112.3
5	10	0.5	10	0.2	20	0	125	62.58	550
6	16	0.8	1	0.066	14	6	2000	95.03	139
7	16	0.8	3	0.1	18	2	666.66	77.43	421.1
8	16	0.8	5	0.133	20	0	400	76.94	480.9
9	16	0.8	8	0.1666	2	18	250	5.66	10
10	16	0.8	10	0.2	6	14	200	95.62	24.24
11	20	1	1	0.066	20	0	2500	65.47	1540
12	20	1	3	0.1	2	18	833.33	9.09	10
13	20	1	5	0.133	6	14	500	85.85	170.8
14	20	1	8	0.1666	14	6	312.5	69.90	599.9
15	20	1	10	0.2	18	2	250	67.63	734.2
16	24	1.2	1	0.066	6	14	3000	63.86	811.4
17	24	1.2	3	0.1	14	6	1000	66.66	1130
18	24	1.2	5	0.133	18	2	600	70.23	1030
19	24	1.2	8	0.1666	20	0	375	66.62	475.5

Recubrimiento	Energía por pulso del láser (J)	Potencia (kW)	Velocidad de avance (mm/s)	Flujo de alimentación (g/s)	Pulso Activo láser (ms)	Pulso Desactivo láser (ms)	Ea (J/mm <sup>2</sup> )	% Dilución	Altura (µm)
20	24	1.2	10	0.2	2	18	300	89.73	43.93
21	30	1.5	1	0.066	18	2	3750	59.31	2380
22	30	1.5	3	0.1	20	0	1250	65.41	1930
23	30	1.5	5	0.133	2	18	750	92.20	58.87
24	30	1.5	8	0.1666	6	14	468.75	79.12	393.7
25	30	1.5	10	0.2	14	6	375	74.53	1090
26	10	0.5	10	0	20	0	125	-	-
27	16	0.8	5	0	20	0	400	-	-
28	20	1	1	0	20	0	2500	-	-
29	24	1.2	8	0	20	0	375	-	-
30	30	1.5	3	0	20	0	1250	-	-

#### ANEXO II.

#### Determinación de velocidad de enfriamiento y tiempo de solidificación.

Como resultado del modelo analítico obtenido de las ecuaciones de *Rosenthal* para predecir el comportamiento de transferencia del calor en soldadura, se obtuvieron las ecuaciones de velocidad de enfriamiento para placas delgadas donde el flujo se considera en dos dimensiones y para placa gruesa en tres dimensiones [95–98].

Para determinar cuál de las dos ecuaciones se debe utilizar para placa delgada 2D y placa gruesa 3D, es necesario calcular el espesor relativo de la placa el cual está definido por la ecuación 0-1.

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{net}}}$$
ecuación 0-1

Dónde:  $\tau$  es el espesor de la placa relativo,  $\rho$  es la densidad del material base g/cm<sup>3</sup>, C es calor especifico del material base cal/g °C, *h* el espesor del material base, dado en cm,  $T_0$  es la temperatura inicial °C,  $T_c$  y temperatura a la cual la velocidad de enfriamiento es calculada °C y  $H_{net}$  el calor de entrada neto por unidad de longitud, cal/cm.

Nota: Si los valores de T>0.9 utilizar placa gruesa, 0.6<T<0.9 placa media y T<0.6 para placa delgada.

La ecuación para predecir la velocidad de enfriamiento para placa delgada se muestra en la ecuación 0-2.

$$R = -\frac{2\pi k\rho C (T_c - T_0)^2}{H_{net}}$$
ecuación 0-2

Y la velocidad de enfriamiento para placa gruesa está dada por la ecuación 0-3:
$$R = -2\pi k\rho C \left(\frac{h}{H_{net}}\right)^2 (T_c - T_0)^3$$

ecuación 0-3

Dónde: *R* es velocidad de enfriamiento en °C/s, *k* es conductividad térmica del material cal/(cm s °C),  $\rho$  es la densidad del material base g/cm3, *C* el calor especifico del material base (cal/g °C), *T*<sub>max</sub> la temperatura de fusión °C, *T*<sub>0</sub> = temperatura inicial °C, *h* el espesor del material base y *H*<sub>net</sub> = calor de entrada neto por unidad de longitud, cal/cm.

Por otra parte, para predecir el tiempo de solidificación (St) está dada por la ecuación 0-4:

$$S_t = \frac{L H_{net}}{2\pi\rho C (T_{max} - T_o)^2}$$
ecuación 0-4

Dónde:  $S_t$  es el tiempo de solidificación, L el calor de fusión (en los aceros aproximadamente 2 J/mm<sup>3</sup>), k es conductividad térmica del material cal/(cm s °C),  $\rho$  es la densidad del material base g/cm<sup>3</sup>, C el calor especifico del material base (cal/g °C),  $T_{max}$  la temperatura de fusión °C,  $T_0$  = temperatura inicial °C y  $H_{net}$  = calor de entrada neto por unidad de longitud, cal/cm.

## Procedimiento de cálculo para la velocidad de enfriamiento y tiempo de solidificación en los recubrimientos.

Para el cálculo de los recubrimientos se asumió lo siguiente:

- Se aplica este cálculo solamente a los recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.
- La energía de la fuente de calor en láser es aplicada uniformemente.
- La fuente de calor se mueve a una velocidad constante y línea recta.
- La sección transversal de la pieza es constante, en este caso se considera el espesor del recubrimiento (1 mm), con base a mediciones.
- Se desprecia el efecto de enfriamiento que tenga el flujo de gas protector y de arrastre del polvo WC-10Co-4Cr.
- No se toma en cuenta el diámetro del spot del láser.
- El material para cálculo es WC-Co, debido a que en Laser Cladding se pretende que el material depositado tenga mínima mezcla con el sustrato.

Con base a lo anterior se obtuvieron las propiedades físicas del material WC-Co y características del recubrimiento, el cual se exhibe en la Tabla 0-2. Con respecto a la conductividad térmica de WC-Co se ve afectada por tamaño de grano y cantidades de cobalto, donde menos cobalto conduce a una mayor conductividad térmica [109].

Propiedades y condiciones del material		
Conductividad térmica del material (cal/cm s °C)	0.2629	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) (110)	14.7	
Calor especifico del material (cal/g °C)	0.0835	
Calor de fusión del material (cal/mm³)	573	
Temperatura inicial (°C)	25	
Temperatura máxima o calculada de la velocidad de enfriamiento (°C) [111]	1600 °C	
Temperatura de fusión (Tm)	1600 °C	
Espesor del recubrimiento (cm)	0.1	

## Tabla 0-2 Propiedades del WC-Co y condiciones del material.

Debido a que fuente de calor es lineal, es necesario obtener la ecuación de energía lineal para el proceso de Laser Cladding, y realizar el cálculo para cada potencia (W) utilizada en los recubrimientos; donde la velocidad de avance se mantuvo constante con un valor de 10 mm/s (600 mm/min). La ecuación 0-5, está basada en la energía de entrada lineal [10, 67–69, 112], es decir se desprecia el diámetro del spot del láser.

Energía lineal 
$$\left(\frac{J}{mm}\right) = \frac{Potencia (W)}{Velocidad de avance \left(\frac{mm}{min}\right)}$$
 ecuación 0-5

Para la selección de la ecuación para le predicción de la velocidad de enfriamiento R, que de acuerdo con el cálculo del espesor relativo de la placa  $\tau$ , resultó en **\tau>0.9**, por lo que se empleará la ecuación 0-3 correspondiente a placa gruesa.

En la Tabla 0-3 y Figura 0-1, se observa que conforme va aumentando el calor de entrada neto  $H_{net}$  (cal/cm), las velocidades de enfriamiento disminuyen, esto puede generar en un cambio microestructural en la sección transversal del recubrimiento y por ende modificar las propiedades mecánicas.

Potencia	Energía lineal	H <sub>net</sub>	R (°C/s)
(W)	(J/mm)	(cal/ cm)	
600	1	2.39	-13 883 448
700	1.166	2.78	-10 200 084
800	1.333	3.18	-7 809 439
900	1.5	3.58	-6 170 421
1000	1.666	3.98	-4 998 041
1100	1.833	4.38	-4 130 612
1200	2	4.78	-3 470 862
1500	2.5	5.97	-2 221 351

Tabla 0-3 Cálculo de la velocidad de enfriamiento para las condiciones de recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

Factor de conversión 1J= 0.0239 cal



Figura 0-1 Energía lineal entrada con respecto a la velocidad de enfriamiento *R* en recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.

El tiempo de solidificación (St), se puede observar en la Tabla 0-4 y Figura 0-2, que es evidente que el mayor tiempo de solidificación se da cuando la energía aumenta, por lo tanto, una cantidad de gas atrapado dentro del metal fundido tiene oportunidad de salir debido al tiempo de solidificación, generando menos porosidad en los recubrimientos [13, 94].

Potencia	Energía lineal	Hnet	St	
(W)	(J/mm)	(cal/ cm)	(ms)	
600	1	2.39	0.27	
700	1.166	2.78	0.31	
800	1.333	3.18	0.36	
900	1.5	3.58	0.40	
1000	1.666	3.98	0.45	
1100	1.833	4.38	0.49	
1200	2	4.78	0.54	
1500	2.5	5.97	0.68	

Tabla 0-4 Predicción del tiempo de solidificación para las condiciones de recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.



Figura 0-2 Energía lineal entrada con respecto al tiempo de solidificación  $S_t$ , en recubrimientos por láser con onda discontinua con 14 ms y una frecuencia de 50 Hz.