



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS SUPERFICIALES DE ACEROS
DULCES CON APLICACIÓN DE TRATAMIENTO
SUPERFICIAL LÁSER.

AMBROSIO CARLOS OLIVOS PÉREZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

JORGE RAMOS GREZ

Santiago de Chile, (Noviembre, 2010)

© 2010, Ambrosio Carlos Olivos Pérez



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS SUPERFICIALES DE ACEROS
DULCES CON APLICACIÓN DE TRATAMIENTO
SUPERFICIAL LÁSER**

AMBROSIO CARLOS OLIVOS PÉREZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JORGE RAMOS

MAGDALENA WALCZAK

ULRICH VOLKMANN

BONIFACIO FERNANDEZ

Para completar las exigencias del grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Noviembre, 2010)

A todos aquellos que nunca
pusieron en duda mis capacidades.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación no hubiese sido posible sin el apoyo de mis Padres Juan Guillermo y María del Carmen, que me dieron la oportunidad de venir al mundo, de estudiar y finalmente llegar a la universidad y el apoyo de mi familia Yoko , Juan, Alonso, Tota y Belén con quienes crecí y me ayudaron hacer más agradable la vida en Santiago.

Agradecimientos especiales para mi polola Macarena García por escucharme y acompañarme durante todo este tiempo en todas las actividades, y a mis Amigos Francisco Alister, José Tomas Arenas, Diego Bermúdez, Lizeth Brunel, Luis Cerna, Cristian Cortes, Rodrigo del Pozo, Pablo Gutiérrez, Begoña Ortega, Mauricio Palominos, Alan Pino, Francisco Sahli, Vicente Stevens, Luis Valenzuela e Ignacio Zubiaguirre que siempre supieron como buscarle el lado positivo a cada uno de los problemas que se presentaba dentro y fuera de la universidad, que ayudaron a que cada momento de esta etapa de la vida fuese mejor, logrando un ambiente grato, digno de ser recordado y que colaboraron en todos los proyectos realizados en mi paso por la universidad.

Quiero agradecer a aquellas personas que me enseñaron mucho en mi paso por la universidad, Luis Valdés, Luis Sepúlveda, Marcelo, Nacho, Roberto, Fabián, Parrita, Enrique, Manolo, Pepe, Alberto, Juan Pablo, Ángela, Gloria y Anita, y a mi antecesor con el láser Rodrigo Schmidt y mi sucesor Felipe Vásquez.

Finalmente, agradecer a mi profesor guía Jorge Ramos por darme la confianza para utilizar el laboratorio a mi disposición y guiarme durante el camino, a la profesora Magdalena Walczak por su apoyo y responder todas mis dudas, pero hubiese sido imposible llegar a buen término si no hubiese sido por la ayuda del Profesor Patricio Pérez, que siempre tuvo una respuesta a todos los problemas que se presentaban con el láser o en el laboratorio, que estuvo dispuesto a apoyar cualquier idea por más descabellada que pareciera y que siempre cuando algo andaba mal aparecía para dar una mano y para lograr finalmente ganarle la batalla al láser.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
Indice general	iv
Indice de tablas.....	vii
Indice de figuras	viii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	7
2.1. Descripción del fenómeno de funcionamiento del láser	7
2.2. Descripción del tratamiento térmico	11
2.2.1. Endurecimiento superficial con láser.....	16
2.2.2. Tratamiento superficial con adición de material.....	18
2.3. Descripción de Dispositivos de distribución de polvo.....	23
2.3.1. Mecanismos dispensadores de polvo.....	25
2.3.2. Toberas	26
2.4. Parámetros y características del proceso.....	29
2.4.1. Parámetros de operación.....	29
2.4.2. Propiedades de la pista fundida	30
2.4.3. Efecto de los parámetros en el proceso.....	34
2.5. Interacción entre los materiales.....	36
2.6. Descripción del modelo de Rosenthal y su aplicación en el tratamiento de superficie.	39

3.	Desarrollo Experimental	42
3.1.	Mantenimiento e implementación del laboratorio de láser de Potencia	42
3.1.1.	Equipo láser:	42
3.1.2.	Atril y toberas	44
3.1.3.	Modificación de posicionador cartesiano	44
3.1.4.	Diseño, fabricación y calibración de dispensador de polvos metálicos...45	
3.2.	Análisis metalográfico y perfiles de dureza	47
3.3.	Caracterización del polvo y material base.	48
3.4.	Diseño de las pruebas de calibración por serie.	48
3.4.1.	Probetas:	48
3.4.2.	Diseño de experimento	49
4.	Resultados y Análisis.....	54
4.1.	Resultados de calibración del dispensador de polvos.	54
4.2.	Caracterización del polvo y material base.	55
4.3.	Resultados de pruebas en placas.	59
4.3.1.	Serie J:	59
4.3.2.	Análisis cualitativo.	65
4.3.3.	Caso particular de análisis: Placa 24	67
4.4.	Barrido sobre una superficie:	72
5.	Conclusiones.....	77
6.	BIBLIOGRAFIA	79
	Anexo A: Planos tobera, atril, ejes y dispensador de polvo.....	82
	Anexo B: Plano Control eléctrico.	87
	Anexo C: Otras series de experimentos	87

Anexo D: Resultados de otras series de experimentos	90
Anexo E: Operación del láser.	98
Anexo F: Medidas de seguridad.....	100
Anexo G: Preparación de probetas para análisis metalográfico.	102
Anexo H: Parámetros y resultados de serie J según masa de polvo aplicado.	104

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1: Rango de temperaturas, nombre y tipo de estructura cristalina presente en el hierro.	12
Tabla 2.2: Propiedades generales de una pista fundida.....	31
Tabla 2.3: Efectos reportados entre parámetros operativos y propiedades de la pista. (Schneider, 1998)	36
Tabla 3.1: Composición de reactivo para acero inoxidable.	47
Tabla 3.2: Rangos de potencia y polvo para experimentos de serie J.....	49
Tabla 3.3: Valores geométricos del montaje experimental	50
Tabla 3.4: Detalles de mediciones en metalografías.....	52
Tabla 4.1: Características de polvo de cromo-325 mesh	55
Tabla 4.2: Resultado análisis del material base.	57
Tabla 4.3: Rúbrica de evaluación de propiedades cualitativas de las muestras	66
Tabla 4.4: Mediciones EDS en la superficie de la pista.....	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Densidad de potencia y tiempo de interacción para distintos procesos láser. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)	10
Figura 2.2: Gráfico Densidad de potencia y tiempo de interacción para los valores recopilados por Schneider y valores obtenidos en la investigación.	11
Figura 2.3: Mallas de Bravais a) BCC, b) FCC, c) Hexagonal.	12
Figura 2.4: Gráfico dureza máxima del acero en función del contenido de carbono. En cada curva se especifica el porcentaje de Martensita presente. (Migliore, 1996).....	14
Figura 2.5: Curva TTT acero 1021 (Meyrick & Wagoner, 2001).	16
Figura 2.6: Absorción de la luz láser en el hierro en función de la temperatura y longitud de onda. (Kobner, 1984).	18
Figura 2.7: Tipos de tratamientos láser distinguiendo respecto a la temperatura superficial (fase sólida o líquida) y la adición de material (Schneider, 1998).	19
Figura 2.8: a) Aleaciones láser, b) Solución sólida con láser, c) Plaqueado láser (mb=material base, am= material de aporte).	22
Figura 2.9: a) Tobera coaxial, b) Tobera lateral (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)	27
Figura 2.10: Distribución parabólica del flujo de polvo a la salida de la tobera.....	29
Figura 2.11: Esquema de pileta y pista fundida sobre el material base.	32
Figura 2.12: Diagrama de fases Cr-Fe.	33
Figura 2.13: Diagrama parámetros y variables del proceso (Schneider, 1998). *Resultados medibles.	35
Figura 2.14: Convección de Marangoni a) con componente negativo, b) con componente positivo (Dowden, 2009).	38
Figura 2.15: Isoterma de fusión, según modelo de Rosenthal (Ramos-Grez J. A., 2008) ...	40

Figura 2.16: Gráfico Z máximo según modelo Rosenthal en función de la potencia.	41
Figura 3.1: Vista del laboratorio, a la izquierda gases para el láser, al centro el posicionador cartesiano, extractor, atril, dispensador de polvos y cabezal láser, a la derecha el resonador láser.	43
Figura 3.2: a) Posicionador cartesiano Eje y. b) Posicionador cartesiano Eje y mejorado. .	45
Figura 3.3: Dispensador de polvo, a) tolva de carga de polvo, b) tornillo sin-fin, c) entrada de gas inerte y acople electro-válvula, d) salida hacia la tobera de mezcla gas-polvo, e) tapa de acrílico, f) motor eléctrico, g) bloque mecanizado vista en corte.	46
Figura 3.4: Metalografía con medición de dimensiones en la placa J23.	51
Figura 3.5: Esquema de medición de dureza.	53
Figura 4.1: Gráfico Cantidad de polvo en función de la Posición de la resistencia variable.	54
Figura 4.2: Imágenes polvo de cromo a) SEM 500x, b) SEM 2500x, c) óptico 200x d) óptico 500x.	56
Figura 4.3: a) material base 200x, b) material base 1000x.	58
Figura 4.4: Gráfico Profundidad zona fundida en función de potencia, según cantidad de polvo.	59
Figura 4.5: Gráfico área de fusión en función de potencia según cantidad de polvo.	60
Figura 4.6: Gráfico masa de polvo acoplado en función de la potencia, según cantidad de polvo.	61
Figura 4.7: Gráfico área total en función de potencia según polvo.	62
Figura 4.8: Gráfico Tamaño de grano en función de la potencia aplicada.	63
Figura 4.9: Gráfico Dureza Vickers en función de potencia según cantidad de polvo.	64
Figura 4.10: Gráfico de superficie con notas en función de polvo y potencia.	66
Figura 4.11: Perfil de concentración de Cr en función de la distancia desde la superficie. .	67

Figura 4.12: Fotografías placa J24 a) microscopio electrónico sección transversal 100x b) microscopio electrónico vista superior 100x c) microscopio óptico sección transversal 250x d) zona afectada térmicamente, descarburizada y material base 250x e) crecimiento de Martensita en los bordes de grano de la perlita en zona afectada térmicamente 500x f) carburos en granos del centro de la piletta fundida 1000x.	70
Figura 4.13: Perfil de micro dureza en la sección transversal de la placa J24.	71
Figura 4.14 Prueba de barrido con láser y polvo de cromo vista desde la superficie a) fotografía superficie recién procesada, b) Fotografía de la superficie rectificada, c) micrografía inicio de pista de fundida 100x, d) micrografía zona entre dos pistas 500x, e) micrografía medición de dureza 50x.	73
Figura 4.15 Perfil de microdureza en la superficie de la placa.	74
Figura 4.16: Micrografías de prueba de barrido a) 200x, b) 500x, c) 50x.	75
Figura 4.17 Sección transversal de la placa con ataque químico, marcas de indentaciones Vickers y gráficos de dureza a lo largo de la zona transversal según profundidad.	76

RESUMEN

En esta investigación se estudian los parámetros del proceso de aleaciones superficiales con láser en base a polvo de cromo sobre aceros de bajo carbono. Se depositó material sobre las superficies de aceros dulces mediante proyección de polvos metalúrgicos consolidados con haz láser con la finalidad de obtener una capa de aleación Cr-Fe en la superficie del material base, con el objetivo de estudiar el efecto de los parámetros asociados al proceso y esperando aumentar la dureza superficial del sustrato. El desarrollo de este trabajo se inició con la puesta a punto de un equipo láser industrial. Posteriormente, se realizó el tratamiento de las muestras variando los siguientes parámetros: potencia y cantidad de polvo para una posición focal fija del haz láser y a velocidad de avance constante. Finalmente, se llevó a cabo el análisis metalográfico de las muestras tratadas con el fin de obtener tanto la geometría de la pileta fundida y la microestructura de la aleación resolidificada, como también la medición del perfil de dureza a lo largo de la sección transversal. Como principal resultado se obtiene una aleación Cr-Fe creada en la superficie con aumentos en la dureza superficial de entre 1,4 a 2,6 veces, atribuidos al efecto térmico en la superficie cambiando su estructura cristalina, sin afectar el núcleo del material base y al efecto de la aleación creada en su superficie, lo cual es importante ya que éste tipo de aceros no es posible endurecer mediante métodos convencionales dado su bajo contenido de carbono.

Palabras Claves: Aleaciones Láser, Tratamiento térmico láser, Láser CO₂.

ABSTRACT

In this work, the parameters of laser surface alloying of low carbon steel (AISI1020) with chromium powder have been studied. With the aim of obtaining a thin layer of Cr-Fe alloy on the surface of the base material. A powder feeder and a lateral nozzle were projected over the base material and melted with the laser beam. The parameters of the process were studied in order to modify the surface hardness of the substrate. The scope of this work includes maintenance of an industrial CO₂ laser, design and construction of a powder feeder and treatment of steel samples varying the parameters: output power and amount of powder, the focal length and the travel speed was fixed for all experiments. Finally metallographic analysis was performed on the cross section of the samples to obtain the geometry of the melted pool and the microstructure of the resolidified alloy, as well the measurement of the hardness profile along the cross section. The main result was a Cr-Fe alloy in the surface of the substrate with hardness increased by about 1,4 to 2,6 times. This is attributed to thermal effect on the surface changing the structure, with no modification to the bulk material and creating an alloy layer over the surface. The result is relevant because this kind of steel cannot be hardened with conventional methods due to its low carbon content.

Keywords: Laser Surface Alloying, Laser Melting, Laser, LSA.

1. Introducción

La civilización humana junto con su desarrollo ha ido creando nuevos métodos y máquinas para poder facilitar sus tareas en la vida diaria. Durante su desarrollo fue pasando por diferentes etapas (era de piedra, de bronce y de hierro) en las cuales tuvo vital importancia la manufactura para poder procesar los diferentes materiales, la cual hasta el desarrollo del motor a vapor era completamente a mano. Luego los procesos de manufactura se fueron automatizando, se crearon máquinas propulsadas por diversas formas de energía, controladas manualmente o mecánicamente.

Hoy en día el láser reclama su espacio en nuestra cultura, desde elementos tan cotidianos como lectores de disco compacto, impresoras láser, pasando por avances en la medicina tales como cirugías con láser y llegando al área de procesamiento de materiales, en la cual, hoy es posible cortar, soldar y realizar tratamientos de superficie como templado, fusión, inclusión de partículas, creación de aleaciones, recubrimientos entre otros, en una gran gama de materiales.

En 1917 Albert Einstein predijo la existencia de la emisión estimulada de radiación y en 1960 Theodore Maiman realiza la primera emisión láser trabajando con un cristal de rubí dando origen a esta tecnología tan versátil. Con este invento, se pudo dar respuesta a muchos problemas científicos de aquella época. Un área beneficiada con este invento fue la del procesamiento de materiales, la cual se desarrolló rápidamente en los años setentas con la mejora en los equipos y el aumento de la potencia y eficiencia de éstos, particularmente con el desarrollo de láser de CO₂ de alta potencia por Patel (1964), con el cual a mediados de la década de los setentas, se comenzó a usar para cortar, soldar y endurecer metales. A finales de los setentas, Gnanamuthu de “*Rockwell international Corporation*” en California, comenzó a estudiar la factibilidad realizar tratamientos de endurecimiento superficial con láser, pero no fue hasta 1980 que esta tecnología comenzó a adoptarse en la industria, como mejora para la resistencia a la corrosión y al desgaste.

En palabras sencillas, los tratamientos superficiales con láser consisten en fundir mediante la energía aportada por el haz láser, el material de aporte (ya sea en polvo o alambre) y fundir parte del material base para lograr una buena unión metalúrgica con distintos grados de mezcla según se requiera, logrando una superficie con las características deseadas dependiendo de los parámetros del proceso y las propiedades del material de aporte.

Otras tecnologías comparables al tratamiento superficial con láser son el temple por inducción, temple por haz de electrones y plasma transferido. En el primero de estos se inducen corrientes eléctricas en la superficie del material, calentándolo por efecto Joule y obteniéndose un temple luego de enfriarlo con agua. El temple por haz de electrones, calienta la superficie por medio de un bombardeo electrónico en la superficie del material, y luego se enfría por conducción del calor al interior del material, similar al proceso láser. Finalmente el plasma transferido, consiste en un flujo de material de aporte fundido por el plasma, el cual se proyecta sobre el material base a gran velocidad logrando la unión. En resumen el láser presenta mayor flexibilidad en el proceso, no necesita de vacío para aplicarse como el temple por haz de electrones, tiene un costo mayor, pero no genera grandes distorsiones térmicas como el proceso por inducción o plasma y no depende de las propiedades magnéticas o eléctricas del material base.

Mediante los tratamientos de superficie con láser, junto con la utilización de sistemas de control numérico, se pueden realizar variadas aplicaciones, tales como recubrir grandes áreas sometidas a desgaste o corrosión, reparación de elementos dañados o con fallas de fábrica, prototipado rápido y fabricación de matrices.

Existen diferentes nombres y aplicaciones para algunos tratamientos superficiales con láser, tales como *“Laser Engineered Net Shaping”*, *“Direct Metal Deposition”*, *“Laser Direct Casting”*, *“Laser Consolidation”*, *“Laser Powder Fusion”*, *“Laser Metal Forming”*, *“Direct Light Fabrication”*, *“Laser Powder Deposition”*, *“Laser Rapid Forming”*, *“Laser Additive Manufacture”*, *“Laser Surface Alloying”*, *“Laser Surface*

Melting” conocidos en español como “Conformado Láser”, “Deposición directa de metales”, “Fundición directa con Láser”, “Consolidación con Láser”, “Fusión de polvo con Láser”, “Conformado metálico Láser”, “Fabricación directa con Luz”, “Deposición de polvo Láser”, “Conformado Rápido Láser”, ”Manufactura aditiva con Láser”, “Aleación superficial con Láser”, “Fusión superficial con Láser”.

En la actualidad existen diversos estudios sobre esta tecnología de procesamiento de materiales, podemos mencionar por ejemplo los estudios hechos por Navas et al. (2005), sobre recubrimientos para recuperar moldes de inyección de plástico que han sufrido desgaste durante su operación, a los cuales se les aplica acero con alto contenido de carbono y acero inoxidable martensítico para lograr resistencia a la corrosión y al desgaste.

Rombouts et al. (2009), describen los tratamientos superficiales como una tecnología proactiva por la posibilidad de fabricar piezas nuevas y como reactiva por la posibilidad de reparar piezas ya utilizadas. En su estudio presentan dos casos de reparación de un eje de compresor y aspas del compresor con acero inoxidable martensítico.

Wang & Duan (2003) estudiaron el comportamiento del compuesto intermetálico Cr_3Si solidificado rápidamente sobre acero inoxidable austenítico, observando su microestructura dendrítica y encontrando mejoras en la resistencia a la corrosión y al desgaste.

Yakovlev, Bertrand, & Smurov (2004) crearon recubrimientos en base a molibdeno y azufre para producir capas con bajo coeficiente de fricción y resistentes al desgaste, producto de los reservorios creados para almacenar MoS_2 el cual es un buen lubricante.

Ignat et al. (2003) trabajaron con un procedimiento experimental para obtener MoSi_2 en la superficie, el cual tiene buena resistencia a la oxidación a alta temperatura y tiene un punto de fusión elevado (2030°C), redujeron las grietas y mejoraron la

fragilidad de la capa aplicando zirconio inestable, obteniendo elevadas durezas (1200 a 1300 HV).

García, Cuetos, Fernández, & Higuera (2007) investigan recubrimientos basados en aleación Cr-Ni, en atmosferas de calderas de vapor a altas temperaturas (800°C) y sometidos a corrosión y erosión, encontrando un mejor comportamiento frente al mismo tratamiento realizado con plasma, debido a la disminución de las porosidades.

Ramos-Grez, Bourell, & Govindaraju (2009) depositaron una aleación Cr-Ni sobre acero inoxidable austenítico 347 midiendo su comportamiento frente a la corrosión a alta temperatura (750°C) obteniendo buenos resultados y su análisis microestructural encontrando difusión hacia el material base debido a la alta temperatura.

Yang et al (2003) lograron formar MoSi_2 y SiC, sobre aluminio puro a partir de la aplicación de polvo de molibdeno, silicio y grafito fundidos con láser, logrando una alta dureza en la superficie (1200 HV), obteniendo un cambio gradual sin interface aparente entre el recubrimiento y el material base blando (100 HV).

Lu & Wang (2005) mediante tratamientos láser, crearon los compuestos intermetálicos $\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}$ y NiSi a partir de níquel, cromo y molibdeno sobre acero inoxidable austenítico AISI321 encontrando una estructura fina de dendritas mucho más resistente al desgaste y a la corrosión, comparándola con el AISI321 sin tratar.

Costa & Vilar (2009) resumen el estado del arte sobre deposición de polvos con láser, demostrando la capacidad existente para realizar prototipos 3d directamente con láser en diversos materiales y aplicaciones, entre ellas componentes aeroespaciales de gran tamaño e implantes de caderas en aleaciones Ti-6Al-4V, fabricación de moldes de inyección en acero inoxidable AISI 316L, aleaciones en base a níquel en perfiles aerodinámicos de alabes y turbinas, herramientas para corte y moldes de inyección en acero AISI H13. La deposición de polvos es utilizada para modificar herramientas desgastadas o para someterse a nuevos requerimientos. Adicionalmente es un buen método para consolidar materiales difíciles de procesar, como lo son compuestos

intermetálicos o materiales refractarios, dando la posibilidad de crear elementos con variadas composiciones y materiales diferentes con distintas propiedades químicas y mecánicas, como podría ser una capa refractaria para resistir mejor la alta temperatura. Además es posible recuperar elementos desgastados durante su uso, reduciendo así el elevado costo de reposición de algunos elementos tales como alabes de turbinas los cuales son difíciles de reparar por métodos convencionales debido al aporte térmico. Otros ejemplos son la reparación de ejes, moldes de inyección y forja, cilindros de motores. Finalmente mediante la aplicación de recubrimientos es posible mejorar el desempeño de algunos elementos sometidos a condiciones críticas de operación, aumentando su vida útil, reduciendo la mantención, obteniendo capas completamente densas, con ausencia de grietas y bajo aporte térmico sobre el material base en comparación a los otros métodos utilizados.

En el desarrollo de esta tesis, se estudia la aplicación de un recubrimiento superficial en base a cromo en polvo depositado sobre placas de acero SAE1020 y fundido con un láser de CO₂ a potencias entre 300W y 500W. Luego se caracterizan las muestras mediante análisis metalográfico y perfiles de dureza, obteniendo una relación entre características geométricas, dureza, tamaño de grano y parámetros de operación.

Entre los objetivos generales podemos destacar: mejorar las propiedades mecánicas de la superficie de un acero dulce a través de la aplicación de un tratamiento de superficie con láser y polvo de cromo, aumentando la dureza de la superficie, obteniendo un núcleo con las propiedades deseables de un acero de bajo contenido de carbono y la propiedades en la superficie dadas por un acero con alto contenido de cromo. Finalmente estudiar la aleación creada intentando obtener fase σ .

Los objetivos específicos para poder realizar el experimento son:

- Mantención, manejo y calibración del equipo láser.
- Diseño y fabricación de dispositivos auxiliares para el proceso.
- Realización de pruebas con diferentes parámetros del proceso.

- Análisis de las pruebas.
- Determinación de los parámetros óptimos de funcionamiento.
- Realización de pruebas finales de barrido de un área basado en los parámetros óptimos previamente determinados.

2. Marco teórico

2.1. Descripción del fenómeno de funcionamiento del láser

El acrónimo LASER proviene del inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa esencialmente un haz de energía electromagnética coherente, convergente y monocromático, con longitudes de onda desde el ultravioleta al infrarrojo, el cual puede entregar potencias desde pocos W (punteros láser) hasta cercanas a 100 kW focalizado en una pequeña área, con un tiempo de interacción de entre 10^{-3} a 10^{-5} segundos en cualquier substrato a través de cualquier medio gaseoso. La diferencia del láser con respecto a las otras formas de radiaciones electromagnéticas es principalmente la coherencia temporal y espacial, que le otorga su capacidad para propagarse por una línea recta (Steen W. , 2003).

Básicamente, el fenómeno físico del láser se basa en la mecánica cuántica. En un átomo o molécula, los electrones al experimentar una transición energética entre dos estados permitidos, absorben o emiten un fotón de energía radiante proporcional a la diferencia de energías entre los dos estados.

En el modelo de láser se distinguen tres procesos elementales

- Absorción estimulada: Un átomo o molécula de baja energía, absorbe un fotón y se produce una transición electrónica, situándose en un estado de mayor energía (menos negativa).
- Emisión Espontánea: Un átomo o molécula excitada emite un fotón produciendo una transición electrónica reduciendo su energía (más negativa).
- Emisión Estimulada: Un átomo o molécula excitada realiza una transición electrónica forzada por un fotón incidente, la transición libera otro fotón idéntico en fase, dirección y estado de polarización, obteniendo dos fotones con igual energía, dirección y frecuencia.

Para poder lograr una emisión láser utilizable, son necesarios tres elementos fundamentales: un medio activo compuesto por átomos y/o moléculas, un sistema óptico amplificador llamado resonador óptico y un proceso de excitación para traspasar energía a las moléculas. La emisión del haz láser, se produce por un efecto en cadena, cuyo origen se remonta a la emisión espontánea de fotones en todas direcciones producto de un cambio del nivel energético de los electrones de las moléculas o átomos del medio activo, este salto es originado por la estimulación de dicho medio a través de una fuente externa de energía, los fotones así generados, viajan por el eje del sistema óptico, reaccionando con otras moléculas, generando un segundo fotón, generando la amplificación del frente de onda electromagnético, a medida que los fotones atraviesan el medio activo desplazándose dentro del resonador óptico.

El láser más utilizado en aplicaciones industriales es el de CO₂, su medio activo está formado por una mezcla de gases formada por CO₂, N₂ y He (aproximadamente 10%, 40% y 50% respectivamente), emite en el espectro infrarrojo con una longitud de onda de 10,6 μm (Dorronsoro, 1996), con eficiencia global entre 15% y 20% (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004), una eficiencia cuántica cercana al 45% y potencias desde pocos mW hasta 100kW (Dutta & Manna, 2003).

Básicamente el láser de CO₂ funciona con la mezcla de gases a baja presión (30 a 35 torr) la cual se somete a una descarga eléctrica para formar un plasma, se excita la molécula de N₂ a través de una descarga eléctrica, su energía se traspasa al CO₂ en forma de colisiones entre las moléculas, aumentando de nivel energético (absorción estimulada). La molécula en estado excitado emite un fotón al reducir su energía (emisión espontánea). Dicho fotón viaja dentro de la cavidad del resonador y estimula la transición energética en otras moléculas (emisión estimulada), obteniendo fotones con igual energía, dirección y frecuencia viajando dentro del resonador.

El resonador óptico es básicamente un tubo con dos espejos en sus extremos, uno de ellos con una reflectividad total el cual refleja los fotones, promoviendo la excitación

de las moléculas, amplificando la emisión estimulada, hasta llegar al extremo del resonador óptico en el cual existe un espejo con reflectividad parcial, el cual deja salir parte de los fotones en forma de un haz láser el cual puede ser guiado mediante ópticas generalmente fabricadas de ZnSe, GaAs o CdTe y espejos fabricados en cobre o revestidos en oro dada su gran reflectividad (Dutta & Manna, 2003).

Adicionalmente para obtener el máximo de eficiencia en la transferencia de energía entre el N₂ y el CO₂, se utiliza He como refrigerante.

El láser permite procesar una gran variedad de materiales mediante la aplicación de distintas técnicas de procesamiento, que varían según la cantidad de energía aportada al material. Mediante la aplicación del láser es posible trabajar el material en estado sólido logrando calentamiento para doblar placas o producir un tratamiento térmico, lograr un cambio de fase en cierta zona del material para realizar recubrimientos o recristalización del material base y finalmente lograr vaporización del material para procesos de corte o perforado principalmente.

Los diferentes procesos se pueden observar en la Figura 2.2 en el gráfico densidad de potencia en función del tiempo de interacción, supeditando el tipo de proceso a los parámetros utilizados. Se pueden distinguir, según el estado del material procesado, la zona correspondiente al tratamiento realizado durante esta investigación. Adicionalmente en el gráfico de la Figura 2.2, en el cual Schneider (1998) recopila información sobre algunos recubrimientos con láser en aceros reportados en la literatura, se grafican junto a los valores típicos de densidad de potencia y tiempo de interacción de esta investigación.

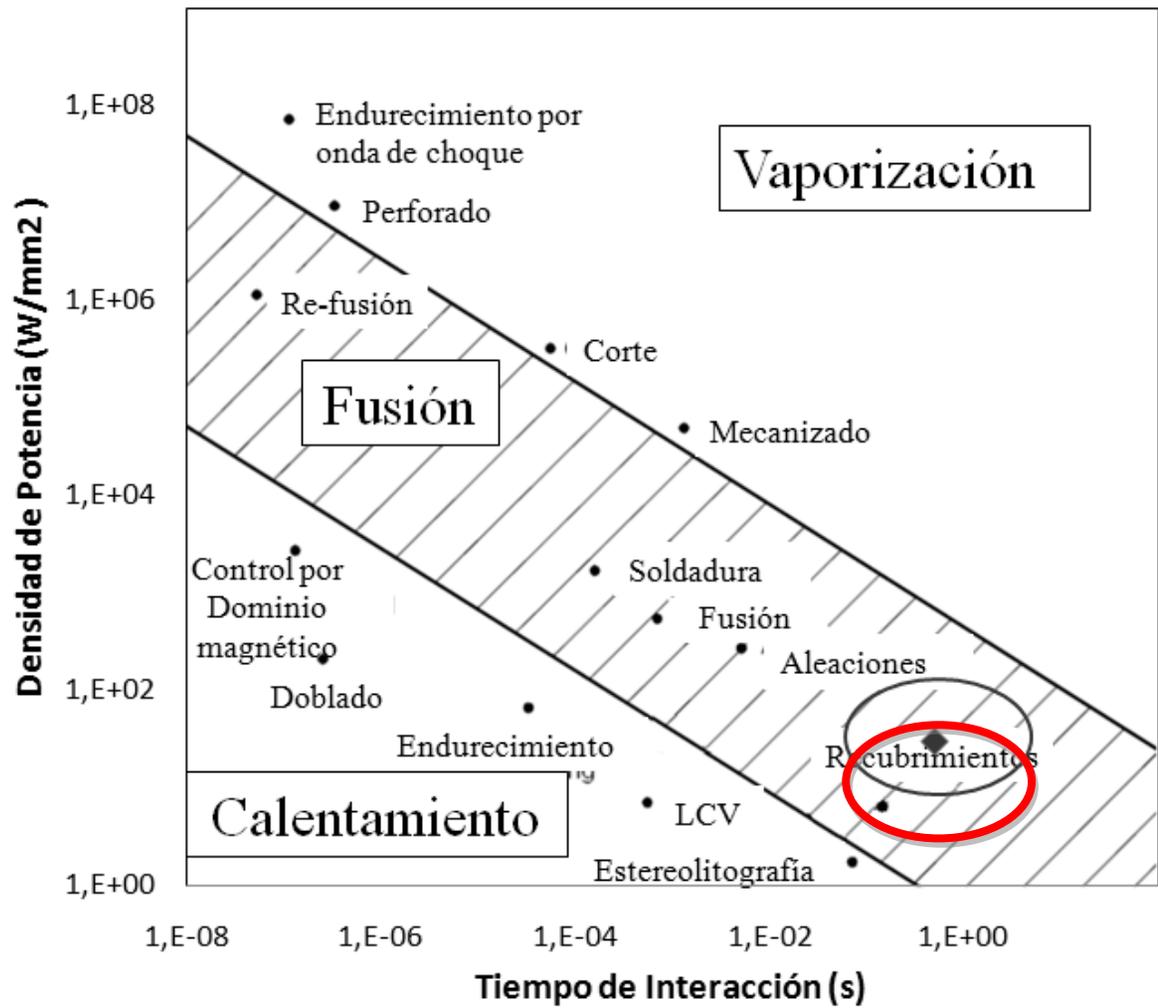


Figura 2.1: Densidad de potencia y tiempo de interacción para distintos procesos láser. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)

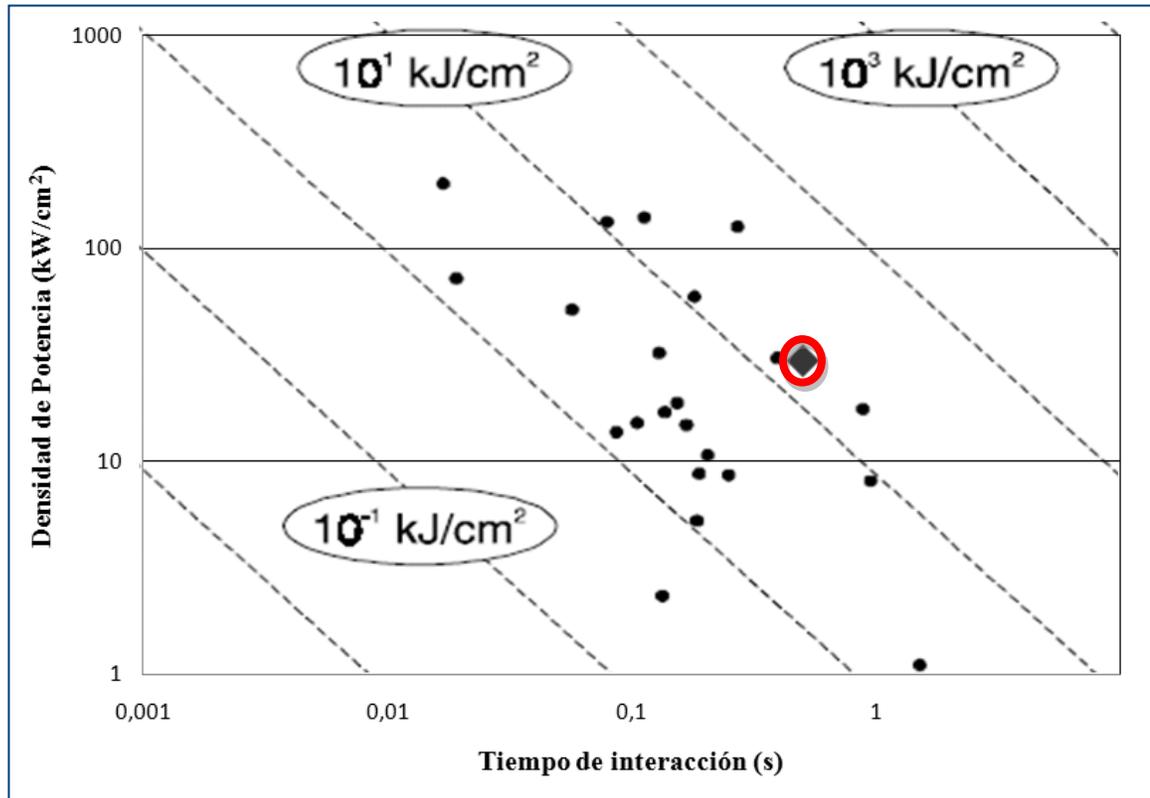


Figura 2.2: Gráfico Densidad de potencia y tiempo de interacción para los valores recopilados por Schneider y valores obtenidos en la investigación.

2.2. Descripción del tratamiento térmico

El tratamiento térmico es el proceso realizado a los aceros con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, en especial, la dureza, tenacidad y elasticidad.

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono, con un máximo de 2% de carbono. Además pueden contener impurezas y elementos adicionales de aleación, tales como manganeso, cromo, molibdeno, cobalto entre otros. Por otra parte, el endurecimiento del acero depende de las transformaciones cristalinas de la estructura del hierro y los cambios en la solubilidad del carbono, los cuales a su vez son dependientes de la temperatura y los componentes de aleación presentes.

El hierro puro puede existir en tres fases sólidas las cuales son estables en distintos rangos de temperatura, reciben distintos nombres tal como se indican en la Tabla 2.1 y distintas estructuras cristalinas (Figura 2.3).

Tabla 2.1: Rango de temperaturas, nombre y tipo de estructura cristalina presente en el hierro.

Rango T°	Nombre	Estructura Cristalina
Bajo 912°C	α -hierro	BCC Cúbica centrada en el cuerpo
912°C a 1394°C	γ -hierro	FCC Cúbica centrada en la cara
1394°C a 1538°C	δ -hierro	BCC Cúbica centrada en el cuerpo

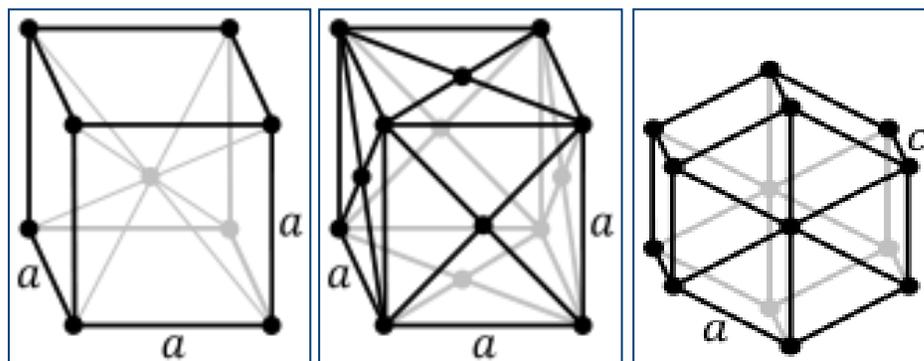


Figura 2.3: Mallas de Bravais a) BCC, b) FCC, c) Hexagonal.

Por ejemplo a temperatura ambiente el hierro- α puede disolver solo un 0,006% en peso de carbón y es llamada Ferrita, pero existen muchos efectos que pueden aumentar esta concentración más allá del nivel de equilibrio. En muchos casos la Ferrita y Cementita coexisten en forma laminar y forman una estructura llamada Perlita, la cual

se forma en estado sólido a partir del hierro- γ cuando el acero es enfriado a baja velocidad por debajo de 721°C (ASM, 1992).

Cuando un acero es calentado en el rango de estabilidad del hierro- γ (912°C a 1394°C), la solubilidad del carbón aumenta. La malla cristalina del hierro- γ puede disolver sobre 2% del carbono a 1148°C, esta estructura hierro- γ a alta temperatura es llamada Austenita.

Por ejemplo si un acero a temperatura ambiente, contiene ciertas cantidades de Ferrita y Perlita, y es calentado sobre 900°C, la Ferrita cambiará su estructura cristalina de BCC a FCC formando Austenita, la cual posee mayor espacio para alojar átomos extras que su precursora BCC, entonces aceptará rápidamente átomos de carbono los cuales se ubican intersticialmente. Estos átomos provienen del carburo de hierro presente en las capas de Perlita, la cual disminuye su concentración de carbono, debido a la rápida difusión existente, volviendo homogéneo el material.

Si el acero es enfriado lentamente a una tasa menor a 30°C/s, la Austenita se vuelve a transformar en la estructura Ferrita Perlita, ya que hay suficiente tiempo para la difusión del carbono. La Austenita, al enfriarla bajo 721°C se vuelve inestable, rechazando el carbono y transformándose en ferrita con un bajo contenido de éste, el carbono restante se combina con el hierro para crear el carburo de hierro, el cual se ordena laminarmente con Ferrita y forma la Perlita. Pero si la Austenita es enfriada tan rápidamente, que el carbono no alcanza a difundir fuera de la malla cristalina, puede cambiar a estructura BCC sin rechazar el carbono intersticial, como la estructura BCC no tiene espacio para el carbono sobrante, la malla se deforma dando paso a una configuración tetragonal (BCT) meta estable llamada Martensita. Debido a esta distorsión, no se pueden mover las dislocaciones, con lo cual la estructura se vuelve bastante dura, y frágil, que generalmente es necesario volver a calentarla para lograr un ablandamiento, conocido como revenido, que la haga aplicable para la mayoría de usos (Dorronsoro, 1996).

En resumen los tres procesos en el endurecimiento del acero son:

- El acero es calentado hasta el rango austenítico por suficiente tiempo para que el carbono se disuelva completamente.
- Es enfriado lo suficientemente rápido para prevenir que el carbono deje la malla cristalina, formando Martensita.
- Usualmente se realiza un paso final de revenido para aumentar la ductilidad de la pieza endurecida y obtener las propiedades deseadas.

La dureza de la Martensita está relacionada con el contenido de carbono, tal como se ve en la Figura 2.4. Es posible obtener Martensita con tasas de enfriamiento menores con respecto al acero puro, adicionando elementos de aleación, los cuales dificultan el rechazo del carbono disuelto.

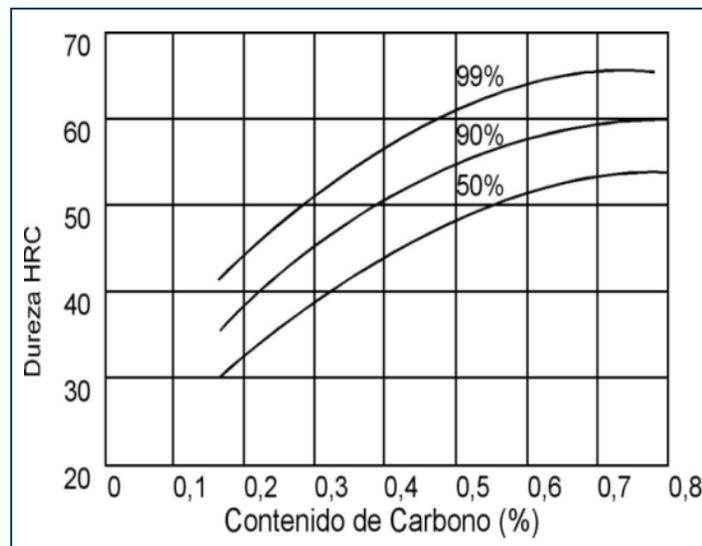


Figura 2.4: Gráfico dureza máxima del acero en función del contenido de carbono. En cada curva se especifica el porcentaje de Martensita presente. (Migliore, 1996)

La propiedad que posee un acero para ser templado, es llamada templabilidad, y está directamente relacionada con el contenido de carbono y elementos de aleación. En procesos convencionales de endurecimiento, la pieza de acero es calentada en un horno hasta una temperatura uniforme en el rango Austenítico, luego es enfriada para producir Martensita. El enfriamiento dependerá de la aleación y del tamaño de la pieza, aceros de bajo carbono necesitan elevados gradientes de enfriamiento para retener el carbono en la estructura, para lo cual son enfriados por agua logrando tasas de alrededor de 200°C/s (Apraiz, 1964). En piezas de mayor tamaño, el núcleo de la pieza no logra la misma velocidad de enfriamiento para la transformación, debido a las propiedades térmicas del acero, en especial la conducción. En definitiva el acero queda con un temple gradual en función de la distancia desde la superficie, lo cual no sucede en los aceros con elementos de aleación, ya que estos retardan el proceso de difusión del carbono entre otros fenómenos.

Otro efecto que genera la transformación del acero es un cambio dimensional, el acero se expande cuando es endurecido al pasar de hierro- γ con estructura FCC a hierro con estructura BCT. Cuando es calentado ocurre una contracción substancial cuando la Austenita se forma a partir de la Ferrita y al enfriar una expansión ligeramente más grande cuando la Martensita se forma a partir de la Austenita, lo cual puede producir deformaciones considerables debido a que no todas las partes de la pieza se transforman al mismo tiempo.

Una manera de predecir que velocidades de enfriamiento se requieren para obtener ciertas estructuras cristalinas, es mediante las curvas TTT (Figura 2.5), en ellas se relaciona el tiempo y la temperatura requeridos para una transformación isotérmica para cada material en particular. Desgraciadamente para el acero seleccionado y a las velocidades de enfriamiento obtenidas mediante el proceso láser, existe muy poca información al respecto, y solo se dispone de las curvas mostradas en la Figura 2.5.

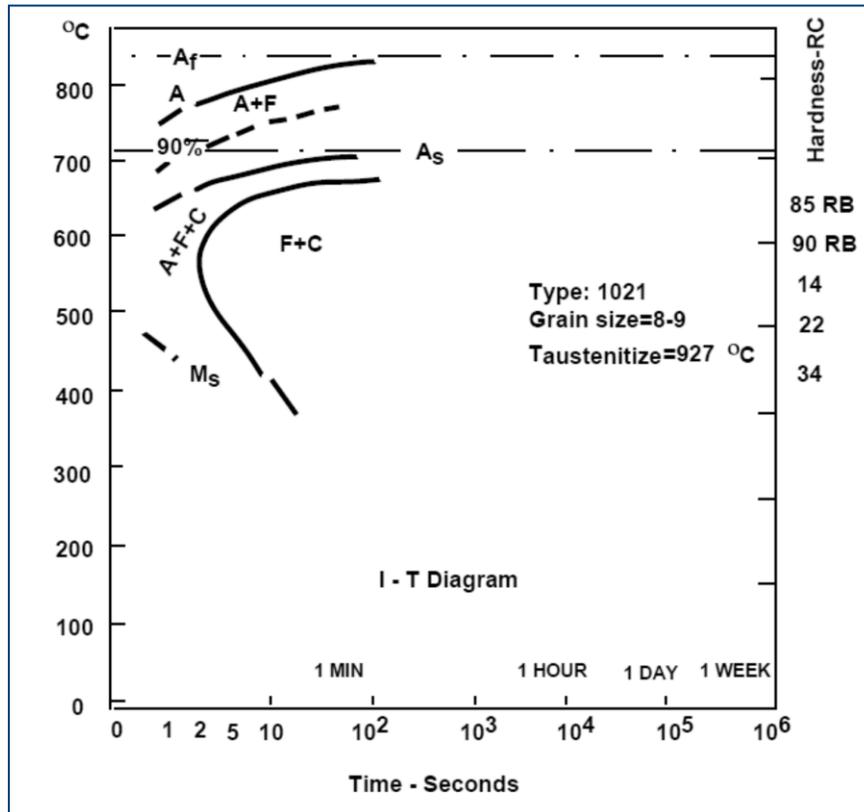


Figura 2.5: Curva TTT acero 1021 (Meyrick & Wagoner, 2001).

2.2.1. Endurecimiento superficial con láser

El calentamiento con láser es un proceso superficial y similar al proceso de inducción en el cual el calor es generado en la superficie del material. Un haz láser no tiene temperatura intrínseca, pero se puede asociar una temperatura con la densidad de potencia vinculada al haz láser, usando la ecuación de Stefan-Boltzmann, con la cual para una potencia de 1000 W se obtiene una temperatura de 3700 K.

La luz es una onda electromagnética transversal, la cual es caracterizada por campos eléctricos y magnéticos, cuando la luz incide en la superficie estos campos interactúan con el material causando reflexión, transmisión y absorción de la energía del

haz. En metales la interacción con la luz es controlada por los electrones libres, los cuales pueden ser considerados como un gas rodeando los átomos. Los electrones en el gas son excitados hasta la oscilación por la onda incidente, mientras tanto el campo eléctrico entrando en el metal es fuertemente amortiguado previniendo la propagación de la luz a través del metal. Estos efectos son característicos de la gran mayoría de metales, son buenos reflectores al infrarrojo a pesar de ser opacos. Sin embargo ninguna de estas características es favorable para el tratamiento con láser, la alta reflectividad es directamente asociada con una baja absorción de la radiación incidente, obteniendo una baja eficiencia en el proceso.

El porcentaje de absorción de la energía láser en el material es función de las propiedades ópticas del material, incluyendo el acabado superficial, presencia de óxidos en la superficie, temperatura y la longitud de onda del material a temperatura ambiente. Entre el 6% y 10% de la emisión láser incidente es absorbida en la superficie de un acero de bajo carbono (Stern, 1990). En haces focalizados con densidades de potencia del orden de 10^5 a 10^6 W/cm² (Koebner, 1984) la absorción del material cambia debido al rápido aumento de la temperatura y cambio de fase de sólido a líquido, produciéndose un aumento considerable en el porcentaje de la energía absorbida por el material, dicho aumento de absorción continúa mientras más alta sea la temperatura (Figura 2.6). Sin embargo, existen capas especiales que pueden ser aplicadas en la superficie en forma de pintura antes de hacer inducir el láser para mejorar el acople. Dichas pinturas son fabricadas en base a grafito, carbón, óxidos de hierro o cobre, disueltos en un líquido, el cual se evapora sin dejar residuos después de la aplicación. Con la aplicación de esta capa, la absorción mejora a valores cercanos al 80%. (Koebner, 1984).

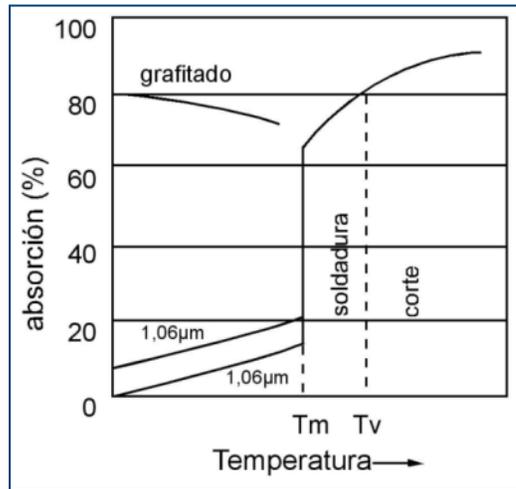


Figura 2.6: Absorción de la luz láser en el hierro en función de la temperatura y longitud de onda. (Koebner, 1984).

2.2.2. Tratamiento superficial con adición de material

El término recubrimiento es muy general, entre los tipos de recubrimiento se encuentran pinturas, deposición de vapores, recubrimientos en caliente, rociado térmico, soldaduras convencionales como recubrimiento y recubrimiento con láser.

Según Schneider (1998), los tratamientos superficiales con láser pueden ser distinguidos en tres grupos según el grado de modificación de la superficie: sin fusión del material base, con fusión del material base y con fusión y adición de otro material a la superficie. El mecanismo puede ser visto en la Figura 2.7 en la cual se aprecian los diagramas de los diferentes tratamientos.

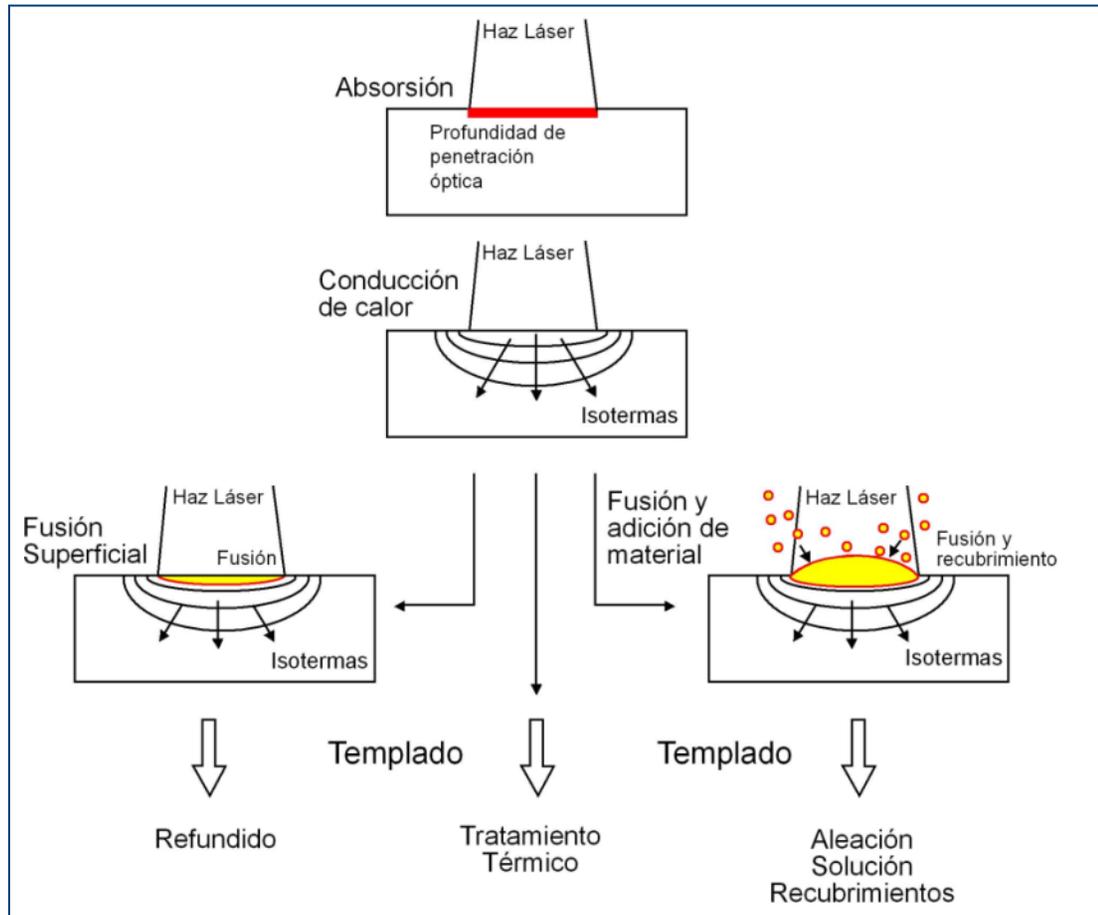


Figura 2.7: Tipos de tratamientos láser distinguiendo respecto a la temperatura superficial (fase sólida o líquida) y la adición de material (Schneider, 1998).

Los tratamientos con y sin fusión de material, se basan en los cambios microestructurales producidos en la capa superficial del material, generados a partir de la recristalización y enfriamiento repentino producido por la conducción de calor hacia el interior del material base, produciendo un auto templado en la zona calentada.

El patrón de tratamiento térmico producido por láser tiene características únicas, entre las cuales se destacan las siguientes:

Debido al elevado gradiente térmico y el auto templado producto de la conducción de calor hacia el interior del material, la zona martensítica está muy bien definida. Cuando se realiza un perfil de micro dureza, esta permanece constante a través del área transformada, luego baja drásticamente hasta el material base.

Raramente es necesario revenir la pieza ya que la Martensita producida por el tratamiento láser no genera problemas de fragilidad, debido a que posee un tamaño de grano pequeño.

El tratamiento láser generalmente se realiza traslapando pistas sobre la superficie, lo cual crea lugares en los cuales la dureza es ligeramente menor entre dichos pasos.

La adición de material sobre la superficie es necesaria cuando los requerimientos sobre un componente requieren materiales de alto desempeño, resistentes a la abrasión, el impacto, corrosión y alta resistencia al roce adhesivo bajo grandes cargas. Dichos materiales generalmente son caros y muy difíciles de mecanizar, esto favorece la aplicación de materiales de alto desempeño en cierta parte de la superficie de un componente donde se requieran características especiales, usando un material base relativamente fácil de mecanizar y con menor costo, logrando una aleación determinada en la superficie basada en el substrato, o simplemente una capa con un material completamente diferente, lo cual también es aplicable para producir superficies de alta calidad en piezas nuevas, producir piezas completas y recuperar o mejorar partes usadas (Schneider, 1998). Estos procesos son ampliamente utilizados en el área petrolífera, válvulas industriales, bombas, motores de combustión interna, en dichas aplicaciones es necesario componentes de precisión los cuales deben resistir condiciones extremas y generalmente deben ser mecanizados después del tratamiento para obtener la precisión requerida.

En el recubrimiento láser principalmente se crea una unión metalúrgica entre las dos capas a diferencia del rociado térmico el cual solo crea una unión mecánica entre capas y posee cierto porcentaje de porosidad.

El láser es una mejora al arco eléctrico como lo fue en su tiempo el carbón a la leña en el trabajo en caliente de metales. Controlando la densidad de potencia es posible fundir parte del metal sin afectar térmicamente el resto del material. El único aparato que se asemeja a los niveles de densidad de potencia alcanzados por el láser es el haz de electrones, su desventaja es que necesita vacío para propagarse, mientras que el láser puede transmitirse a través de aire o atmósfera controlada si es requerido.

El procesamiento con láser no ejerce fuerzas sobre la superficie a diferencia de procesos como recubrimientos por fricción (Gaafer, Mahmoud, & Mansour, 2010) o por explosión (Ettaqi, Langlois, & Bigor, 2008). Además el láser necesita alrededor de un quinto de la energía con respecto al proceso de soldadura TIG para obtener el mismo resultado con lo cual los daños por distorsiones térmicas son minimizados, al igual que el mecanizado posterior al tratamiento (Migliore, 1996).

Para poder asegurar una unión metalúrgica, el material de aporte y el material base deben fundirse juntos, para esto es necesario controlar la potencia aplicada para obtener una fusión de ambas capas permitiendo así la difusión en estado líquido y la mezcla parcial o total de ambas capas. Gracias a la rápida solidificación de ambas capas, se obtienen las características de los materiales endurecidos por efecto del enfriamiento repentino y de la aleación formada entre ellos.

Pese a todas las ventajas del láser, este se ocupa solo en pequeña cantidad en la industria, debido al alto costo de adquisición de los equipos láser, equipos de posicionamiento, dispositivos de distribución de material de aporte ya sea en polvo o alambre, los cuales deben ser controlados numéricamente para asegurar la repetitividad y precisión del proceso, todo esto aparte de la complejidad del resonador láser.

Existen tres tipos de recubrimiento con láser, los cuales se clasifican según la composición, la mezcla entre nuevo material y el material base (Figura 2.8). Los 3 métodos se conocen como Aleaciones láser, Soluciones sólidas con láser y Plaqueado Láser (*Láser alloying*, *Láser dispersing* y *Láser cladding*).

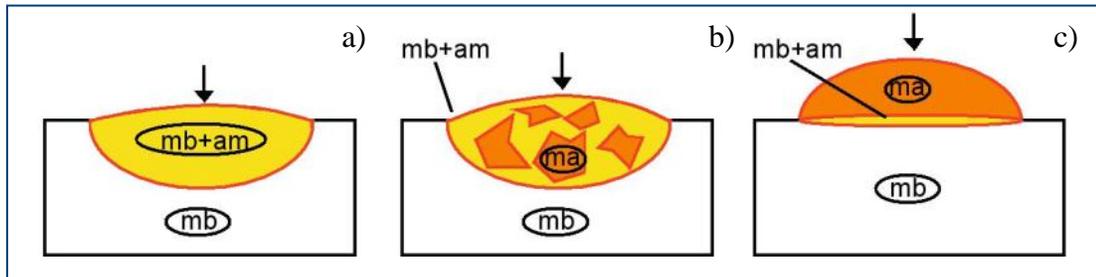


Figura 2.8: a) Aleaciones láser, b) Solución sólida con láser, c) Plaqueado láser (mb=material base, am= material de aporte).

Los tres métodos consisten en fundir una parte del material base, al cual se le aplica el material de aporte, pero se diferencian en los parámetros utilizados en el proceso tales como la cantidad de polvo utilizada, velocidad relativa, potencia, focalización. Según el grado de mezcla entre ambos materiales podemos clasificar en tres grupos:

Soluciones sólidas, se logra una solución de partículas sólidas del material de aporte en una matriz de material base fundido, lo cual logra una unión principalmente mecánica entre los dos materiales, la cual es utilizada especialmente para carburos y otros materiales de aporte con elevado punto de fusión

Plaqueado láser es un proceso en el cual los dos materiales se funden completamente mediante el haz láser, pero se mezclan y reaccionan químicamente solo en la interfaz formada. En la sección transversal se diferencian tres zonas, material base fundido, mezcla y la capa superficial solo con el material de aporte fundido, el cual le da las características a la superficie.

Aleaciones láser es un caso particular de los recubrimientos pero en este caso, material base y de aporte se mezclan completamente debido a la mayor difusión en estado líquido y el efecto de la convección dentro de la pileta. Al solidificar ambos

materiales, estos se unen metalúrgicamente, reaccionan químicamente, creando una aleación en la zona fundida, la cual es responsable de las características superficiales.

2.3. Descripción de Dispositivos de distribución de polvo

Existen tres métodos distintos para aplicar el material de aporte sobre el material base, los cuales son: alimentación de alambre, mediante inyección de polvo y polvo pre depositado. Este último tiene dos etapas, en la primera etapa se pre deposita el polvo sobre la superficie del material el cual va disuelto en algún líquido, formando un barro y en la segunda etapa el material es fundido mediante el haz láser. El método de alimentación de alambre, consiste en aplicar el material en forma de alambre mediante una guía lateral la cual dirige el alambre hacia la zona de interacción en la cual es fundido junto al material base por el haz láser. Finalmente la inyección de polvo mediante tobera lateral o coaxial (Figura 2.9) Va distribuyendo el material de aporte al mismo tiempo que el haz láser va fundiendo el polvo y material base.

En el proceso de alimentación con alambre es necesario un posicionamiento exacto y una velocidad adecuada para que el alambre no intervenga en la pileta fundida alterándola y además atenúa el láser que llega al material. El alambre se dirige a la zona de interacción y es impulsado a cierta velocidad que determina la cantidad de material de aporte aplicado. Por otra parte, en el caso de polvo inyectado, son necesarios ciertos dispositivos que regulen la cantidad deseada de polvo y la proyecten al material mediante un flujo de gas el cual es dirigido por medio de toberas. Una ventaja del polvo frente al alambre es que acopla mejor la energía del láser, debido a que está compuesto de partículas, la reflexión se dispersa (de cada una, llega a otra partícula), aumentando la energía acoplada, lo cual hace más efectivos los recubrimientos con polvo que con alambre (Schneider, 1998). Con el polvo el proceso es más flexible, ya que permite variaciones de concentración y cantidad en tiempo real, logrando un recubrimiento

variable en dimensiones y/o composición, y además existe mayor cantidad de elementos en polvo que en alambre (Schneider, 1998).

Para alimentar el polvo a la zona tratada, es necesario tener un dispositivo dispensador de polvo, el cual entregue la cantidad deseada para el proceso, dichos dispositivos son parte importante del equipo en recubrimientos superficiales y son utilizados en aplicaciones tales como rociado térmico, recubrimiento con láser y otros métodos de procesamiento de materiales. Debido a la gran cantidad de polvos utilizados, con distintas propiedades físicas y mecánicas, es imposible utilizar un solo tipo de dispensador de polvo para todos ellos.

Al disminuir el tamaño de partícula del polvo, su fluidez disminuye causando problemas en el transporte de este, la fluidez también se ve afectada por partículas adhesivas y aglutinantes, además de partículas cargadas electrostáticamente. Por estas razones es necesario un tipo de dispensador de polvos para cada tipo de polvo.

En el caso de recubrimientos con láser, es necesario un dispensador de polvos que entregue un flujo uniforme y continuo de polvo, con gran precisión y en el rango requerido.

Un sistema dispensador de polvo requiere una tolva para almacenar el polvo, un mecanismo que provee el material de manera continua y en la cantidad deseada un flujo de gas que arrastre el polvo hacia la tobera la cual direcciona el flujo de polvo a la superficie del material base, donde interactúa con el haz láser.

Las tasas de polvo para recubrimientos varían en el rango de 5 a 50 g/min, el dispensador de polvos puede generar esa cantidad mediante diferentes mecanismos, se requiere una estabilidad con una variación menor a 4% para ser aceptable (Schneider, 1998)

2.3.1. Mecanismos dispensadores de polvo

Existen muchos tipos de dispensadores de polvos, en general son categorizados en las siguientes clases según sus principios de operación: basados en la gravedad, sistemas mecánicos, cama fluidizada y vibración. En algunos casos se utiliza más de un principio para asegurar una mejor estabilidad en el flujo de polvo. En todos los tipos de dispensadores es necesario utilizar un gas para transportar las partículas del polvo hasta la zona de interacción con el material base y se utilizan diferentes tipos de toberas para dirigir el polvo hacia dicha zona.

Los sistemas basados en la gravedad, funcionan de manera similar a un reloj de arena, en el cual se varía el diámetro de la garganta, lo cual cambia la cantidad de polvo que sale y se retroalimenta con un mecanismo de pesaje electrónico.

El dispositivo basado en el polvo fluidizado, se basa en principios de los fluidos, con lo cual elimina la necesidad de partes móviles reduciendo el desgaste y la mantención. El dispositivo consiste en una tolva diseñada especialmente, en la cual ingresa gas y arrastra las partículas del polvo que van moviéndose en la tolva. La cantidad se regula variando la apertura en la tolva.

Un alimentador por vibración consiste en una tolva con en una serie de placas delgadas inclinadas en cierto ángulo, sobre las cuales el polvo se va desplazando a medida que varía la frecuencia y amplitud de la vibración del dispositivo, llevando el polvo que cae en la serie de placas a una cámara donde es arrastrada por el gas.

Existe otro tipo de sistema de alimentación de polvo mediante mecanismos uno de ellos es conocidos como dispensador de polvo por tornillo, puede manejar un amplio rango de polvos con diferentes tamaños de partículas, normalmente operan con poca o nula diferencia de presión con el exterior. La cantidad de polvo transportada por un tornillo típico depende de sus características geométricas tales como paso y diámetro, y la velocidad de giro del tornillo, la cual es controlada mediante un circuito electrónico que controla la velocidad del motor el cual impulsa el tornillo.

Una de las desventajas, es la interacción entre las partes móviles y las partículas del polvo, causando desgaste en los componentes afectando la precisión del sistema, lo que requiere constante mantenimiento y reemplazo de componentes.

Este dispositivo fue utilizado en el desarrollo de la investigación, se diseñó y fabricó durante esta tesis, sus detalles especifican en la sección 3.1.4 y sus planos se encuentran en el anexo A.

2.3.2. Toberas

Las toberas desempeñan un rol fundamental en el proceso de recubrimientos láser, ellas se encargan de dirigir el flujo de polvo que sale del dispensador, a la zona de interacción entre los materiales y el haz láser.

El diseño de la tobera puede ser lateral o coaxial (Figura 2.9), la tobera lateral es adecuada para procesamiento unidireccional, en cambio con la tobera coaxial es posible realizar procesos omnidireccionales. Producto de las buenas propiedades conductivas y reflectivas del cobre, las toberas son fabricadas en este material, facilitando su refrigeración y resistiendo la energía láser reflejada desde la zona de interacción, la cual transmiten hacia el cabezal donde se disipa.

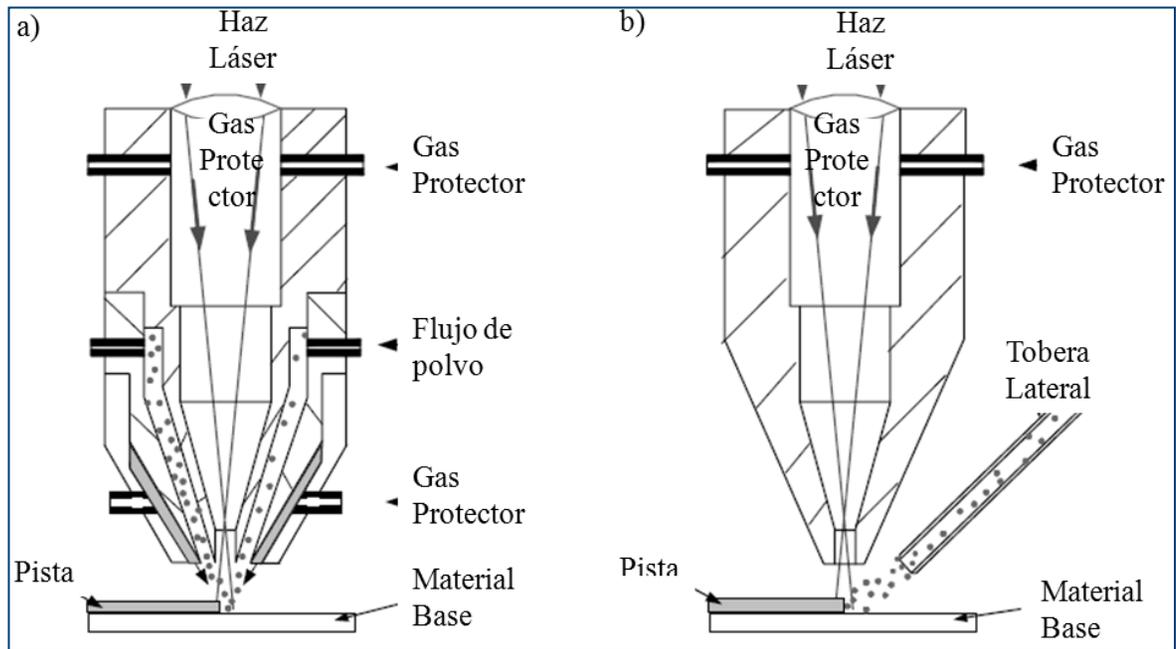


Figura 2.9: a) Tobera coaxial, b) Tobera lateral (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)

2.3.2.1. Tobera Coaxial

La tobera coaxial, generalmente va integrada con el sistema óptico del láser. Su principal ventaja es la independencia de la calidad de la pista en función de la dirección de procesamiento. En la tobera coaxial, existen tres flujos involucrados que interactúan con la superficie del material, el gas protector por el centro de la tobera, el gas con polvo y un flujo de gas que rodea el flujo de polvo. Su esquema se aprecia en la Figura 2.9a.

Un flujo de polvo coaxial al haz láser se forma al salir de la tobera, el cual debe tener su punto focal al nivel de la zona fundida y mantener un flujo laminar con una distribución homogénea de polvo. Es posible llegar a una configuración semejante a la tobera coaxial, posicionando múltiples toberas laterales alrededor del cabezal.

2.3.2.2. Tobera lateral

Tal como se aprecia en la Figura 2.9b, la tobera lateral es básicamente un tubo con diámetro interno determinado, largo y forma apropiada, el cual guía el polvo hacia la zona de interacción y es posible posicionarla a diferente distancia y ángulo respecto a la zona de interacción, para poder obtener una intersección entre el flujo de polvo y el haz láser.

En pruebas realizadas tomando fotografías de la corriente de polvo para obtener el perfil de polvo en función de la distancia desde el extremo de la tobera, se encontró que el perfil se aproxima a una parábola tal como se aprecia en la Figura 2.10. Dicha ecuación, permite obtener el diámetro de la corriente de polvo en función de la distancia desde la tobera al material (z [mm]), el diámetro interno de la tobera d_0 y un coeficiente λ (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004). La ecuación para esta parábola es:

$$D_p = \lambda z^2 + d_0$$

En este caso, el coeficiente λ se obtiene a partir del estudio indicado por Toyserkani et al (2004). Para una tobera de diámetro de 1,8mm y $z < 23$, λ toma el valor de $2,58 \cdot 10^{-2} \frac{1}{,mm}$.

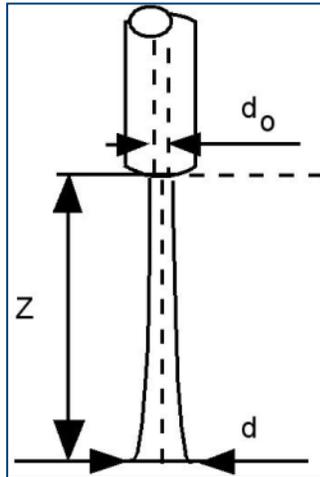


Figura 2.10: Distribución parabólica del flujo de polvo a la salida de la tobera.

2.4. Parámetros y características del proceso.

2.4.1. Parámetros de operación

El proceso de recubrimientos láser tiene como principales parámetros de operación la potencia láser entregada por el equipo, si es pulsada o continua, la velocidad de avance, la cantidad, tipo de polvo utilizado y manera de proyectarlo, el material base entre otros. Es importante que todos estos parámetros estén en ciertas combinaciones adecuadas para tener los resultados requeridos. A continuación se detallan los parámetros más relevantes en el proceso.

Potencia: su combinación con otros parámetros, en especial velocidad y diámetro focal, dependerán principalmente de los resultados obtenidos, ya sea poca o nula fusión de los materiales hasta demasiada fusión incluyendo vaporización. Según el tipo de láser y la aplicación, la potencia puede ser entregada en forma continua o pulsada, además de poder variar su distribución de potencia dentro del haz láser según la polarización del haz.

Velocidad: se refiere a la velocidad relativa entre el material base y el haz láser, es un parámetro fuerte dentro del proceso, ya que determina el tiempo de interacción entre el láser y el material. Generalmente dada las dimensiones trabajadas, se mide en mm/s y depende principalmente del sistema posicionador, si es el material el que se mueve o el haz láser mediante espejos o brazos robóticos.

Diámetro focal: se define como el ancho del haz láser sobre el material base, es otro de los parámetros fuertes en el proceso junto con velocidad y potencia, de él depende la concentración de la potencia sobre el material base, a igual potencia para un diámetro menor, tendremos una mayor concentración de la potencia en el material.

Flujo de polvo: Determina las dimensiones de la pista sobre el material base y según su cantidad, la proporción en la aleación formada. Generalmente se mide en g/min y su cantidad depende principalmente del dispensador de polvos. Demasiado polvo podría no fundirse con el haz láser, y atenuar demasiado la luz incidente sobre el material.

La combinación de los parámetros detallados anteriormente lleva a 2 parámetros referidos en la literatura por (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004) los cuales corresponden a energía específica $E_{Específica} = \frac{P_{Láser}}{D_{Láser} \cdot V} \frac{J}{mm^2}$ y densidad de polvo

$$G = \frac{m}{D_{Láser} \cdot V} \frac{m}{mm^2} .$$

2.4.2. Propiedades de la pista fundida

Se clasifican en cuatro grupos los cuales se detallan en la Tabla 2.2. Algunas de las propiedades están interrelacionadas, por ejemplo la resistencia al desgaste se ve afectada por la dureza, microestructura número de grietas con su profundidad y dirección, la adhesión etc. Es importante prevenir las grietas, ya que estas inician la fractura por corrosión y reducen la resistencia a la fatiga.

Tabla 2.2: Propiedades generales de una pista fundida.

Propiedades Geométricas	Propiedades Mecánicas	Propiedades Metalúrgicas	Propiedades Cualitativas
Dimensiones de la pista*	Distribución de Dureza*	Microestructura*	Porosidad
Dilución	Tensiones residuales	Dilución*	Grietas*
Rugosidad	Resistencia al desgaste	Tamaño de Grano*	
	Resistencia a la Tracción	Homogeneidad*	
		Resistencia a la Corrosión	

*Propiedades determinadas por inspección visual de la muestra.

A continuación se profundizará en las propiedades más relevantes y utilizadas en este estudio.

Propiedades geométricas: son consecuencia de la combinación de parámetros de operación, son medidas mediante microscopio óptico y un software de procesamiento de imágenes. Las principales medidas son alto y ancho de las zonas afectada térmicamente, fundida y pista superior, y se especifican en la Figura 2.11.

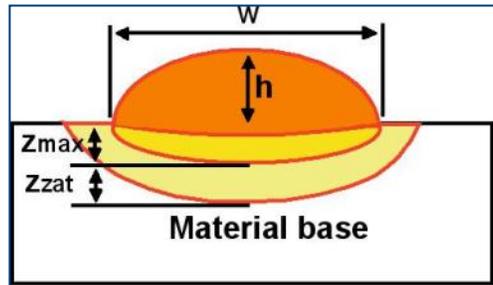


Figura 2.11: Esquema de piqueta y pista fundida sobre el material base.

Mediante la combinación de las mediciones, es posible calcular el área de cada una de las 3 zonas aproximándolas a media circunferencia con diámetro igual al ancho de la zona.

Otro parámetro combinado es la razón de aspecto, la cual mide cuantas veces el alto de la pista está contenido en el diámetro, se calcula como la razón entre el ancho y el alto total. Las dimensiones utilizadas en el cálculo se pueden apreciar en la

Figura 2.11

$$RA = \frac{w}{h + Z}$$

Propiedades Mecánicas: dependen de las propiedades metalúrgicas y termo físicas de los materiales, principalmente de la aleación formada, solidificación y posterior tratamiento térmico producido al enfriarse rápidamente. Dadas las condiciones del laboratorio, solo es posible medir la dureza en la zona transversal de la zona tratada, realizando perfiles de dureza y obteniendo un promedio en la zona fundida.

Propiedades Metalúrgicas: basándose en el análisis metalográfico, es posible observar la microestructura, tamaño de grano, dirección de crecimiento y la homogeneidad de la zona tratada en su sección transversal, además de observar la zona afectada térmicamente.

Es necesario determinar o bien, definir, el porcentaje con el cual cada componente aporta a la aleación, a fin de saber que fases hay presentes y conocer los

diagramas de fases respectivos. Por ejemplo la Figura 2.12, presenta el diagrama de fases binarios para el complejo Cr-Fe, en donde podemos obtener información sobre que temperatura y composición de la aleación es necesaria para obtener cierta fase. Además es posible es realizar análisis de difracción de rayos X, para obtener el patrón de difracción y obtener así las fases presentes en el material.

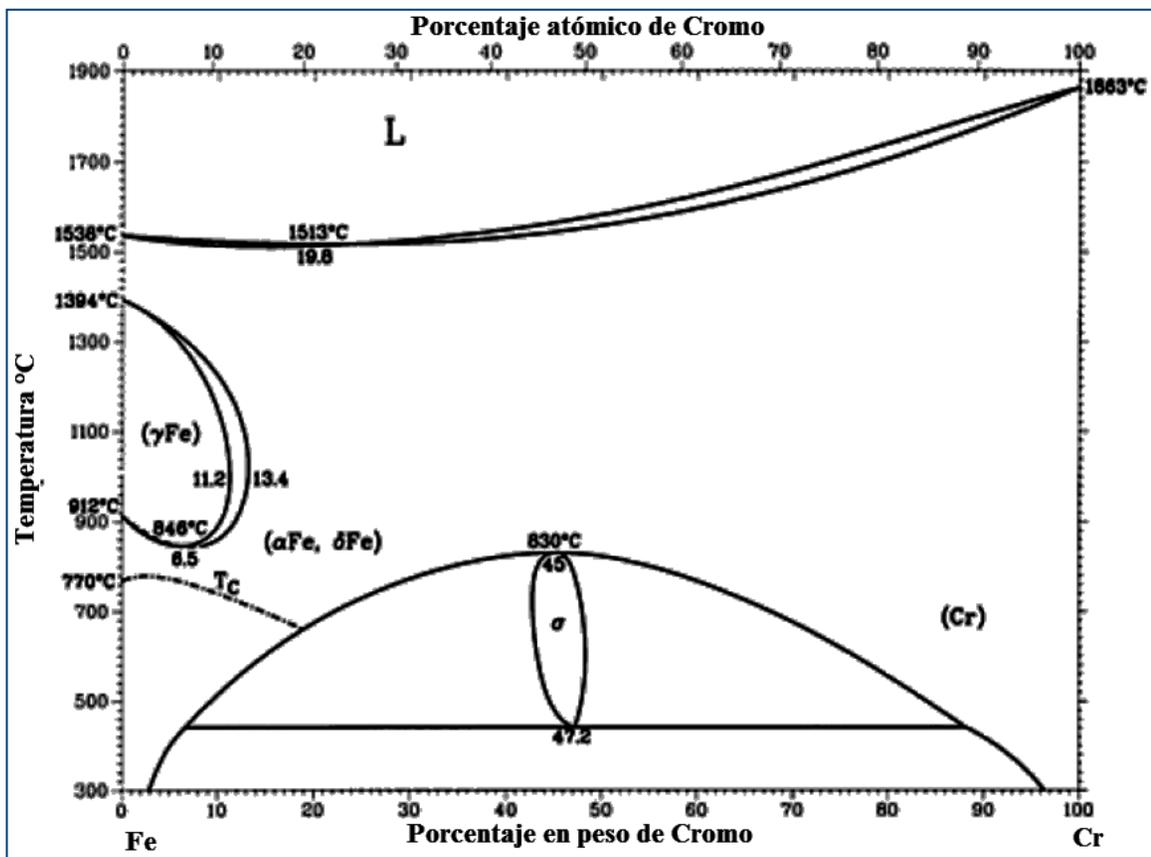


Figura 2.12: Diagrama de fases Cr-Fe.

Propiedades Cualitativas: observables principalmente a través del análisis metalográfico, se indica la presencia de porosidades o grietas en la sección transversal, en especial en la interfaz del material de aporte fundido sobre el material base sólido, la forma de la pileta y aspecto de la pista solidificada.

Porosidad se refiere a la presencia de espacios vacíos dentro de la pista o la zona fundida. La porosidad es causada por varias razones, en particular como resultado de la formación de burbujas de gas que quedan atrapadas al solidificar la zona fundida. Si el proceso de solidificación ocurre en distintas direcciones, algunas regiones en la zona fundida pueden quedar líquidas y luego debido a la contracción del material líquido al solidificar se producen esfuerzos residuales los cuales pueden inducir la formación de poros. Otros tipos de porosidad se producen en la interfaz entre material de aporte y sustrato, una de ellas es causada por la presencia de partículas extrañas en la superficie del material tales como grasa o depósitos indeseados los cuales pueden influir en la tensión superficial del material líquido y en la unión de ambos materiales.

2.4.3. Efecto de los parámetros en el proceso.

Las variables físicas y del proceso pueden afectar los resultados obtenidos en la pista, los cuales son mostrados en la Figura 2.13. Para que sea posible predecir los resultados, las relaciones entre estas variables y los resultados de la pista deben ser conocidas y resolverse simultáneamente, pero hasta el momento no hay soluciones exactas disponibles.

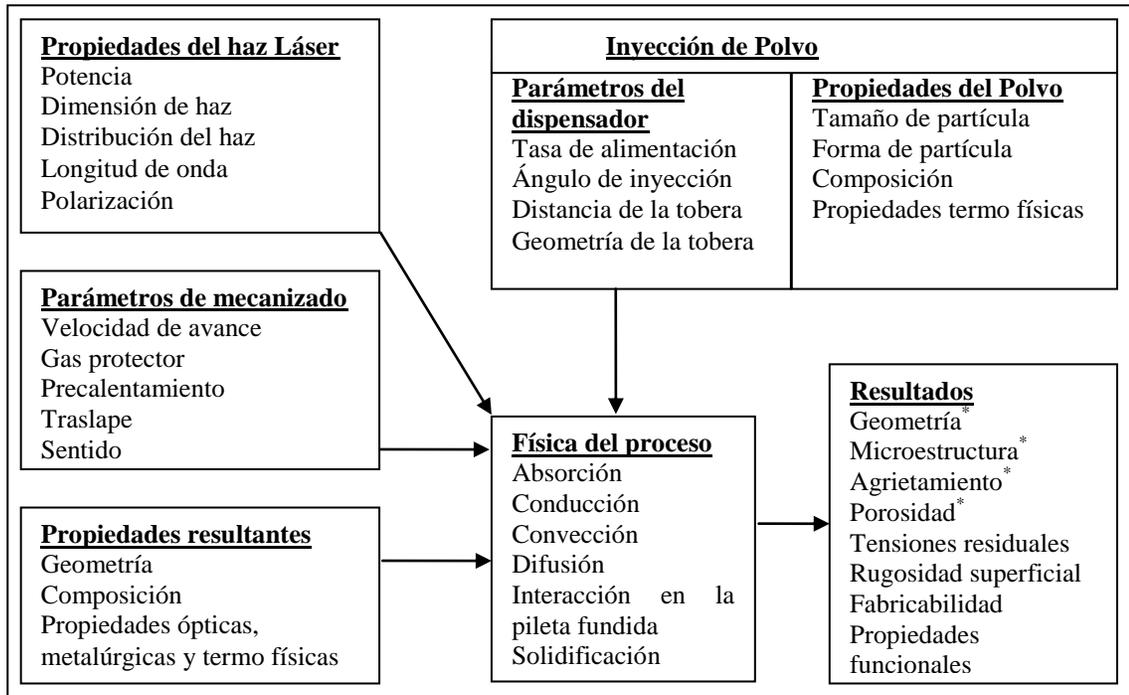


Figura 2.13: Diagrama parámetros y variables del proceso (Schneider, 1998).
 *Resultados medibles.

Mediante la variación de los parámetros involucrados en el proceso y el registro de sus resultados, Schneider ha confeccionado la Tabla 2.3, la cual muestra cualitativamente como se ven influenciadas las características de la pista por los parámetros del proceso.

Tabla 2.3: Efectos reportados entre parámetros operativos y propiedades de la pista. (Schneider, 1998)

Propiedades Parámetros	Alto de pista	Profundidad Fundida	Dilución Geométrica	Dureza	Espesor máximo pista
Potencia láser	-	+	+	-	+
Velocidad avance	+	-	-	+	-
Flujo material	+	-	-	+	+
Diámetro Focal	+	.	-	+	-

2.5. Interacción entre los materiales.

El proceso de recubrimiento láser es usado para mejorar las propiedades superficiales de piezas mecánicas. En la actualidad, existe una gran variedad de polvos metálicos y cerámicos disponibles comercialmente, los cuales fueron desarrollados para ser usados en rociado térmico con llama y plasma, pero también sirven como material de aporte en recubrimientos láser, ya que las propiedades requeridas en la superficie luego del tratamiento son esencialmente las mismas, variando en el tipo de energía utilizada para su depositación.

Un aspecto fundamental en los recubrimientos con láser es lograr una unión metalúrgica fuerte, mediante fusión de los dos materiales, lo cual se dificulta en algunas combinaciones debido a la poca solubilidad entre el sustrato y el material de aporte, tal es el caso de materiales cerámicos en metales (Schneider, 1998). Las posibles soluciones a esta dificultad consisten en realizar recubrimientos del tipo Sándwich, precalentar o usar otro material intermedio que sea soluble en ambos materiales.

El requisito básico para una buena unión metalúrgica por fusión es que los 2 materiales sean solubles entre sí, para lo cual es importante conocer el diagrama de fases

de los materiales y ver los compuestos que se forman a distintas concentraciones y temperaturas. En general para las aleaciones la solubilidad no es un problema, pero en el caso de materiales puros pueden existir dificultades para lograr una buena unión. En dicho caso se utiliza un material intermedio tal como en el caso del aluminio y cobalto entre los cuales es necesario aplicar algún compuesto inter metálico para lograr una buena unión.

En ciertos casos conviene aplicar múltiples capas para reducir el impacto térmico o para lograr una capa con un gradiente de composición del material y baja dilución (Schneider, 1998).

La convección es el factor más importante que influencia la geometría de la pileta fundida y las ondas en la superficie, además es el principal mecanismo responsable de la mezcla entre el material de aporte y el sustrato.

Dentro del material fundido se producen flujos de material con características gobernadas por los gradientes de tensión superficial conocidos como convección o flujo de Marangoni, los cuales imponen una condición de borde de esfuerzo de corte en el flujo fundido. Este gradiente depende del coeficiente de tensión superficial el cual es función de la temperatura. Un coeficiente negativo para la tensión superficial es el caso más común, lo cual resulta en una baja tensión superficial en la zona media de la pileta fundida y una gran tensión hacia la interfaz sólido-líquido. Esta diferencia de tensiones crea corrientes que desplazan material hacia los costados de la zona fundida (Figura 2.14 a).

Debido a la existencia de puntos de estancamiento en la interfaz sólido-líquido, combinado con la conservación de masa, se generan vórtices dentro de la pileta fundida, en los cuales el material fundido fluye hacia abajo a través de la interfaz sólido-líquido, (la posibilidad de fluir hacia arriba está limitada por la tensión superficial). Luego el flujo llega al centro, en la región más profunda de la pileta y sube nuevamente.

Este mecanismo puede ser uno de los orígenes de la forma de bala, típica de la pileta fundida (Dowden, 2009).

Bajo ciertas circunstancias, como en el caso de adición de elementos en la superficie tales como azufre u oxígeno, el coeficiente de temperatura de la tensión superficial es positivo, el flujo se dirige en el sentido opuesto al señalado anteriormente, el flujo baja en el centro de la pileta, y sube por la interfaz sólido-líquido, obteniendo una zona fundida de mayor profundidad tal como se aprecia en la Figura 2.14 b. Como acotación final, es posible obtener en una misma zona fundida, combinaciones de ambos flujos.

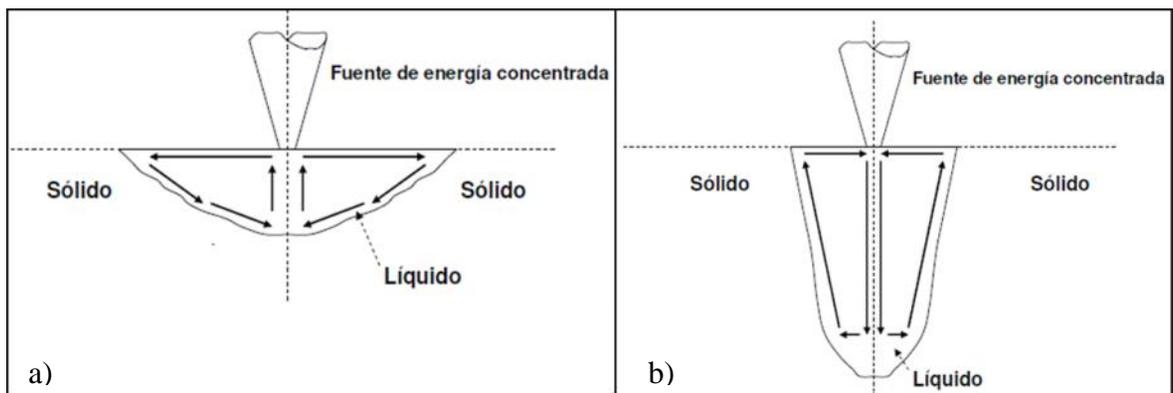


Figura 2.14: Convección de Marangoni a) con componente negativo, b) con componente positivo (Dowden, 2009).

La microestructura y la composición química de la pista dependen fuertemente del grado de mezcla y las tasas de enfriamiento durante la solidificación y el enfriamiento posterior, los parámetros que controlan estos mecanismos son importantes en el proceso y son característicos para cada material (Komvopoulos, 1990).

El punto de fusión del sustrato es preferible que sea menor al del material de aporte, de lo contrario es posible que durante la solidificación y el posterior enfriamiento

de la pista, la región bajo la pista pueda calentarse sobre la temperatura de fusión, perdiendo parte de la dureza y resistencia.

La formación de grietas en la pista fundida, es causada principalmente por los esfuerzos térmicos inducidos por el gradiente de temperatura durante el enfriamiento y la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica. Especialmente las capas creadas con materiales duros y frágiles tales como carburos o cerámicas, son propensas al agrietamiento, lo cual es factible de reducir precalentando el material base logrando así tasas de enfriamiento menor. (Schneider, 1998).

2.6. Descripción del modelo de Rosenthal y su aplicación en el tratamiento de superficie.

D. Rosenthal (1946) en su publicación “*Theory of moving sources of heat and its application to metal treatments*” propuso una teoría para una fuente puntual de calor, moviéndose a velocidad constante sobre una placa semi-infinita, en un proceso quasi-estacionario, el cual es aplicable al fenómeno de transferencia de calor producido al irradiar con láser una placa a velocidad constante (Figura 2.15).

En su solución para obtener el campo de temperaturas de una fuente puntual de calor, moviéndose a velocidad v en un material, Rosenthal consideraban una placa plana semi-infinita y valores constantes de la conductividad y difusividad térmica, pero en la práctica estos valores dependen fuertemente de la temperatura, lo cual no se considera en esta solución.

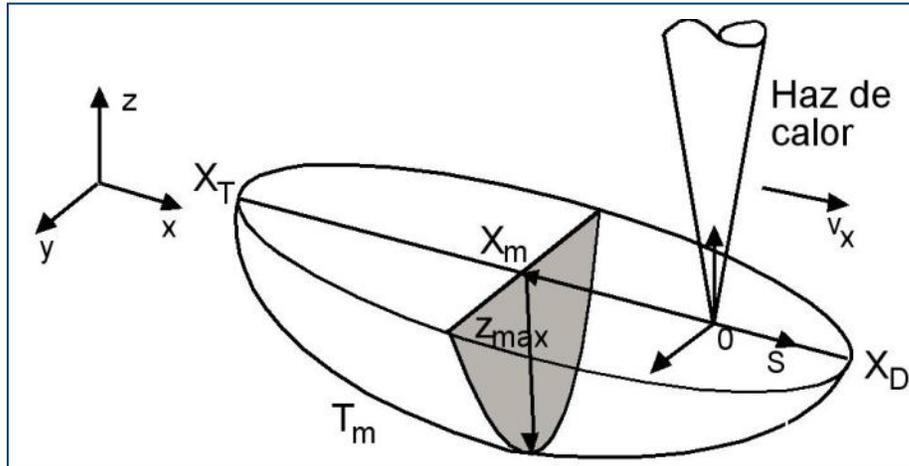


Figura 2.15: Isoterma de fusión, según modelo de Rosenthal (Ramos-Grez J. A., 2008)

La solución particular a la ecuación de Rosenthal considerando un estado estacionario, un marco de referencia móvil y sin flujo de calor en las caras de la placa, se puede escribir como:

$$\Delta T(x, z) = \frac{P_{Laser} \cdot \eta}{2\pi k} \frac{e^{-\frac{v_x}{2\alpha} x + \frac{x^2+z^2}{2\alpha}}}{x^2 + z^2}$$

En el modelo de Rosenthal, para un valor ΔT correspondiente a la temperatura de fusión del material, el valor de z corresponde al valor en el cual la profundidad de la zona fundida es máxima ($Z_{m\acute{a}x}$) y el valor de x , a la distancia entre la fuente puntual de calor y la zona donde se ubica $Z_{m\acute{a}x}$, dicho valor es conocido como $X_{m\acute{a}x}$. Para velocidades bajas (en este caso $v_x=0,002$ m/s) $X_{m\acute{a}x}$ es cercano a 0 y la ecuación puede reescribirse despejando $Z_{m\acute{a}x}$, el cual es directamente proporcional a la potencia aplicada. Dicha constante de proporcionalidad depende de la eficiencia de acople, conductividad térmica, difusividad térmica y velocidad relativa entre el haz láser y la placa.

$$Z_{M\acute{a}x} \sim P_{Laser} \cdot Cte$$

Para observar la linealidad entre la profundidad de fusión y la potencia a bajas velocidades, se adjunta el gráfico de la Figura 2.16 el cual se obtuvo a partir de la ecuación de Rosenthal considerando una eficiencia de acople de 20% y propiedades térmicas del acero SAE1020.

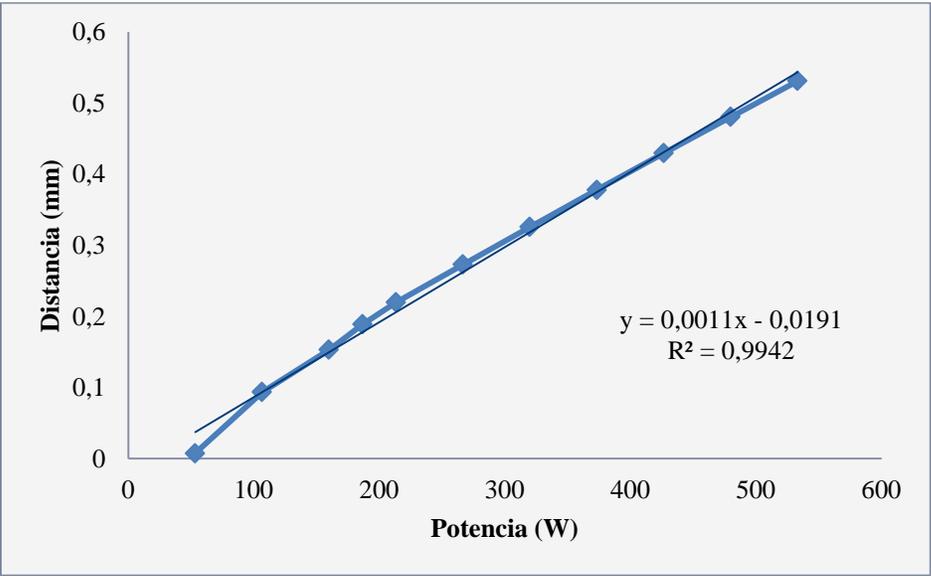


Figura 2.16: Gráfico Z máximo según modelo Rosenthal en función de la potencia.

3. Desarrollo Experimental

3.1. Mantenimiento e implementación del laboratorio de láser de Potencia.

Para lograr los objetivos planteados, fue necesario preparar el laboratorio para poder estudiar la tecnología de recubrimiento láser, caracterizar los materiales a utilizar y establecer un procedimiento para la generación de muestras.

Para llevar a cabo la investigación, se fabricaron y modificaron los dispositivos necesarios para realizar los recubrimientos con láser y polvo metálico, además de una mantención a los equipos existentes, los cuales se detallan a continuación:

3.1.1. Equipo láser:

El proceso de recubrimiento fue realizado mediante un láser de CO₂ Oerlikon OPL3500 de 3,5 kW. de potencia y longitud de onda de 10.6 micrones y TEM00 disponible en el Laboratorio de Aplicaciones Tecnológicas Industriales láser del departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Para operar este equipo, es necesario tener un sistema de aire comprimido, el cual incluye un compresor de tornillo y un secador de aire, un sistema de circulación y refrigeración de agua tratada, gases Helio, Nitrógeno y CO₂ para el láser y un posicionador cartesiano, los cuales se aprecian en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Vista del laboratorio, a la izquierda gases para el láser, al centro el posicionador cartesiano, extractor, atril, dispensador de polvos y cabezal láser, a la derecha el resonador láser.

Para utilizar correctamente el equipo, fue necesario hacerle una mantención previa, la cual consistió en un aseo general y orden del laboratorio, limpiar todo el sistema de refrigeración por agua del equipo, el cual tenía depósitos minerales en las cañerías de refrigeración de los circuitos electrónicos, por lo cual el equipo no operaba correctamente y se producían fallas durante su funcionamiento producto del aumento de temperatura en los componentes electrónicos, especialmente en los transformadores de alto voltaje, dicha temperatura llegaba a valores cercanos a 50°C , muy por sobre la temperatura de operación de los transformadores de 20°C , Posteriormente se realizó una limpieza de todo el sistema óptico del láser y fue necesario reemplazar ópticas en malas condiciones junto con alinear y modificar parte del cabezal y toberas.

3.1.2. Atril y toberas

Para direccionar el flujo de gas inerte y polvo al material base y haz láser, se fabricaron tres toberas de bronce, con diámetros internos de 1.8, 2 y 2.5 mm. Las cuales se montaron en los brazos de un atril diseñado para soportar el dispensador de polvos y la tobera. Con dicho elemento, es posible regular la posición y orientación de la tobera con respecto al material base y el haz láser. En la parte superior de este atril, se monta el sistema de alimentación de polvos, el cual cuelga mediante resortes para evitar transmitir vibraciones a la estructura. Los planos de fabricación del atril, dispensador de polvos y toberas, se adjuntan en el anexo A.

3.1.3. Modificación de posicionador cartesiano

Debido a problemas de diseño en el posicionador cartesiano, fue necesario modificar parte del mecanismo del eje Y, el cual contaba con una sola guía con rodamientos y el tornillo sin fin impulsor, con lo cual no se lograba un desplazamiento perfectamente plano, ya que, la mesa oscilaba levemente al desplazarse en dicho eje producto del giro del tornillo. Para solucionar este problema, se fabricó una segunda guía, y se reubicó el tornillo sin fin, tal como se aprecia en la Figura 3.2 con lo cual se solucionó el problema de la oscilación. Los planos se encuentran en el anexo A.

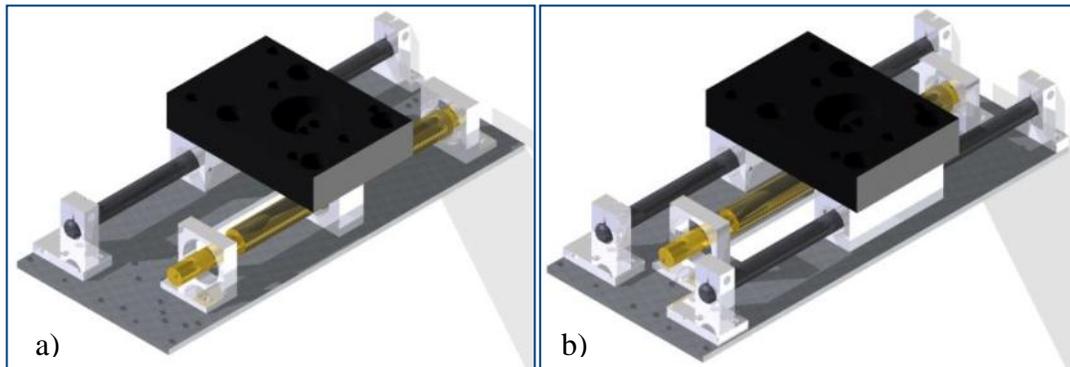


Figura 3.2: a) Posicionador cartesiano Eje y. b) Posicionador cartesiano Eje y mejorado.

3.1.4. Diseño, fabricación y calibración de dispensador de polvos metálicos.

Para controlar la cantidad de polvo aplicada, se fabricó un dispositivo alimentador, basado en el mecanismo del tornillo sin fin. El polvo se sitúa en una pequeña tolva sobre el tornillo sin fin, el cual mueve el polvo desde la primera cámara (a) a la segunda (d), en la cual un flujo de gas inerte lo lleva a través de una manguera hasta las toberas y finalmente hasta el material base, para ser fundido por el haz láser. Este dispositivo cuenta además con otro motor el cual en su eje tiene una masa descontrapesada girando, para hacer vibrar el mecanismo para facilitar el flujo de polvo entre la tolva y el tornillo.

La cantidad de polvo es regulada controlando las revoluciones del motor mediante PWM (Modulación por ancho de pulsos) cuyo ciclo de trabajo se fija a través de un potenciómetro (instalado junto al dispositivo) y un pequeño circuito que controla el motor el cual se detalla en el anexo b.

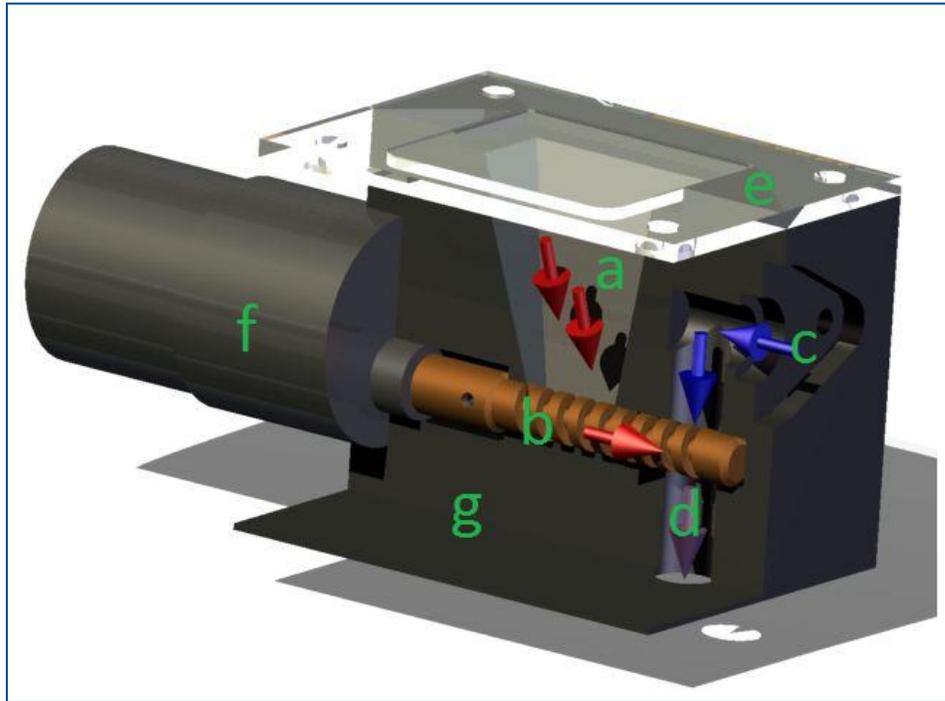


Figura 3.3: Dispensador de polvo, a) tolva de carga de polvo, b) tornillo sin-fin, c) entrada de gas inerte y acople electro-válvula, d) salida hacia la tobera de mezcla gas-polvo, e) tapa de acrílico, f) motor eléctrico, g) bloque mecanizado vista en corte.

Para proceder a la calibración del dispensador de polvo y obtener que cantidad de polvo entrega según las revoluciones del motor, se procedió a realizar mediciones de la masa de polvo entregada en función de las revoluciones del motor, en las cuales el polvo era depositado en un vaso plástico, al cual se le registraba su masa antes y después de aplicado el polvo. Obteniendo así la cantidad de polvo entregada por el dispositivo en un cierto periodo de tiempo en función de la posición del potenciómetro que controla las revoluciones del motor.

3.2. Análisis metalográfico y perfiles de dureza

La preparación de las probetas para el análisis metalográfico consiste en preparar la superficie a observar, de manera de que la luz emitida por el microscopio óptico se refleje pudiendo observar la superficie del metal. Para lograr esto, debemos preparar la probeta siguiendo las siguientes etapas: corte, esmerilado, pulido grueso, pulido fino, pulido final y revelado con ácido lo cual se detalla en el anexo G. En este caso se usó Nital 3 y un reactivo especial para acero inoxidable formado por glicerol y ácidos nítrico, acético y clorhídrico, cuya composición se especifica en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Composición de reactivo para acero inoxidable.

Cantidad	Unidades	Nombre	Fórmula
10	ml	ácido nítrico	HNO ₃
10	ml	ácido acético	CH ₃ -COOH (C ₂ H ₄ O ₂)
15	ml	ácido clorhídrico	HCl
2	gotas	glicerol	C ₃ H ₈ O ₃

Luego de la preparación de la probeta, es posible llevarla al microscopio Óptico para la medición de los parámetros deseados utilizando un software.

Para realizar el perfil de dureza, se utiliza un durómetro marca LECO, el cual posee un indentador con una punta de diamante con forma piramidal, la cual marca el material aplicando sobre él, una carga de 100 gr durante 15 segundos, dejando una marca con forma de rombo, al cual es necesario medir sus dos diagonales las cuales se transforman en la medida de dureza Vickers con la siguiente expresión:

$$HV = \frac{1854 \cdot 0,102 \cdot F \cdot 10^3}{d^2}$$

3.3. Caracterización del polvo y material base.

Para el desarrollo de los experimentos se adquirió polvo metálico de cromo mesh -325 distribuido por la compañía Sigma-Aldrich, el cual entre sus características principales destacan su 99% de pureza y su diámetro medio de partículas de 15 μ m. Se realizó microscopía óptica y electrónica de barrido, para caracterizar el polvo y observar el tamaño y forma de las partículas. Otros detalles respecto al polvo se encuentran en la sección 4.2.

Al material base utilizado, acero SAE 1020, se le realizó un análisis químico con el procedimiento ASTM E 415-08 y análisis metalográfico, el cual consiste en el estudio de la microestructura y medición de dureza, obteniendo los resultados que se presentan en la sección 4.2.

3.4. Diseño de las pruebas de calibración por serie.

3.4.1. Probetas:

Se fabricaron 86 probetas cuadradas de 63x63x10mm en acero SAE1020, el material originalmente venía en una pletina laminada de 63x10x6000, la cual se dimensionó en las medidas requeridas, posteriormente fue rectificada por una de sus caras, y finalmente se les marcó con números bajo relieve del 0 al 83, en las dos orillas inferiores y en el centro, de manera de que luego de cortar las probetas para el análisis, se pudiese reconocer cada parte de placa inmediatamente. Luego para experimentos específicos, se cortó la placa en seis partes, obteniendo placas de 30x20x10 mm en las cuales cabe una pista y son más manejables para el pulido y posterior análisis metalográfico, dichas placas se marcaron con letras correspondiente a cada serie de experimentos y un número identificador en la parte superior e inferior, para poder identificar cada parte de la placa luego del corte y durante el análisis.

3.4.2. Diseño de experimento

Inicialmente se realizaron múltiples experimentos preliminares para calibrar los equipos, dichos experimentos se enumeran y detallan a en el anexo C, pero finalmente solo se detallará la serie J, la cual contiene los resultados más relevantes para este estudio y corresponde a placas de acero recubiertas con polvo de cromo.

Serie J: En esta serie, los experimentos consistieron en fundir una pista en las tres probetas alineadas y a una distancia focal constante, obteniendo una pista en cada una de ellas. Para cada prueba se realizó el tratamiento en tres placas simultáneamente, se varió potencia en tres niveles y flujo de masa a cuatro niveles obteniendo un total de treinta y seis muestras. La primera prueba corresponde a 0% de cromo, la segunda a baja cantidad de cromo, la tercera a cantidad intermedia y la cuarta a una cantidad alta de cromo, las potencias utilizadas fueron de 300, 400 y 500 W, dichas pruebas se resumen en la Tabla 3.2. Es necesario obtener la masa de las placas antes y después del experimento, para poder obtener así, la masa de cromo que se agregó al material base.

Las probetas fueron montadas en el posicionador cartesiano para ser tratadas con el láser, los valores geométricos del montaje experimental se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2: Rangos de potencia y polvo para experimentos de serie J.

Polvo \ Potencia	0[gr/min]	0,05[gr/min]	2,5[gr/min]	5,5[gr/min]
300w	J1, J2, J3	J4,J5,J6	J7, J8,J9	J10,J11,J12
400w	J13,J14,J15	J16,J17,J18	J19,J20,J21	J22,J23,J24
500w	J25,J26,J27	J28,J29,J30	J31,J32,J33	J34,J35,J36

Tabla 3.3: Valores geométricos del montaje experimental

Distancia focal [mm]	131
Diámetro focal[mm]	0,5
Diametro tobera principal [mm]	5
Diametro tobera lateral[mm]	2
Distancia tobera principal [mm]	8
Distancia tobera lateral [mm]	12
Inclinacion tobera lateral [°]	45
Flujo Gas protector [L/min]	10

Antes de realizar cada experimento, es necesario conocer las medidas de seguridad y los riesgos asociados al láser, los cuales se detallan en el anexo F. Además es necesario seguir una serie de procedimientos para preparar el material y los equipos. En cada ensayo se procedió de la siguiente manera:

- Encender el láser, equipos auxiliares y abrir llaves de gases (más detalles de operación en anexo E).
- Revisar cantidad de polvo en el dispensador y rellenar de ser necesario.
- Alinear la tobera con el puntero láser sobre el material base a la distancia focal adecuada.
- Seleccionar la velocidad adecuada en el controlador del posicionador.
- Seleccionar la potencia requerida, cantidad de polvo y gas de protección.

- Para cada pista abrir gas protector, disparar el láser sobre la placa, encender dispensador de polvo y comenzar a mover el posicionador.

Finalmente, se dejan enfriar las placas al aire, para su posterior análisis.

Posterior al tratamiento, las probetas, se cortarán y su sección transversal se preparará metalográficamente, en ella se medirá el ancho de pista, profundidad de pista fundida, profundidad de Martensita, alto del recubrimiento, tamaño de grano entre otras (Figura 3.4). Además se realizará un perfil de dureza en la sección transversal (Figura 3.5). Luego se realizará un perfil de concentración de cromo a lo largo de la sección transversal mediante microscopio electrónico en algunas muestras seleccionada.

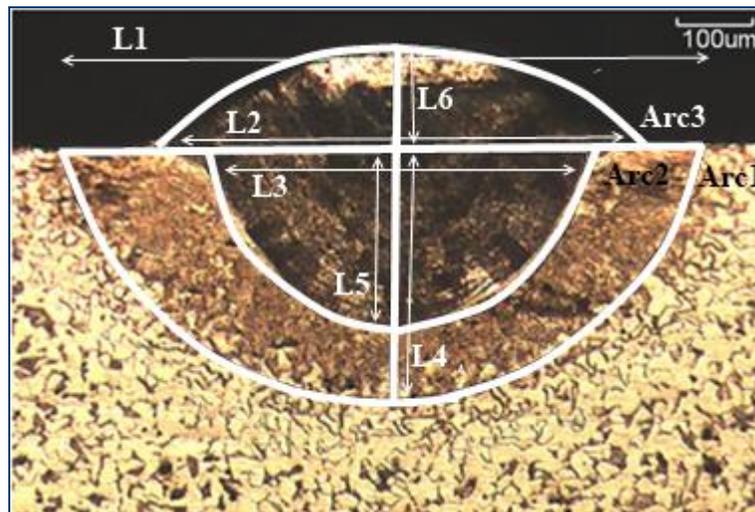


Figura 3.4: Metalografía con medición de dimensiones en la placa J23.

En cada metalografía, usando el software Motic Plus (Motic China group co. LTDA. ©2007) disponible en el laboratorio, se medirá las dimensiones de la zona afectada térmicamente, pileta fundida y pista en la superficie, indicando en cada una de ellas el alto, ancho, arco y ángulo de la semicircunferencia que se puede aproximar en su

contorno. Dichas mediciones en la placa J23 se pueden apreciar en la Figura 3.4 y sus detalles se especifican en la Tabla 3.4.

En cada pista, se realizará un perfil de micro dureza Vickers con una carga de prueba de 100 gramos durante 15 segundos, se obtendrá un valor promedio de la dureza en la zona fundida, el cual se utilizará en los cálculos y gráficos de la sección resultados.

En la

Figura 3.5 se observa un esquema de la sección transversal de una muestra con las indentaciones realizadas.

Tabla 3.4: Detalles de mediciones en metalografías.

Arc1	Radio y ángulo de arco aproximado a la interfaz de inicio de zona afectada térmicamente
Ang1	
Arc2	Radio y ángulo de arco aproximado a la interfaz de zona fundida con material base
Ang2	
Arc3	Radio y ángulo de arco aproximado a la superficie de la pista fundida
Ang3	
L1	Ancho de Zona afectada térmicamente
L2	Ancho de la pista fundida
L3	Ancho de la pileta fundida
L4	Alto de zona afectada térmicamente
L5	Alto de zona fundida
L6	Alto de pileta

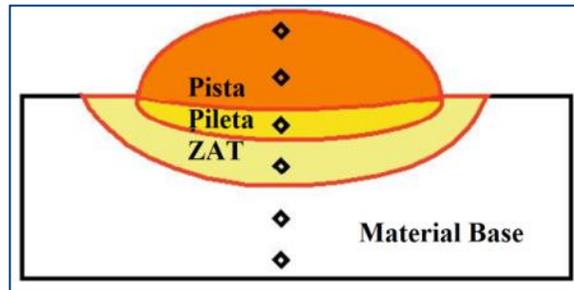


Figura 3.5: Esquema de medición de dureza.

Mediante la ayuda del software Motic Plus, se medirá el tamaño de grano columnar en la interfaz entre la zona fundida y afectada térmicamente, para este procedimiento, se dibujará un arco de círculo, en el cual se contarán los granos que el arco corta, y luego se dividirá la distancia entre el número de granos para obtener un tamaño de grano promedio. Se realizarán 3 mediciones en cada piletta fundida, para obtener un promedio más representativo del tamaño de grano, para estudiar su efecto sobre la dureza y poder analizar su tamaño en función de la potencia y cantidad de polvo aplicada.

Finalmente se realizará un análisis cualitativo, para encontrar la pista con mejores propiedades visibles y analizarla en mayor detalle, y posteriormente utilizar los mismos parámetros en la realización de una superficie tratada mediante pistas traslapadas, a la cual se le medirá dureza en su sección transversal y en la superficie tratada para observar el efecto térmico producido por la fusión pista adyacente. Adicionalmente se estudiará metalográficamente para observar la microestructura resultante, en especial el traslape entre las pistas, el tamaño de grano, presencia de porosidades y grietas.

4. Resultados y Análisis

En esta sección se presentan los resultados más importantes obtenidos en este estudio, el resto de los resultados considerados menos relevantes se adjuntan en el anexo D.

4.1. Resultados de calibración del dispensador de polvos.

A partir de las mediciones de masa de polvo por minuto para cada posición de la resistencia variable del circuito, se creó un gráfico con los datos obtenidos (Figura 4.1), en el cual se observa que para las primeras tres posiciones, la cantidad de polvo no varía significativamente, y corresponde al polvo que pasa entre el tornillo y el bloque, producto de la vibración del dispensador, luego desde la posición tres hacia adelante se aprecia el aporte del tornillo en el dispensador, aumentando la cantidad de polvo casi linealmente.

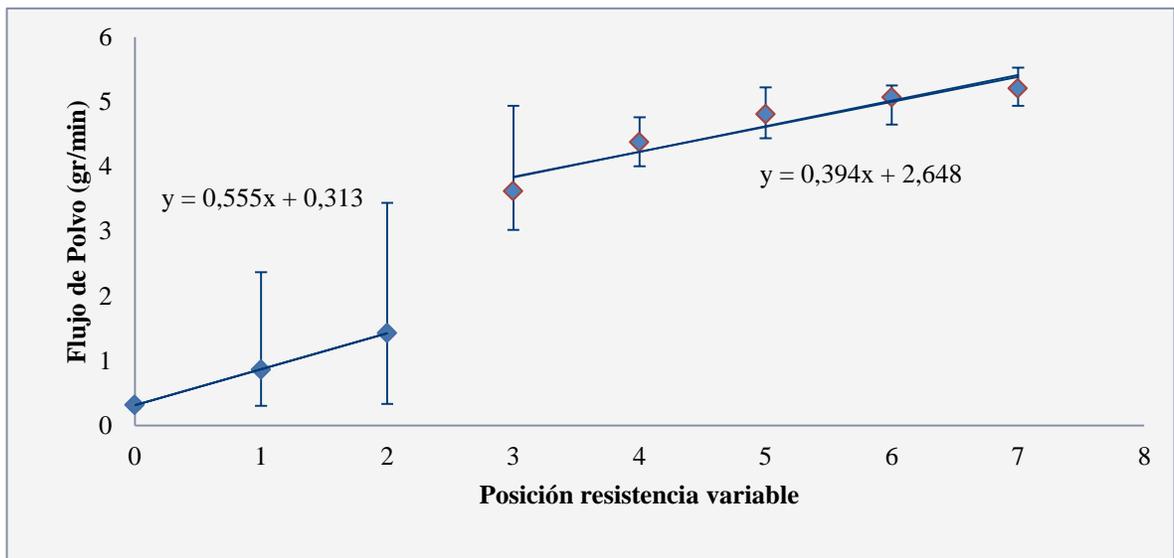


Figura 4.1: Gráfico Cantidad de polvo en función de la Posición de la resistencia variable.

4.2. Caracterización del polvo y material base.

Para el recubrimiento se utilizó cromo-325 mesh en polvo, de la empresa Sigma-Aldrich. Sus características se entregan en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Características de polvo de cromo-325 mesh

Peso molecular (gr/mol)	52
Tamaño de partícula promedio (μm)	3,7 (máx. 45)
Pureza	99%
Impurezas	Fe (413,7 PPM), Ni (10,3 PPM), Na (10 PPM), Sb (5,8 PPM)

Para determinar el tamaño y forma de las partículas, se observó el polvo con microscopía electrónica de barrido (Figura 4.2a y b) y óptica (Figura 4.2c y d).

Analizando las imágenes de microscopía, se observa la forma irregular de las partículas, en especial la superficie de ellas (Figura 4.2c), las cuales probablemente fueron fabricadas mediante reducción (molido o limado de cromo sólido), luego harneado en mallas mesh-325, la cual deja pasar un tamaño de partícula máximo de 45 μm . Analizando la imagen (Figura 4.2b y d), se observa una gran cantidad de partículas pequeñas cercanas a 5 μm , lo cual concuerda con el tamaño promedio de partícula indicado en la Tabla 4.1

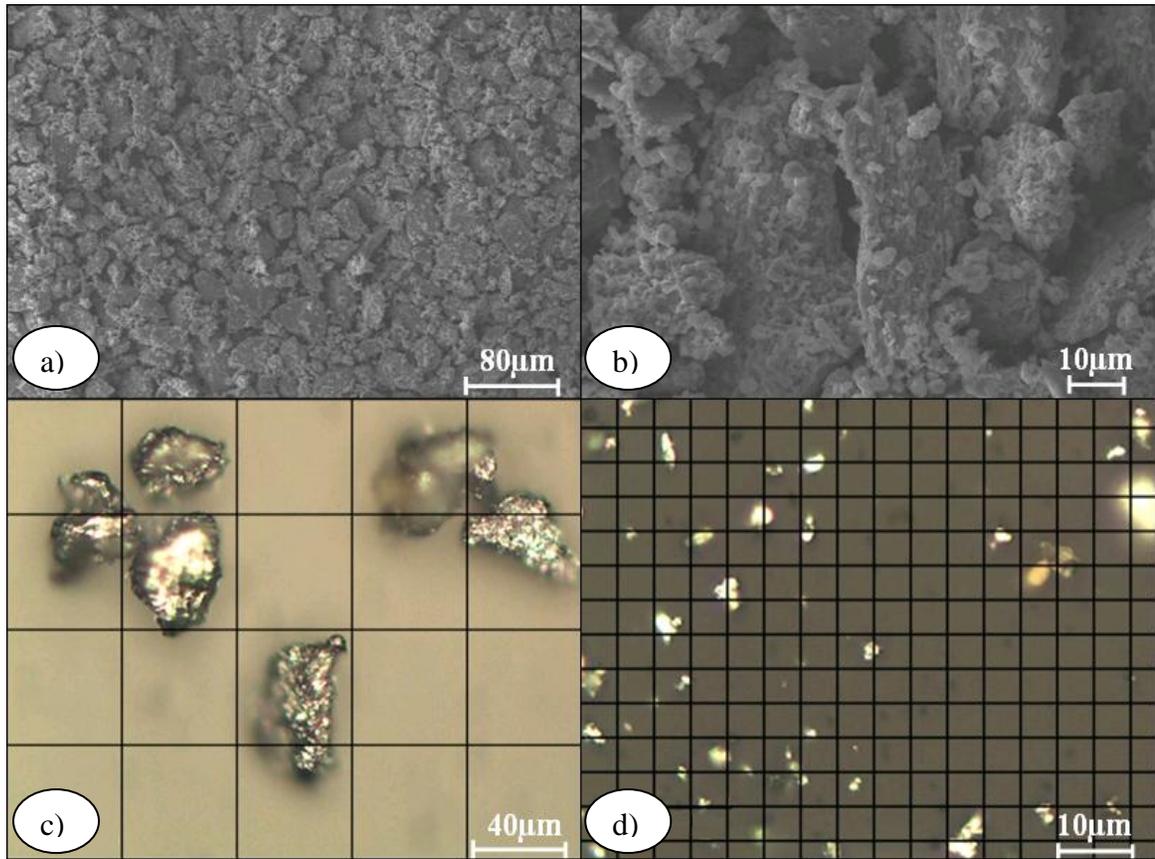


Figura 4.2: Imágenes polvo de cromo a) SEM 500x, b) SEM 2500x, c) óptico 200x d) óptico 500x

Al material base comprado como acero SAE1020, se le realizó un análisis químico, mediante un espectrómetro de emisión óptica en el área de servicios mecánicos de la división de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica de Dictuc, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 4.2 junto con los rangos aceptados para cada componente (Meyrick & Wagoner, 2001)

Tabla 4.2: Resultado análisis del material base.

Elemento	% en peso Muestra	% en peso SAE1020
C	0,18	0,18-0,23
Si	0,17	-
Mn	0,52	0,3-0,6
P	0,013	0,04 máx.
S	0,026	0,05 máx.

Adicionalmente se realizaron metalografías para observar su microestructura y obtener tamaño de grano mediante el método de intercepción, se contaron en promedio 50 bordes de grano en 2 líneas horizontales y verticales de 1 mm de longitud, obteniéndose un tamaño de grano ASTM 8, con área y diámetro promedio de $504 \mu\text{m}^2$ y $22,5 \mu\text{m}$ respectivamente.

Se observa que la Perlita ocupa aproximadamente un 20% de la zona analizada en la metalografía (Figura 4.3a) y se encuentra disuelta en una matriz ferrítica. En la Figura 4.3b se observa en color oscuro la perlita, la cual está formada por láminas de Ferrita y Cementita, esta última estructura hierro-carbono posee un 0,8% de carbono, obteniendo un acero de aproximadamente 0,16% de carbono.

Finalmente, se midió micro dureza del material base, encontrando una dureza promedio de 158,6 Vickers, con una carga de prueba de 100 gr durante 15 segundos.

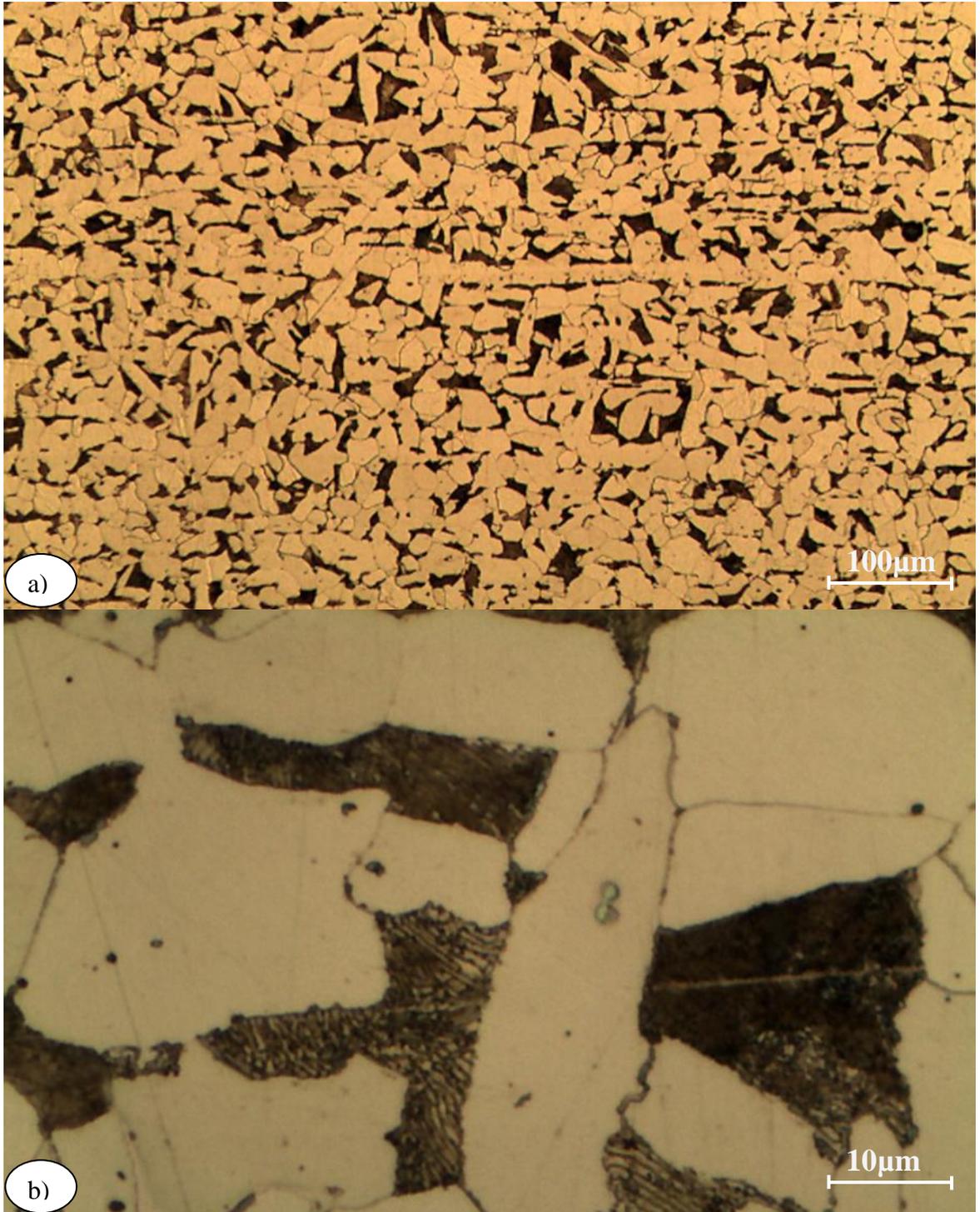


Figura 4.3: a) material base 200x, b) material base 1000x.

4.3. Resultados de pruebas en placas.

Debido a la gran cantidad de resultados obtenidos en las placas y metalografías se mostrarán en detalle algunos de ellos.

4.3.1. Serie J:

Manteniendo la distancia focal fija, con potencias menores entre 300 y 500 W y 4 niveles de polvo entre 0 y 5,5 gr/min se realizaron un total de treinta y seis experimentos, los detalles de las pruebas, parámetros de operación y valores obtenidos se señalan en la Tabla del anexo H.

En los siguientes párrafos se detallan ciertas relaciones interesantes entre valores geométricos de la pileta fundida, cantidad de polvo del recubrimiento y la potencia aplicada durante el proceso.

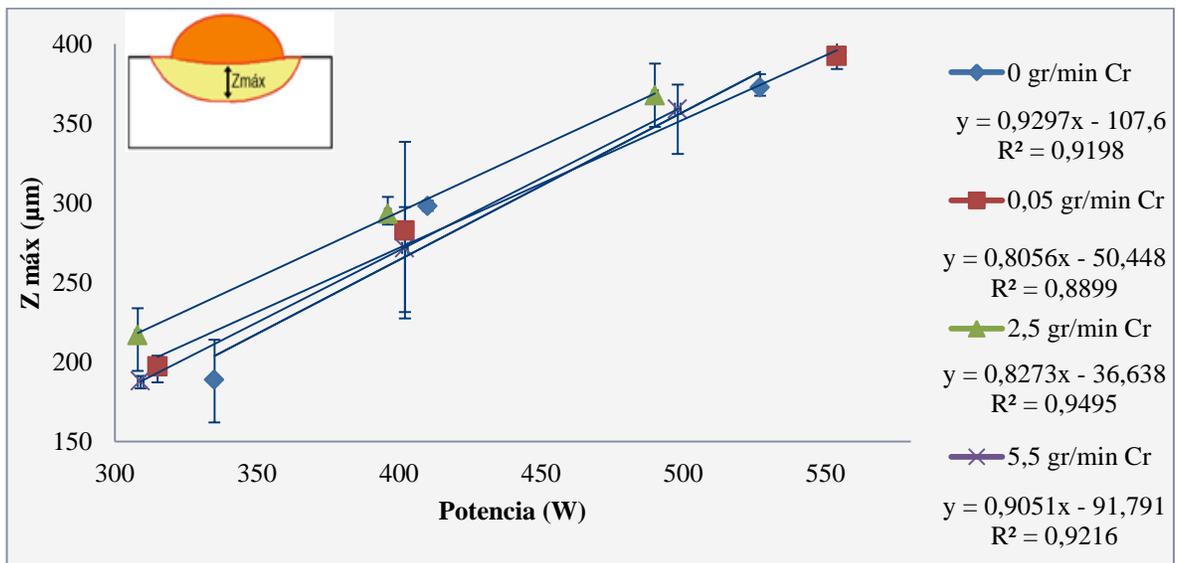


Figura 4.4: Gráfico Profundidad zona fundida en función de potencia, según cantidad de polvo.

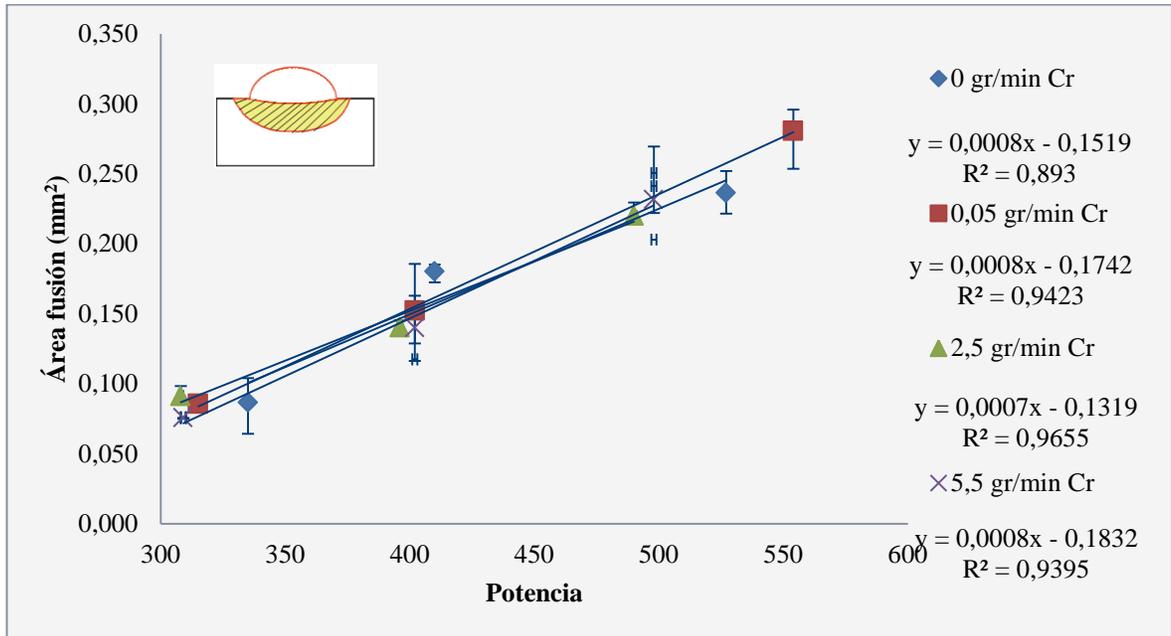


Figura 4.5: Gráfico área de fusión en función de potencia según cantidad de polvo.

En el gráfico de la Figura 4.4, se observa que al aplicar mayor potencia, se obtiene una mayor profundidad de fusión con una relación lineal con un ajuste cercano al 90%. Dicho resultado es bastante intuitivo y confirma la linealidad predicha por el modelo de Rosenthal entre potencia y profundidad (Figura 2.16). Al aplicar mayor energía al material, la zona fundida tendrá mayor tamaño, debido al calor que fluirá con un gradiente de temperatura radial desde el centro de la pileta fundida hacia el material base, calentando una mayor parte de este, obteniendo la misma tendencia con respecto al ancho y área de la zona fundida (Figura 4.5) por los argumentos detallados anteriormente. Finalmente es posible afirmar que la cantidad de polvo aplicada, no influye mayormente en la profundidad de la pileta fundida.

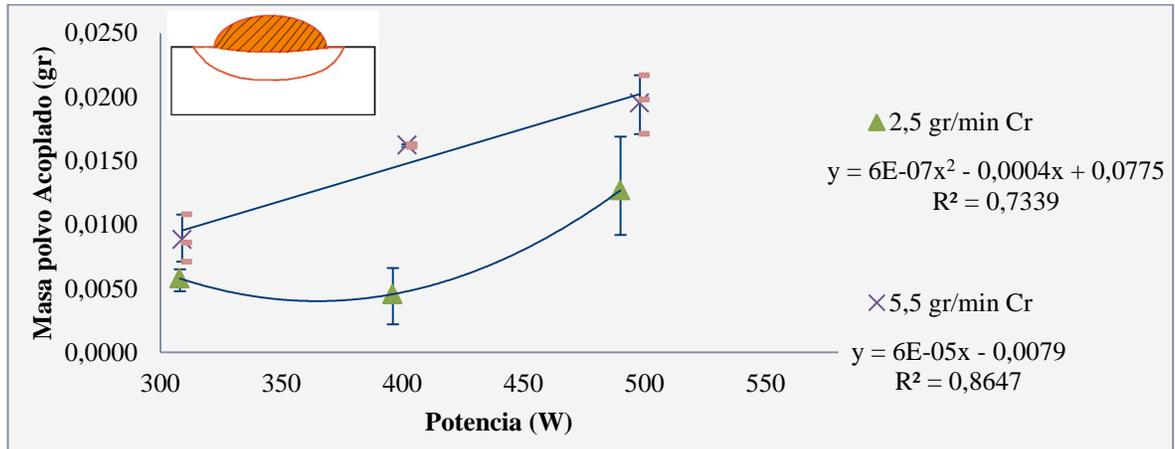


Figura 4.6: Gráfico masa de polvo acoplado en función de la potencia, según cantidad de polvo

A partir del gráfico de la Figura 4.6 se observa que a mayor potencia, es mayor la cantidad de masa de polvo acoplada sobre el material base, esto se debe a la mayor cantidad de energía aportada, la cual es necesaria para fundir una mayor cantidad de polvo junto con el material base para lograr su unión metalúrgica y posterior mezcla. Se observa que al agregar mayor cantidad de polvo, el comportamiento de la masa de polvo acoplada en la superficie se correlaciona linealmente con la potencia, este comportamiento podría explicarse por la mayor cantidad de material particulado en la superficie el cual dispersa la energía del láser por reflexión y radiación. No obstante como consecuencia del aumento de la masa acoplada al material base, aumenta la altura y el área total. No se agrega el caso con 0,05 gr/min por presentar vaporización del material base en varias de las pruebas.

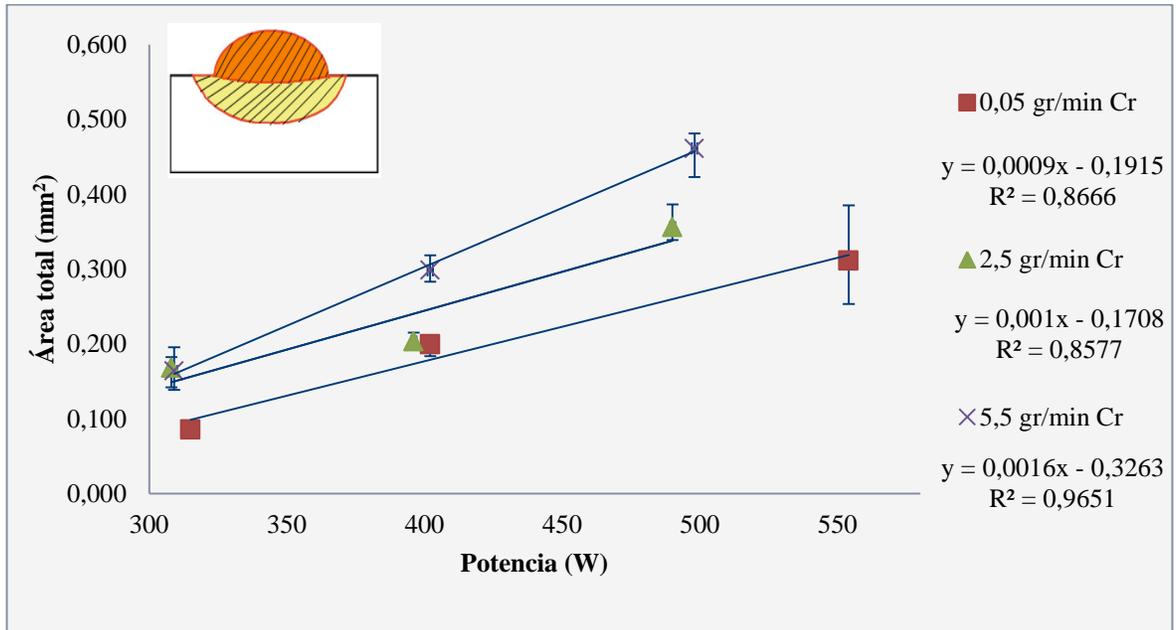


Figura 4.7: Gráfico área total en función de potencia según polvo

En el gráfico de la Figura 4.7 se observa claramente, que a mayor potencia, son mayores las dimensiones geométricas obtenidas, al graficar el área total, la cual incluye la pista solidificada con el material de aporte, en función de la potencia. Existe linealidad entre área total y potencia al igual que en el primer caso analizado con respecto a profundidad y potencia. Al aplicar poco polvo predomina el efecto del área de la piletta fundida por sobre el área de la pista superior. En el caso con 5,5 gr/min, se obtiene hasta un 20% más de área en la pista que en la piletta fundida.

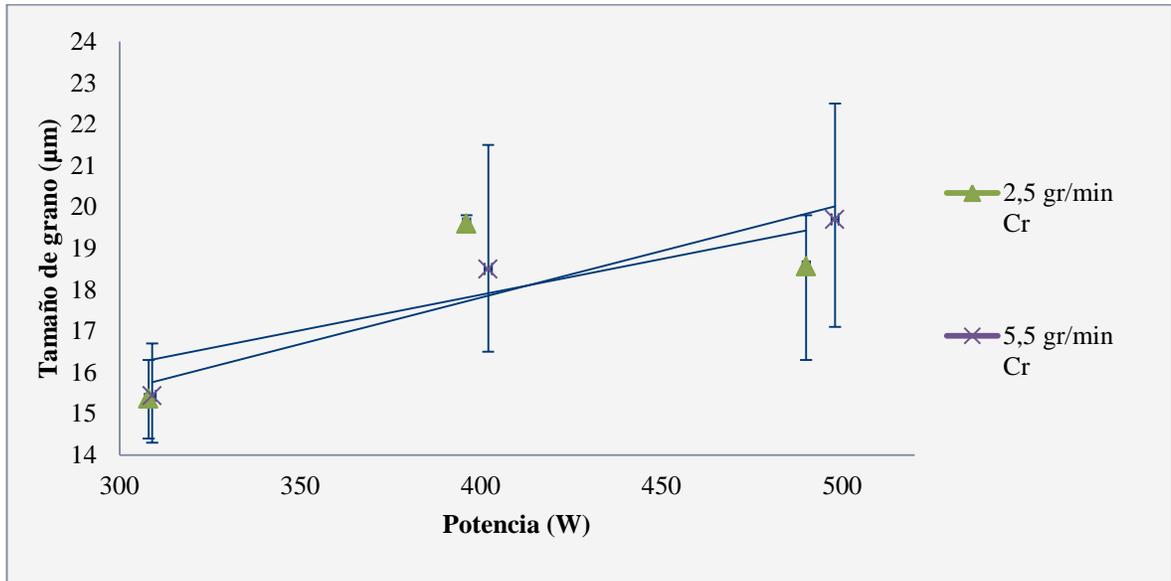


Figura 4.8: Gráfico Tamaño de grano en función de la potencia aplicada

A partir de la medición del tamaño de grano en el borde de la zona fundida, se realizó el gráfico tamaño de grano en función de la potencia en las probetas con polvo (Figura 4.8), en el cual se observa un comportamiento lineal entre dichos parámetros con una clara tendencia a aumentar el tamaño de grano a medida que se aumenta la potencia, atribuible al mayor aporte térmico, aumentando el tiempo de enfriamiento, dando más tiempo para el crecimiento de grano. Es importante mencionar que el tamaño de grano no tiene un efecto relevante en el aumento de la dureza al aumentar la cantidad de polvo de 2,5 a 5,5 gr/min, ya que la medida de sus granos promedio en ambos casos es de 17,8 µm y sus durezas promedio de 275 y 304 Vickers respectivamente.

Con el objetivo de interpretar de mejor manera el comportamiento de la dureza promedio en la zona fundida frente a la variación de parámetros, se graficó su valor frente a algunos parámetros de operación y valores obtenidos para su posterior análisis.

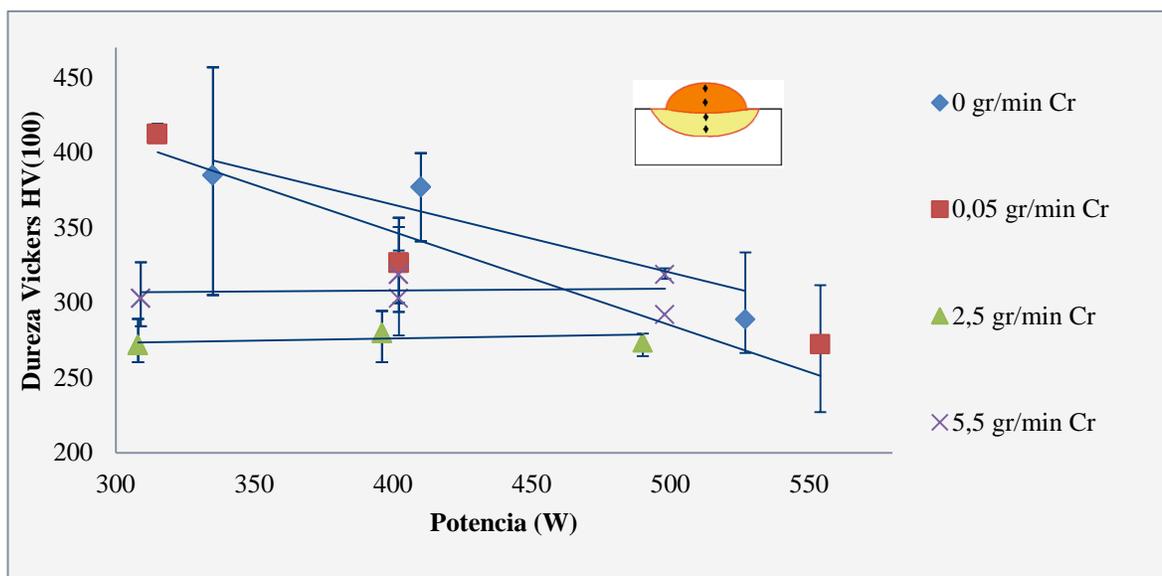


Figura 4.9: Gráfico Dureza Vickers en función de potencia según cantidad de polvo.

A partir del gráfico de la Figura 4.9, se observa que sin material de aporte y con bajo nivel de material de aporte el comportamiento de la dureza en función con la potencia es bastante similar, en ambos casos el valor de la dureza decae desde los 450 a los 250 Vickers, al aumentar la potencia, lo cual es atribuible al mayor tiempo de enfriamiento producto de la mayor cantidad de energía aportada, esto mantiene la zona tratada, durante más tiempo a altas temperaturas lo cual reduce el endurecimiento por temple, aumentando el tamaño de grano (Figura 4.8), permitiendo además la difusión del carbono dentro de la microestructura. En estos dos casos, se observa que la dureza es levemente menor para el caso con muy poco polvo, lo cual es atribuible a la disminución de la martensita producto de que parte del poco carbono presente en el acero es más propenso a reaccionar con el cromo, precipitando pequeños carburos disueltos en la matriz cromo-hierro, los cuales no son capaces de elevar la dureza por efecto de

segundas fases, atribuyendo la dureza principalmente a la Martensita producida por el rápido enfriamiento del material.

Al agregar mayor cantidad de polvo de Cromo, el comportamiento de la dureza varía considerablemente, en el caso de 2,5 gr/min, la dureza decae fuertemente con respecto al caso analizado anteriormente producto de que el carbono presente en el hierro reacciona completamente con el cromo formando el máximo de carburos los cuales están disueltos en la matriz cromo-hierro, disminuyendo la dureza, y comportándose de manera constante con respecto a la potencia obteniendo valores cercanos a 270 HV. Finalmente, el caso con 5,5 gr/min de polvo de cromo, al igual que en el caso de 2,5 la dureza es menor que en los 2 primeros casos, su valor promedio esta por sobre los 270 HV alcanzados por el caso con 2,5 gr/min, igualmente independiente de la potencia y alcanzando un valor promedio de 328 HV. El leve endurecimiento es atribuible a la mayor cantidad de cromo presente en la zona, la cual comienza a tomar las características propias del cromo por solución sólida. Esta observación concuerda con el comportamiento informado por Stone (1979), quien describe un aumento en la dureza al aumentar el contenido de Cr en la aleación Cr-Fe, con valores desde 150 Vickers hasta un máximo de 530 Vickers para un 75% de cromo, sin considerar el efecto del enfriamiento rápido.

4.3.2. Análisis cualitativo.

Para determinar la mejor combinación de parámetros para realizar un análisis en particular sobre una muestra, y posteriormente realizar el recubrimiento de una probeta con pistas traslapadas, se realizó un análisis cualitativo de las micrografías de la zona transversal de las probetas tratadas. En dicho análisis se evaluó con nota de 0 a 10, de peor a mejor, según se detallan en la rúbrica de evaluación de la Tabla 4.3 y se generó un gráfico (Figura 4.10) con los rangos de notas para encontrar alguna tendencia en los parámetros del proceso. Se encontró que la potencia más adecuada estaba en torno a los 400W con rangos de polvo entre 2,5 y 5,5 gr/min, en especial coincidiendo con los

parámetros utilizados en las placas J22, J23 y J24, las cuales presentan las mayores durezas, especialmente la última con 350,5 Vickers. Por los antecedentes mencionados, se eligió la placa J24 para detallar su análisis y realizar el recubrimiento mediante pistas traslapadas con dichos parámetros.

Tabla 4.3: Rúbrica de evaluación de propiedades cualitativas de las muestras

Geometría pileta	Superficie pista	interfaz pista-MB	Adherencia pileta-MB	Simetría	Razón alto-ancho
10=circular 0=deforme	10=uniforme 0=vaporizada	10=pareja 0=dispareja	10=buena 0=mala	10=simétrico 0=no	10=similar 0=diferente

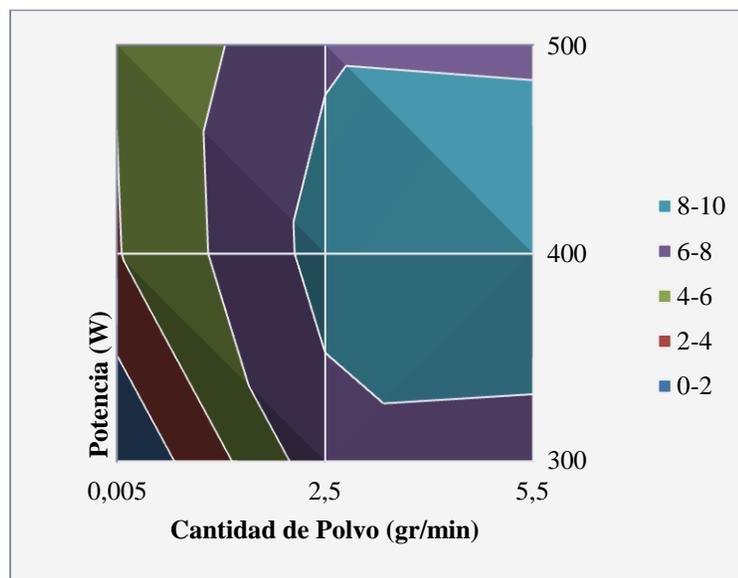


Figura 4.10: Gráfico de superficie con notas en función de polvo y potencia.

4.3.3. Caso particular de análisis: Placa 24

Se eligió para su análisis la placa 24, ya que obtuvo la mejor nota en el análisis cualitativo, fue realizada a una potencia intermedia de 402 W, con la mayor cantidad de polvo, posee buena calidad superficial y en su sección transversal se definen claramente las diferentes capas fundida, afectada térmicamente y material base. Dada la homogeneidad de esta muestra, es la candidata ideal para la prueba de recubrimiento de un área mayor con pistas traslapadas y se profundizará en detalle todo el análisis realizado.

A partir de lo datos obtenidos del EDS (Energy Dispersive Spectrometer) del microscopio electrónico de barrido, se confeccionó un perfil de concentración de cromo en el hierro a lo largo de la sección transversal de la muestra J24, el cual se graficó junto a la imagen indicando la zona de la medición, como se aprecia en la Figura 4.11.

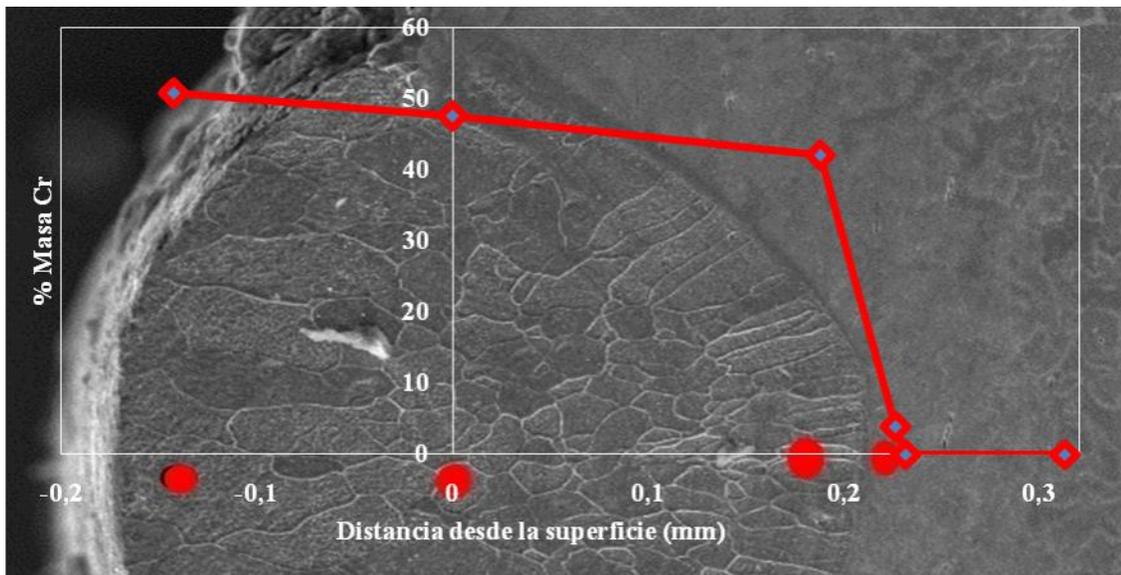


Figura 4.11: Perfil de concentración de Cr en función de la distancia desde la superficie.

Se observa una concentración en función de la profundidad de la placa, el cual decae rápidamente al salir de la zona fundida y entrar al material base, dentro del cual hay una pequeña cantidad de cromo en la zona afectada térmicamente, probablemente debido a la difusión del cromo a alta temperatura. En general dentro de la zona fundida, la concentración de cromo tiene un promedio de 47% con la cual la mezcla cromo hierro cumple una de las condiciones dada por el diagrama de fases de la Figura 2.12, para formar fase σ .

Se realizaron dos mediciones EDS en la parte superior de la pista tal como se aprecia en la Figura 4.12b, una de ellas sobre la “costra” que existe sobre la pista fundida y la otra sobre la pista fundida en una zona que la “costra” había sido retirada mecánicamente, tabulando sus datos en la Tabla 4.4. Al comparar los resultados obtenidos, se encontró una concentración mayor de cromo sobre la costra, atribuible al polvo que no fundió completamente y se adhirió mecánicamente sobre la superficie al solidificar, además de cierta cantidad de hierro, presente en forma de óxidos.

Tabla 4.4: Mediciones EDS en la superficie de la pista.

Elemento	Costra %peso	Sin costra %peso
Cr	91,39	38,55
Mn	4,09	0
Fe	4,52	61,45

Se realizó microscopia electrónica de barrido, como resultado se presentan las imágenes obtenidas en la Figura 4.12 a en la cual se observa la claramente la zona fundida y mezclada con cromo, la cual solidificó, dejando una capa de óxidos en la superficie observable en la Figura 4.12 b, dicha capa se desprende fácilmente en algunas zonas y fue posible realizar mediciones con el EDS en ellas. Adicionalmente en la

Figura 4.12a se observan los granos y su dirección de crecimiento, pero en la Figura 4.12c es más notoria la microestructura, producto de las imágenes a color obtenidas mediante microscopía óptica, en ella se observa claramente que los granos cercanos a la interfaz sólido-líquido son granos columnares y crecen hacia el centro de la zona fundida. En dicha zona es posible observar la solidificación en forma de granos equiaxiales de menor tamaño que los granos columnares. Al observar la microestructura con mayor aumento (Figura 4.12f) es posible observar una fina dispersión de pequeños carburos de cromo en los granos de la zona fundida.

Producto del elevado aporte térmico en la superficie del material, la zona aledaña a la pileta fundida se ve afectada por el calor (Figura 4.12 d), calentándose sobre la temperatura de austenización y luego enfriándose rápidamente obteniendo Martensita en toda la zona afectada térmicamente, la cual está bien definida hacia la zona fundida y disminuye gradualmente hacia el material base, observándose dicho comportamiento en la Figura 4.12e. Adicionalmente en la figura se observa el crecimiento de la perlita en el borde de grano de la martensita producto de la transición entre la zona afectada térmicamente y el material base.

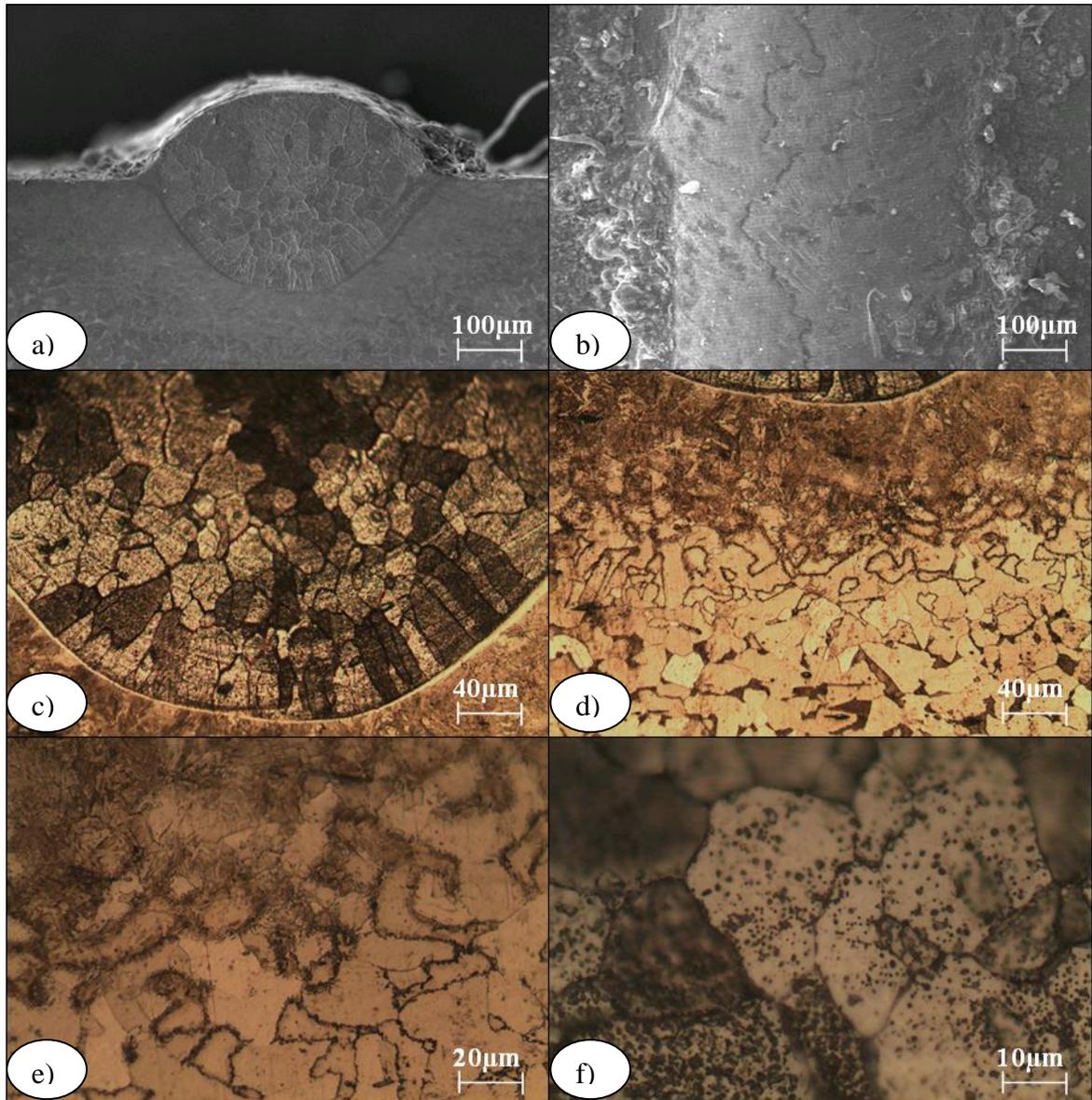


Figura 4.12: Fotografías placa J24 a) microscopio electrónico sección transversal 100x b) microscopio electrónico vista superior 100x c) microscopio óptico sección transversal 250x d) zona afectada térmicamente, descarburizada y material base 250x e) crecimiento de Martensita en los bordes de grano de la perlita en zona afectada térmicamente 500x f) carburos en granos del centro de la pileta fundida 1000x.

Finalmente, se agrega el perfil de dureza realizado a la placa J24, en la Figura 4.13, en el cual se observa que en la zona fundida y afectada térmicamente, la dureza tiene valores similares y cercanos a 350 Vickers y luego decae hasta llegar a los 160 Vickers del material base, obteniendo valores cercanos a los 320 Vickers reportados por Stone (1979) para una aleación Cr-Fe 50%.

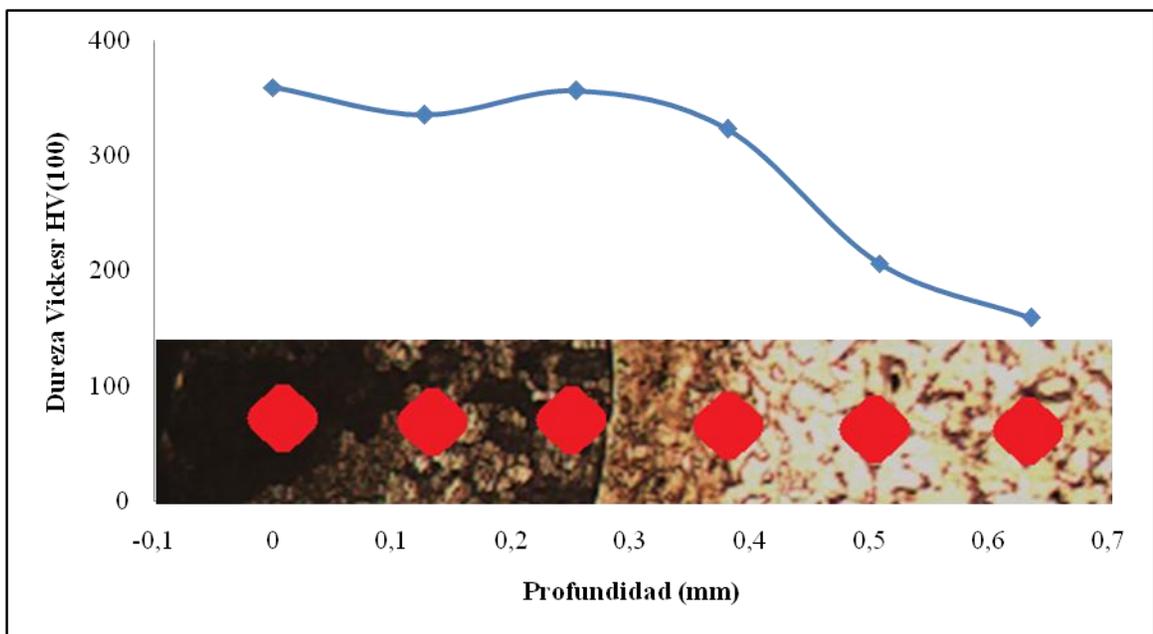


Figura 4.13: Perfil de micro dureza en la sección transversal de la placa J24.

4.4. Barrido sobre una superficie:

Para lograr el recubrimiento sobre una superficie, se realizaron pistas traslapadas en un 30%, con 5,5 gr/min de polvo de cromo y una potencia de 400 W para cubrir un área de 15x20 mm² (Figura 4.14a). Posteriormente se rectificó para obtener una superficie lisa y continua, eliminando las diferencias de altura de las pistas, (Figura 4.14b), luego se cortó y pulió para realizar medición de microdureza en la superficie tratada, logrando un promedio de 270 Vickers con una variación menor a 4% (Figura 4.14e y Figura 4.15). Se realizó ataque químico (reactivo indicado en la Tabla 3.1) sobre la superficie para observar la microestructura en la superficie, encontrándose que en el comienzo de la zona tratada, los granos son pequeños y alargados, en la Figura 4.14c se observa que su largo aumenta a medida que se alejan del punto del inicio logrando una razón largo/ancho de entre 4 y 10 veces y una orientación de aproximadamente 40° con respecto al eje longitudinal producto del avance en la solidificación que sigue la velocidad de avance del láser. Es importante destacar que al solidificar una pista, esta inicia su nucleación siguiendo el patrón de granos de la pista vecina (Figura 4.14d) llegando a formar granos en común en ambas pistas, esto corresponde a crecimiento epitaxial, ya que los nuevos granos solidifican a partir de la superficie sólida, la cual posee una cierta orientación cristalográfica.

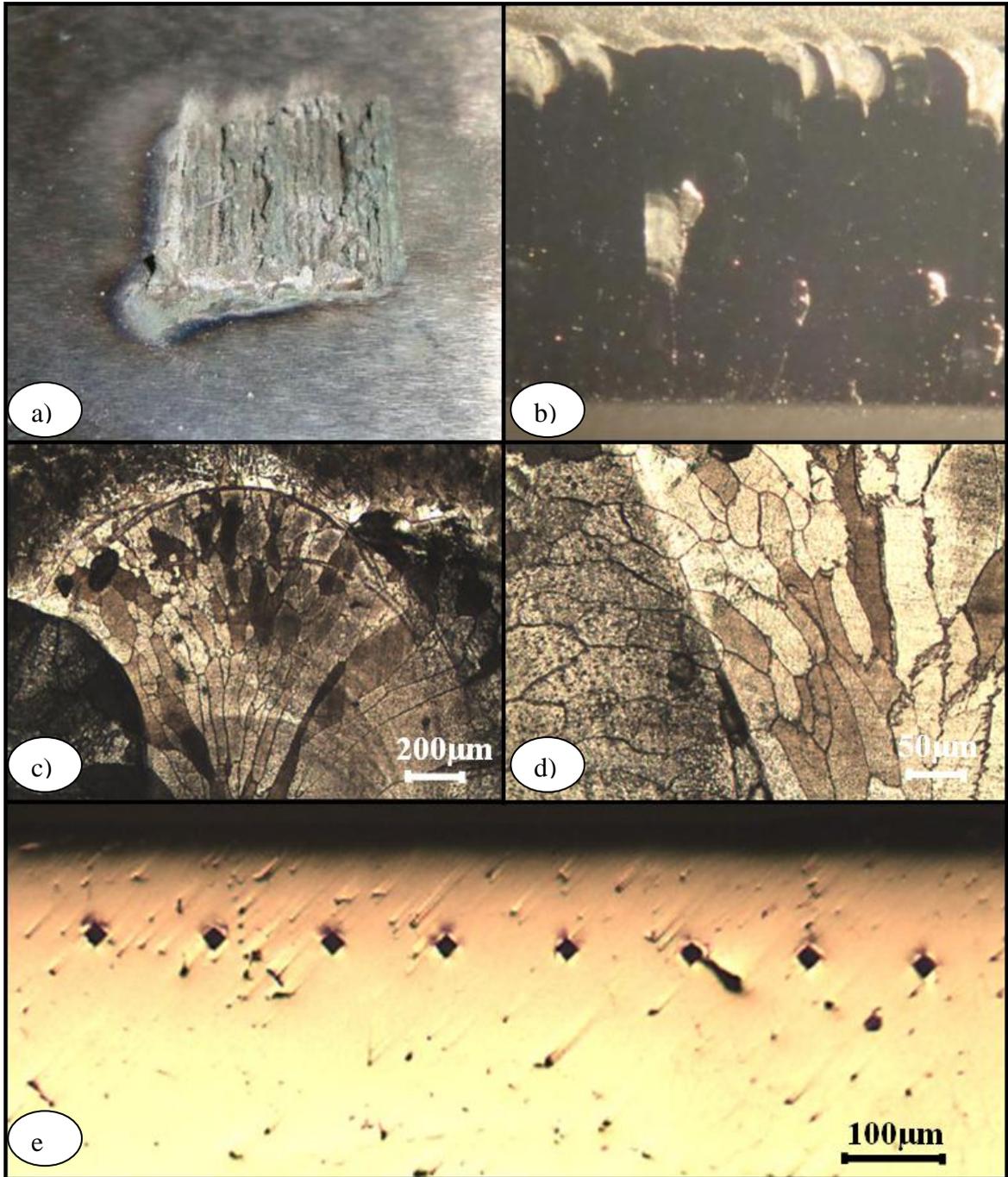


Figura 4.14 Prueba de barrido con láser y polvo de cromo vista desde la superficie a) fotografía superficie recién procesada, b) Fotografía de la superficie rectificada,

c) micrografía inicio de pista de fundida 100x, d) micrografía zona entre dos pistas 500x, e) micrografía medición de dureza 50x.

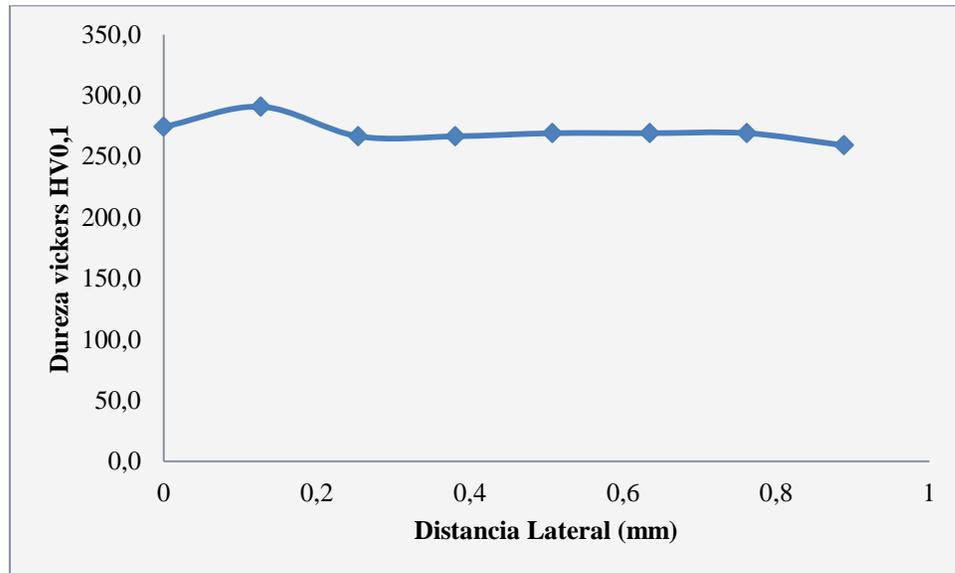


Figura 4.15 Perfil de microdureza en la superficie de la placa.

En la sección transversal de la placa, se realizó ataque químico con Vilella, para observar la presencia de carburos de cromo, los cuales se presentan generalmente en el borde de grano, y en muy baja cantidad (

Figura 4.17). Luego se atacó la superficie con el reactivo para acero inoxidable indicado en la Tabla 3.1, para revelar su microestructura y tamaño de grano, encontrándose que las pistas están perfectamente traslapadas, cubriendo completamente el área superficial, sus granos tienen similar forma y distribución que en las pistas aisladas, con granos alargados en la interfaz sólido-líquido en dirección de extracción del calor hacia el material base, la zona afectada térmicamente, tiene una profundidad constante y presenta el mismo cambio gradual de Martensita a la estructura del material base ferrita-perlita (Figura 4.16:c). Es importante destacar que al solidificar una pista, los granos de la pista antecesora, que están en contacto con la zona fundida, se ven afectados térmicamente,

dicha zona solidifica nuevamente, formando granos continuos entre ambas pistas (Figura 4.16: a y b), dejando solo la huella de fusión de la pista solidificada entre ambas pistas.

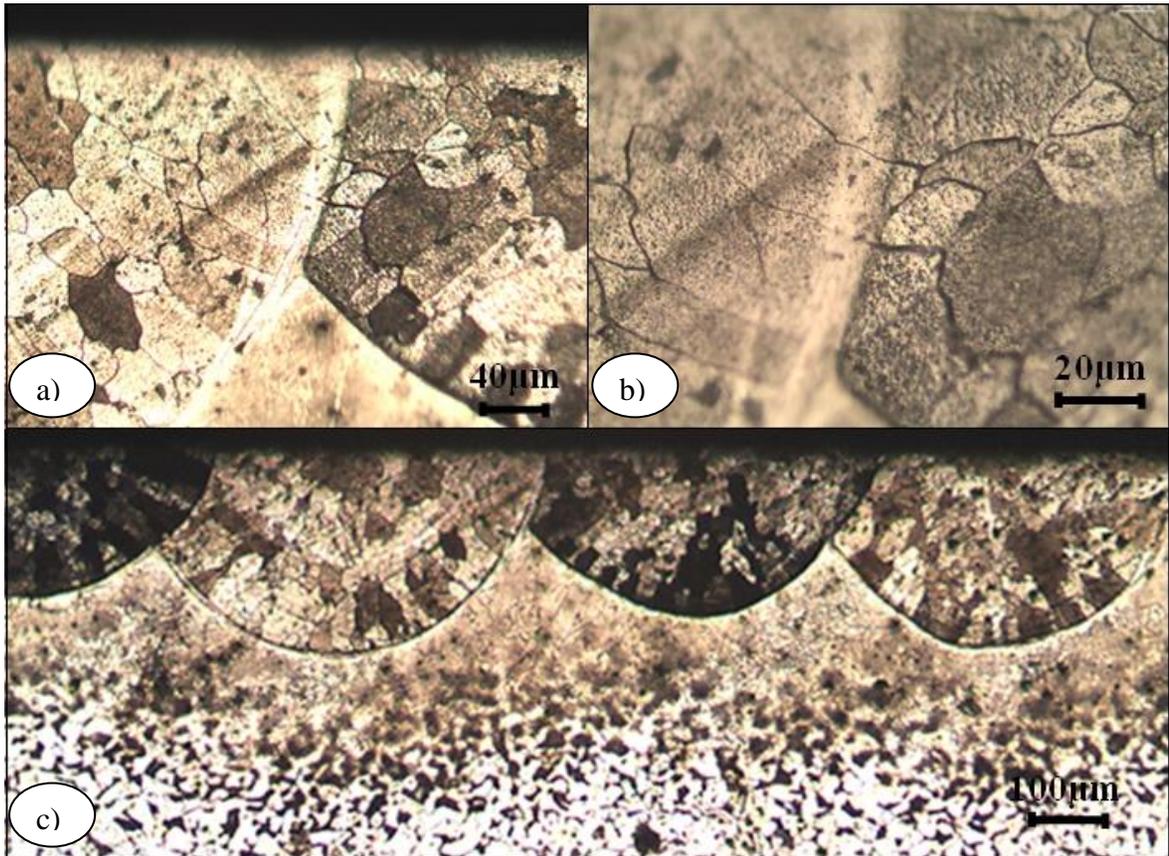


Figura 4.16: Micrografías de prueba de barrido a) 200x, b) 500x, c) 50x.

Se realizaron perfiles de micro dureza a 3 distancias desde la superficie, las cuales se graficaron por separado y escaladas para coincidir con las indentaciones de la micro fotografía, presentándose en la

Figura 4.17. En el primer perfil de dureza a una profundidad de 0,07 mm, se observa poco efecto de recocido por efecto del calor en la pista adyacente, logrando una dureza promedio de 246 Vickers con una variación de 7%. Al realizar el perfil de microdureza a una profundidad de 0,2 mm, existe mayor variación en la dureza, puesto que algunas de

las mediciones coinciden con la zona afectada térmicamente en la cual no hay cromo, presentando solo Martensita, la cual se vio afectada por el efecto del calor de la pista adyacente, logrando un recocido en ella bajando la dureza en esa zona hasta los 210 Vickers, lo cual es un 15% menor que la zona con cromo. En el perfil realizado a 0,33 mm desde la superficie se observa un comportamiento irregular en la dureza, puesto que algunas zonas fueron más afectadas por el calor debido a su cercanía con la pista fundida, en cambio en otras zonas, la medición se realiza en la zona de transición al material base, obteniendo durezas muy bajas.

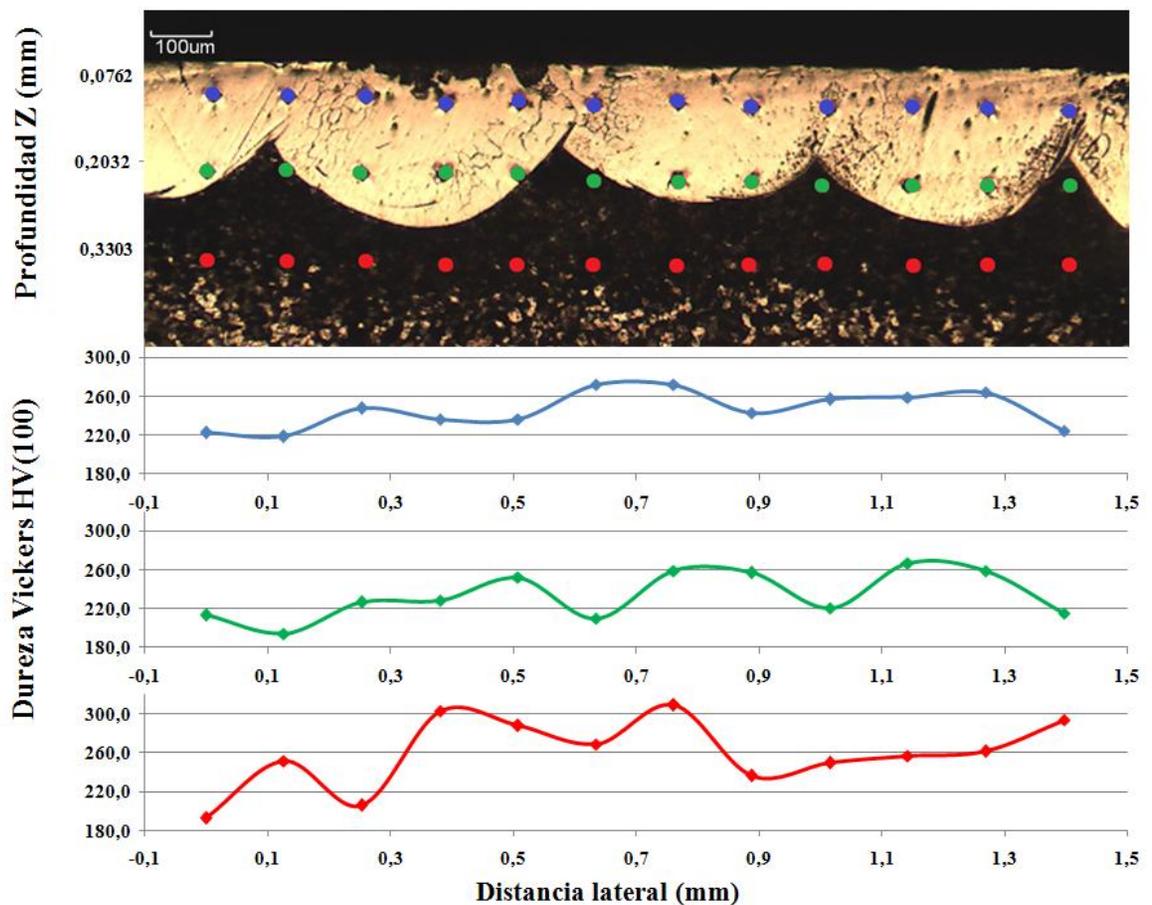


Figura 4.17 Sección transversal de la placa con ataque químico, marcas de indentaciones Vickers y gráficos de dureza a lo largo de la zona transversal según profundidad.

5. Conclusiones

Se logró la puesta a punto de las instalaciones. Además con la mantención al equipo láser se logró mejorar su desempeño, con la modificación del posicionador cartesiano se corrigió un defecto en la investigación anterior y finalmente con el diseño y construcción del dispensador de polvos se abren las puertas a nuevas investigaciones con una gran variedad de materiales.

Con respecto al proceso, se puede afirmar que es posible endurecer un acero de bajo contenido de carbono (0,2%) mediante fusión con láser y solidificación mediante un rápido enfriamiento por conducción del calor hacia el material, logrando aumentar la dureza del material base desde los 158 Vickers en su estado inicial hasta un máximo de 450 Vickers, obteniendo una disminución de esta al aumentar la potencia del haz láser.

Es posible aplicar un flujo constante de polvo de cromo y fundirlo con el láser junto al material base, logrando durezas entre 250 y 420 Vickers obteniendo distintos comportamientos al variar la potencia y la cantidad de polvo. Dichos valores son similares a los reportados por Stone (1979) para aleaciones Cr-Fe. No obstante al aplicar polvo de cromo se logran menores durezas, la distinta naturaleza del recubrimiento provee otras características a la superficie tales como resistencia a la corrosión o desgaste no estudiadas en esta tesis.

Con respecto a las dimensiones geométricas, se puede afirmar que dependen linealmente de la potencia, en especial la profundidad de la pileta fundida y área de fusión, lo cual cumple con el modelo de Rosenthal para velocidades bajas, sin una marcada relación con la cantidad de polvo aplicada. Esta dependencia lineal también es aplicable la relación entre el área total y la potencia, aunque en este caso, para cada cantidad de polvo hay diferencias en las rectas tanto en posición como en pendiente, obteniendo mayor área total para el caso con mayor cantidad de polvo.

Se observó una tendencia a aumentar el tamaño de grano con la potencia producto del mayor aporte térmico, con una cierta independencia entre el tamaño de

grano y la dureza medida, obteniendo siempre durezas mayores en el caso con 5,5 gr/min con respecto a 2,5 gr/min.

Existe un aumento en la cantidad de polvo acoplado con la potencia de manera lineal en el caso de 5,5 gr/min y con tendencia a la linealidad en el caso de 2,5 gr/min.

A partir del caso particular de análisis, se observa una buena mezcla entre material base y de aporte gracias a la información provista por el perfil de concentración, obteniendo una concentración promedio de 47% de cromo. En las micrografías de la sección transversal se observa la microestructura típica del tratamiento con láser, con una zona fundida definida, la cual presenta granos alargados en la dirección de extracción del calor, y zona afectada térmicamente pequeña.

En el caso del barrido, se concluye la factibilidad de realizarlo, obteniendo un buen resultado, con pistas homogéneas cubriendo toda el área tratada, sin efecto de recocido en la pista adyacente y con una dureza promedio de 270 Vickers en la superficie tratada y rectificada.

Basándose en los resultados obtenidos al realizar un recubrimiento en la superficie de un acero con láser y polvo de cromo, se deja abierta la posibilidad de experimentar con nuevos materiales, puesto que la implementación del laboratorio para este experimento, es flexible y permite trabajar con variados polvos metálicos para aporte y diferentes geometrías, tamaños y variedad materiales para el sustrato.

BIBLIOGRAFIA

Apraiz, J. (1964). *Tratamientos térmicos de los aceros*. Madrid: Dossat.

ASM. (1992). *ASM Metals Handbook Volume 3 "Alloy phase diagrams"*.

ASM. (1987). *ASM Metals Handbook Volume 5 "Surface Engineering"*.

Conde, A., Zubiri, F., & Damborenea, J. (2002). Cladding of Ni-Cr-B-Si Coatings with a high power diode laser. *Material Science and engineering* , 233-238.

Costa, L., & Vilar, R. (2009). Laser powder deposition. *Rapid prototyping journal* , 264-279.

Dorronsoro, M. (1996). *La tecnología Láser: fundamentos, aplicaciones y tendencias*. Madrid: McGraw-Hill.

Dowden, J. (2009). *The theory of Laser material processing*. Springer.

Dutta, J., & Manna, I. (2003). Laser processing of materials. *Sadhana* , 495-562.

Ettaqi, S., Langlois, L., & Bigor, R. (2008). Cobalt-based superalloy layers deposited on X38CrMoV5 steel base metal by explosion cladding process. *Surface and Coatings Technology* , 202 (14), 3306-3315.

Gaafer, A., Mahmoud, T., & Mansour, E. (2010). Microstructural and mechanical characteristics of AA7020-O Al plates joined by friction stir welding . *Material science and engineering* , 527, 7424-7429.

García, J. R., Cuetos, J. M., Fernández, E., & Higuera, V. (2007). Laser surface melting Cr-Ni Coatings, in the erosive-corrosive atmosphere of boilers. *Tribol Lett* , 99-108.

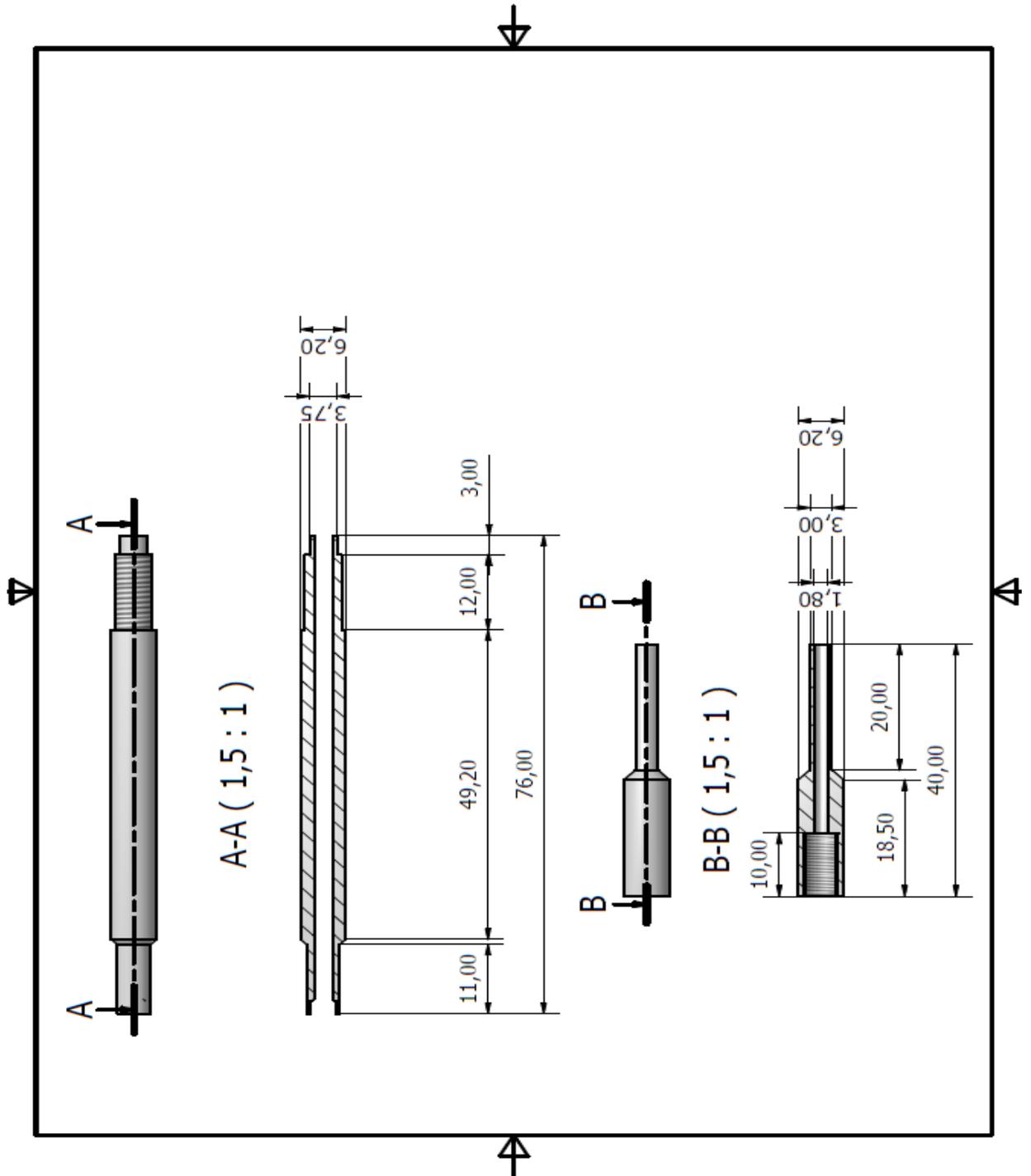
Ignat, S., Sallamand, P., Nichici, A., Vannes, B., Grevey, D., & Cicala, E. (2003). MoSi₂ laser cladding: a new xperimental procedure: double sided injection of MoSi₂ and ZrO₂. *Surface and Coatings technology* , 233-241.

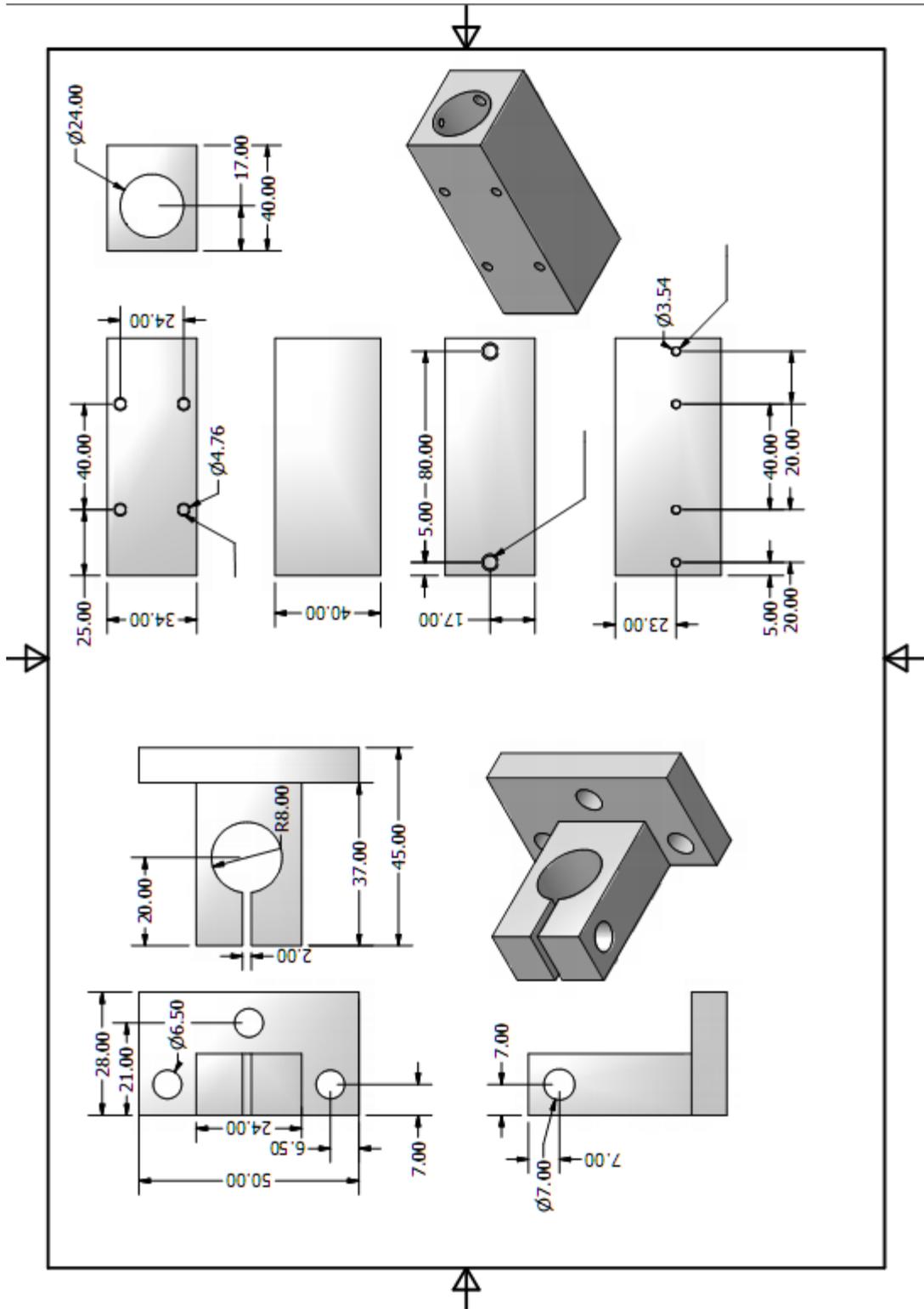
Koebner, H. (1984). *Industrial applications of Lasers*.

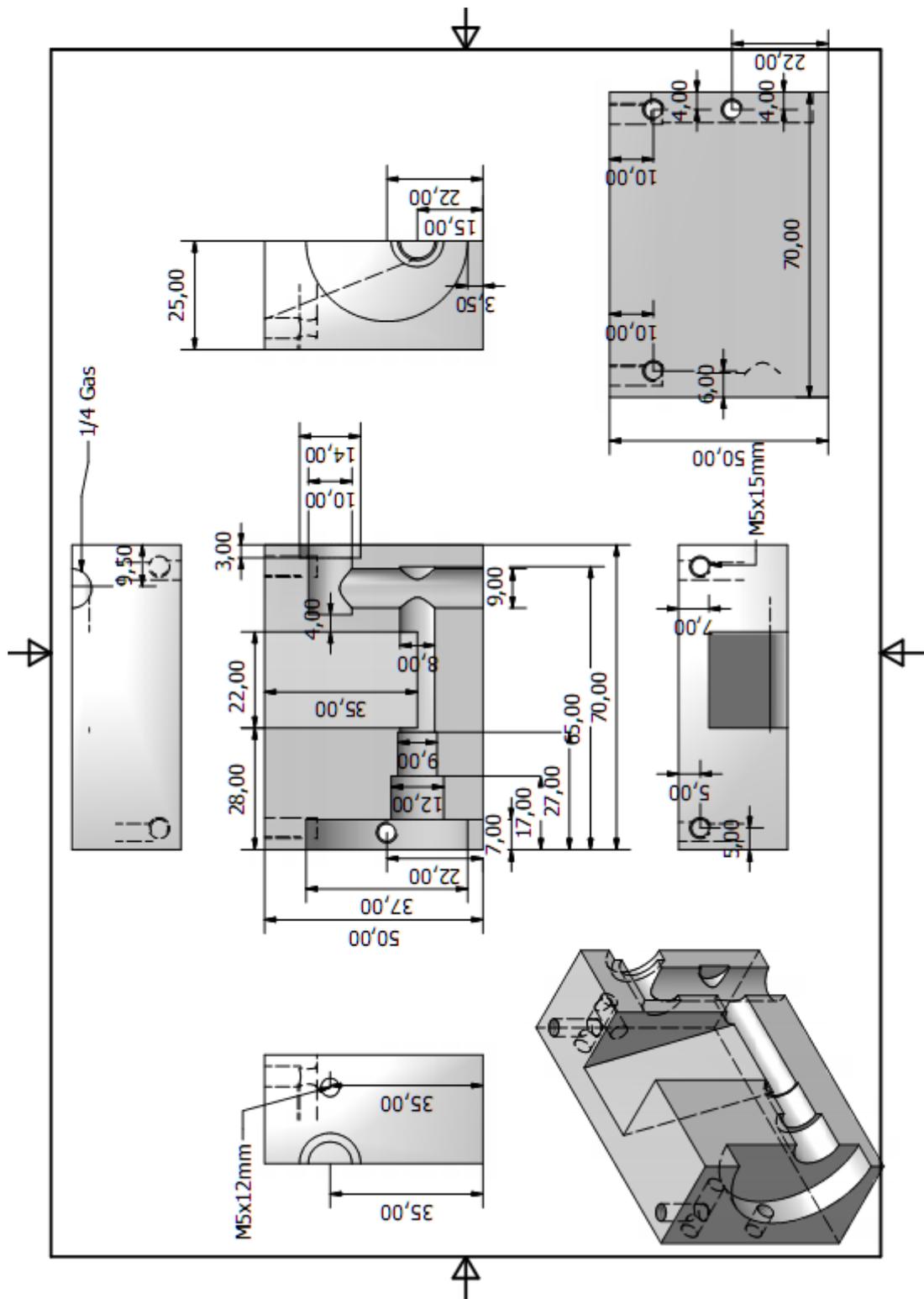
- Komvopoulos, K. (1990). Processing and Characterization of Laser-Cladded Coating Materials. *Journal of Engineering Materials and Technology* , Vol 112, 131-143.
- Lu, X., & Wang, H. (2005). Corrosive sliding wear behavior of laser clad Mo₂Ni₃Si/NiSi intermetallic coating. *Applied Surface Science* 245 , 346-252.
- Meyrick, G., & Wagoner, R. (2001). *Physical Metallurgy of Steel*.
- Migliore, L. (1996). *Laser material Processing*. New York.
- Navas, C., Conde, A., Fernández, B., Zubiri, F., & Damborenea, J. (2005). Laser coatings to improve wear resistance of mould steel. *Surface and coatings technology* , 136-142.
- Patel, C. (1964). Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂. *Physical review* 136 , 1187-1193.
- Powel, J., & Steen, W. (1981). Vibro Laser cladding. *Proc. Lasers in Metallurgy* , 93-104.
- Ramos-Grez, J. A. (2008). Apuntes curso métodos modernos de manufactura, PUC. Santiago, Chile.
- Ramos-Grez, J. A., Bourell, D. L., & Govindaraju, M. R. (2009). Microstructural analysis and oxidation protection behavior of Cr-Ni Surface coatings of 347 stainless steel by rapid mirror scanning of a high power CO₂ laser. *Journal of laser applications* .
- Ramos-Grez, J. (2007). Apuntes curso Métodos Modernos de Manufactura PUC. Chile.
- Rombouts, M., Meneve, J., Robberecht, D., Geerinckx, E., & Gedopt, J. (2009). Laser cladding: a versatile pro-active and reactive technology. *Proceedings Comadem* .
- Rosental, D. (1946). -The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. *Trans ASME* 48 , 849-866.
- Rosenthal, D. (1941). Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding Journal* , Vol 20, 220-234.

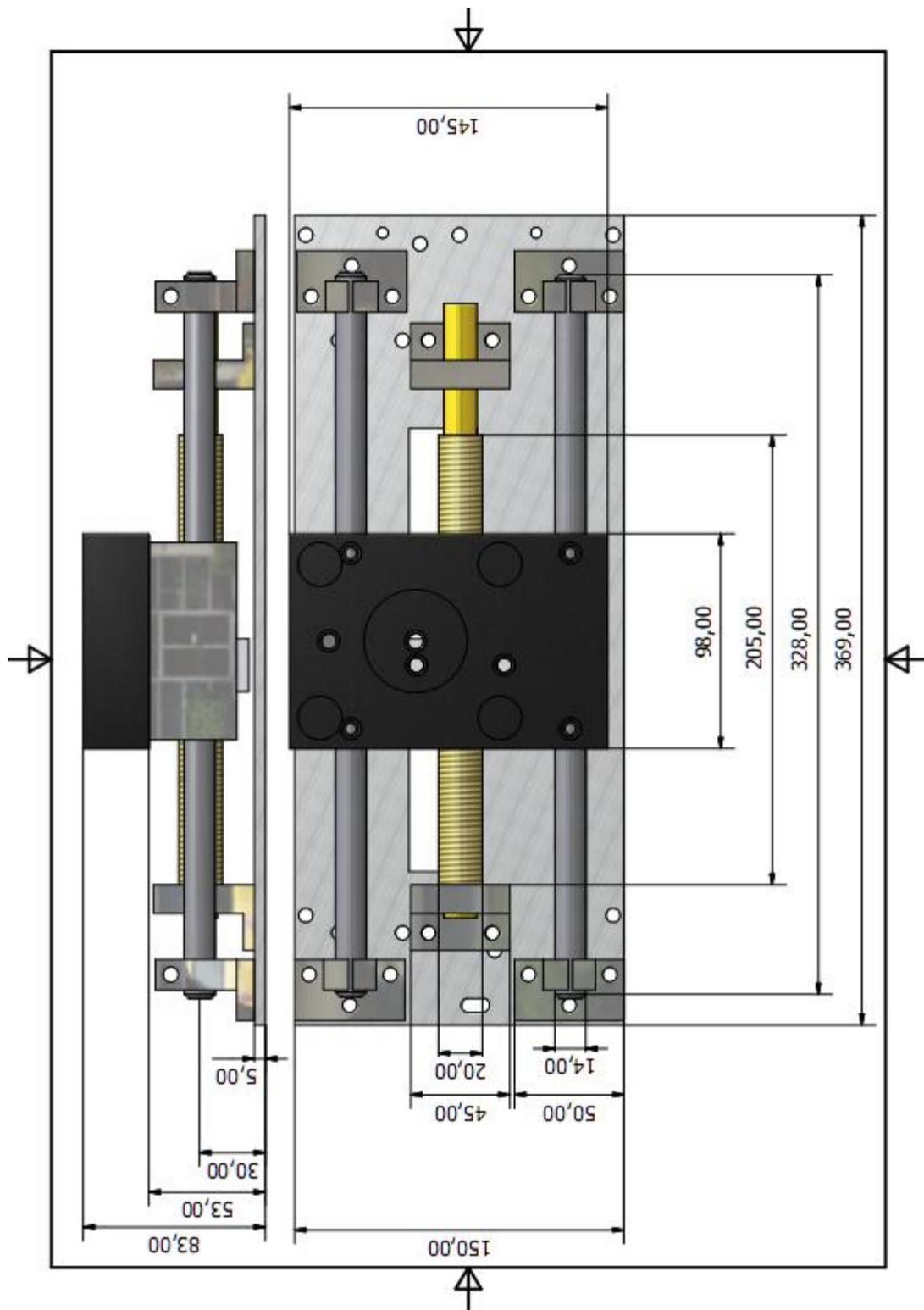
- Schneider, M. (1998). *Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties*. Enschede, The Netherlands: University of Twente.
- Steen, W. (2003). *Laser material procesing*. Londres: Springer-Verlag.
- Steen, W. (1987). Surface Engineering with Lasers, . *Applied Laser Tooling* , 131-181.
- Steen, W.M.;Watkins, K.G. (1993). Coating vy laser surface treatment. *Journal de Physique* .
- Stern, G. (1990). Absorptivity of CW CO₂, CO and YAG-Lasers by Different Metallic Alloys. *ECLAT 90*, (pág. 25).
- Stone, H. E. (1979). Hardness, oxidation and constitution in chromium-iron alloys. *Journal of material science 14* , 2787-2790.
- Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2004). *Laser Cladding*. Florida: CRC Press.
- Wang, H., & Duan, G. (2003). Wear and corrosion behavior of laser clad Cr₃Si reinforced intermetallic composite coatings. *Intermetallics* , 755-762.
- Yakovlev, A., Bertrand, P., & Smurov, I. (2004). Wear-resistant coatings with engineered structure by laser cladding. *Tribology letters* , 705-708.
- Yang, S., Chen, N., Liu, W., & Zhong, M. (2003). In sity formation of MoSi₂/SiC Composite coating on pure Al by laser cladding. *Material Letters 57* , 3412-3416.

ANEXO A: PLANOS TOBERA, ATRIL Y DISPENSADOR DE POLVO.

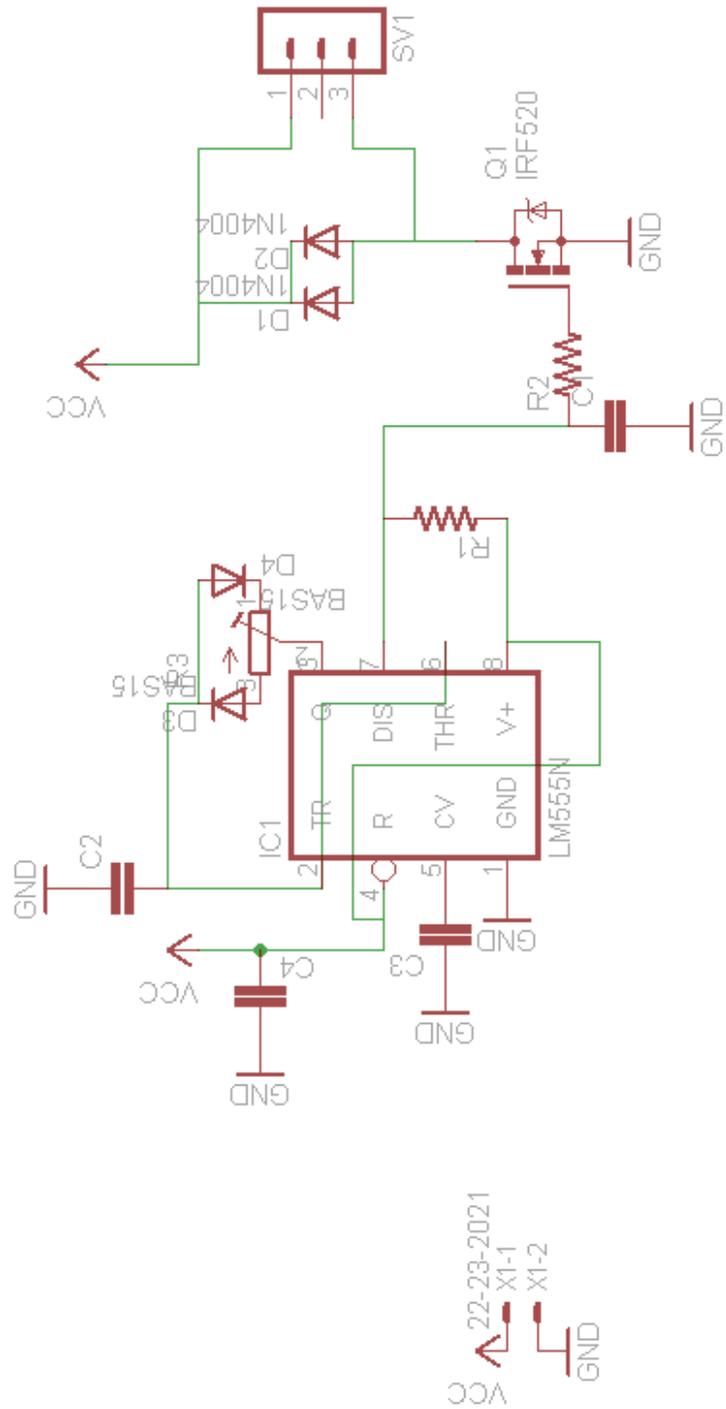








ANEXO B: PLANO CONTROL ELÉCTRICO.



ANEXO C: OTRAS SERIES DE EXPERIMENTOS

Serie A: Para una potencia específica, consiste en fundir una pista para diferentes distancias focales, obteniendo así el ancho del láser sobre el material en función de la potencia y el foco, midiendo el ancho en su sección transversal a través de un microscopio óptico.

Serie B: Para una potencia específica y para las condiciones operativas obtenidas en la Serie A, se aplica polvo de cobre en la superficie mediante el dispensador de polvo a 45° y se funden pistas variando el foco y la cantidad de polvo. Esta serie de experimentos es solo para probar el correcto funcionamiento del dispensador de polvo.

Serie C: Para cada rango de potencia específico, se funde polvo de cobre aplicado con el dispensador de polvo, pero en esta ocasión, se cubre un área en vez de una sola pista y se repite el procedimiento sin aplicar polvo. Se observa su sección transversal a través de microscopio óptico y se mide ancho y profundidad de la piletta fundida.

Serie D: Luego de las series A, B y C, se observa oxidación en la superficie, para lo cual en la serie D, los primeros experimentos consistieron en la fusión de pistas, variando la cantidad de gas protector, y la distancia entre la tobera y el material sin modificar la distancia focal. Luego de estos experimentos, se llegó a la distancia entre tobera y material la cual no producía oxidación en la superficie y el flujo de gas protector adecuado para evitar la oxidación y se realizó una prueba en una placa, en la cual se fundía una pista con protección gaseosa y otra sin protección para comparar el efecto de la energía liberada en la oxidación. La segunda parte de la Serie D, fue destinada a fundir pistas para cada rango de potencias, manteniendo la distancia entre tobera y material pero variando la distancia focal para obtener en que rango de distancias focales el material se funde, se vaporiza o no funde. Finalmente la tercera parte de la serie D, consistió en fundir una pista en cada probeta para cada rango de potencia, variando la distancia focal dentro del rango de operación obtenido con anterioridad,

obteniendo así catorce placas para los rangos de potencia entre 500 y 1500 W. A estas catorce placas se les realizaron metalografías y perfiles de dureza en la zona transversal de la piletta fundida, cuyos detalles se muestran en el anexo E.

Serie E: En las placas de la serie E, se probó si el cromo proyectado sobre el material base por el dispensador de polvo, logra fundirse en la superficie del material base mediante el haz láser y lograr una unión metalúrgica, y se probó el rango de experimentos para la serie F, a estas placas se les realizó metalografías para observar la unión entre el sustrato y el material de aporte e identificar que parámetros utilizar en las pruebas de la serie F.

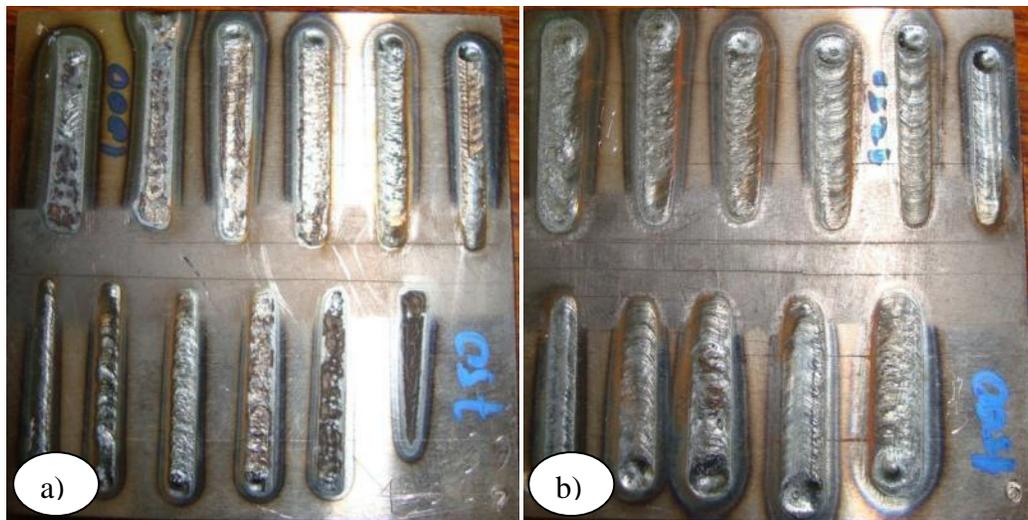
Serie F: a partir de las pruebas realizadas en la serie E y para descartar un posible efecto de la velocidad de barrido, se realizó la fusión de una pista sobre la superficie de una probeta cilíndrica de diámetro 25mm, la cual gira con respecto a su eje, logrando altas velocidades tangenciales. La pista queda con forma de hélice o hilo sobre la superficie.

Serie G: Se descarta la variación de foco, dejando la distancia focal a una distancia fija de 4 mm bajo el foco, la cual corresponde a la distancia desde el foco en la cual la fusión del polvo a la potencia máxima de trabajo evita la formación de plasma producto de la alta potencia, el gas protector y el polvo.

ANEXO D: RESULTADOS DE OTRAS SERIES DE EXPERIMENTOS

Serie A

Se realizaron las pruebas de fusión en dos placas, las cuales se aprecian en la figura y los detalles de ancho, potencia y distancia focal se muestran en la tabla.



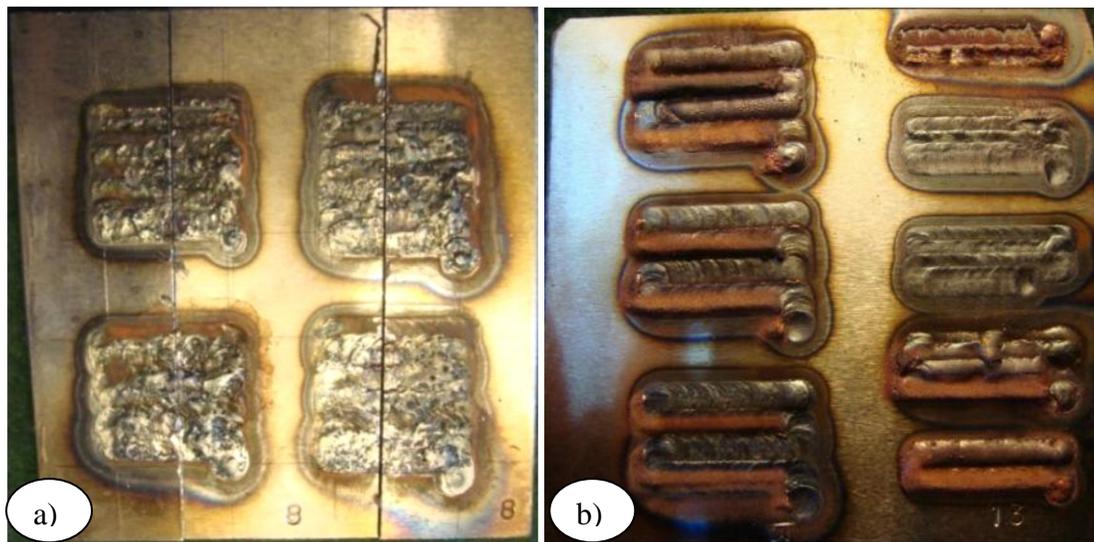
750w		1000w		1250w		1500w	
H (mm)	Ancho (mm)						
40	2,1						
50	2,5	50	3	50	3,5	50	3,5
60	2,9	60	3,4	60	4	60	4,2
70	3,1	70	3,8	70	4,5	70	4,8
80	2,8	80	4	80	4,8	80	5
90	2,5	90	3,5	90	5	90	5,5
		100	4	100	4,2		

Serie B

Pruebas de fusión con polvo de cobre, se observa un buen comportamiento del dispensador de polvos al fundir pistas aisladas.

Serie C

Área cubierta por cobre, se observa un buen funcionamiento del programa de barrido de área del controlador CNC, buena unión entre el polvo y el material base y buen traslape entre pistas, aunque claramente se diferencia la variación en el sentido de aplicación de cada pista.



Serie D

Se irradió mediante láser, varias probetas a distintas distancias focales y distancia entre tobera y material, encontrándose que con la tobera a 10 mm del material, era posible lograr fusión de la superficie, sin presentar oxidación, dejando espacio para a futuro poner la tobera lateral. Luego se observó que el láser no lograba fundir la superficie para lo cual la probeta D12, se pintó con grafito y se realizaron dos pistas, esta

vez, dos pasadas rectas, en una de ellas con un flujo de 20l/min de Argón para realizar una atmósfera protectora y otra sin protección para observar el efecto de la oxidación en la pista. Al realizar la metalografía de la probeta D12, se observó que en la pista protegida, no se había logrado fusión de la superficie, pero debido a la alta temperatura alcanzada producto de los 1000 W de potencia del láser y a la interacción con la superficie pintada con grafito, se produjo una capa en la superficie del material parecida a la obtenida en el tratamiento térmico de cementación. En cambio, en la segunda pista sin protección gaseosa, la pista presentó claras señales de oxidación en su superficie, lo cual aportó energía y logro fundir el material a una profundidad de 1,3mm.

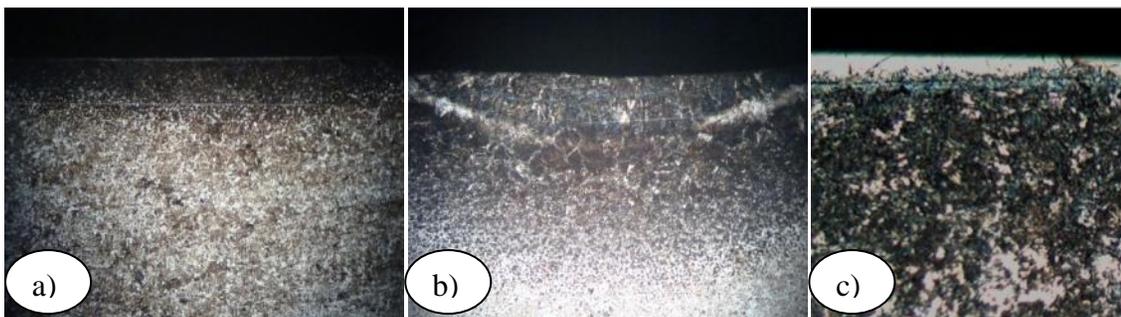


Figura: Micrografía probeta D12 con y sin atmósfera controlada

Con la información empírica sobre la ubicación de la tobera sobre el material, se realizaron varias pistas en las placas D1 a D4, en las cuales cada serie de pistas se realizó a un rango de potencia constante, variando la distancia focal para obtener el rango en el cual el material se vaporiza, funde o solo se calienta para poder acotar el rango de operación y definir los parámetros de la siguiente ronda de experimentos. Estas pistas, se varió además el flujo de gas, si se observaba que era demasiado para producir proyección de material fundido o muy poco como para no proteger la superficie de la oxidación. Todas las pistas fueron realizadas a velocidad constante de 2mm/s.

A partir de la información obtenida con las placas D1 a D4, se acotó el rango en el cual el láser debiese fundir la superficie y se realizaron experimentos en las placas D5 a D7 y D13 a D23, los cuales se detallan en la tabla x junto con los resultados obtenidos. Las placas se cortaron transversalmente y se les preparó mediante pulido y ataque químico, para realizar un perfil de micro dureza Vickers y medir la sección transversal de la pileta fundida mediante microscopio Óptico. Dicha información se adjunta en la tabla, junto con potencia, eficiencia de acople, foco, ancho de pista y dureza máxima alcanzada. Los detalles de los perfiles de dureza se encuentran en la sección anexos.

Para definir la profundidad máxima de la zona fundida, se midió observando el inicio de la zona afectada térmicamente, mediante microscopio óptico y un lente graduado. Dicha profundidad se utilizará para encontrar la potencia teórica necesaria para lograr una isoterma igual a la temperatura de fusión a esa profundidad según el modelo de Rosenthal, mediante una hoja de cálculo.

Placa	H [mm]	Pot [w]	Eficiencia de Acople	Zm [mm]	w [mm]	Área [mm ²]	HV máx.
D5	30	536	19,088	0,31	0,75	0,353	507
D14	35	530	14,598	0,18	0,72	0,192	494
D15	40	530	11,983	0,13	0,93	0,190	541
D6	30	752	16,645	0,42	0,96	0,513	452
D7	35	780	13,424	0,33	1,02	0,689	494
D16	40	770	12,261	0,28	1,2	0,471	452
D13	35	1012	13,671	0,48	1,34	1,010	435
D17	40	1001	10,949	0,35	1,4	0,682	475
D20	45	1016	9,7854	0,3	1,6	0,754	542
D18	40	1260	11,015	0,48	1,76	1,272	487
D21	45	1250	10,235	0,43	1,9	1,373	457
D19	40	1472	12,184	0,63	2	1,822	507
D22	45	1510	10,453	0,54	2,1	1,517	588
D23	50	1522	9,7067	0,5	2,3	1,662	475

Teniendo los datos tabulados en una planilla de cálculo Excel, se procedió a realizar los gráficos de Energía específica v/s Eficiencia de Acople figura, para cada nivel de potencia, encontrándose que en cada nivel 500, 750, 1000, 1250 y 1500 W, se cumple una tendencia de que a mayor energía específica, existe mayor eficiencia de acople, en todos los niveles con una pendiente similar de aproximadamente 13,5 unidades de Energía específica por cada punto porcentual de eficiencia de acople. Dicha tendencia se acerca a los supuestos de la ecuación de Rosenthal, ya que al aumentar la energía específica, la fuente de calor se asemeja a una fuente puntual de calor. Por estos mismos motivos, se aprecia que la eficiencia de acople, aumenta al disminuir el área transversal la cual se aproximó al área de media elipse según la ecuación, en la cual w corresponde al ancho de la pista y z a la profundidad de la zona fundida.

Es posible apreciar que el área transversal, aumenta junto con la potencia. Existe menor eficiencia de acople en cada serie a igual potencia, ya que al aumentar la distancia focal produce efecto directamente sobre el ancho de pista, la cual

$$A_T = \frac{\pi WZ}{2}$$

En la metalografía de la placa D21 figura a, se puede observar la zona tratada mediante el tratamiento láser, se observa claramente la zona fundida en el centro de la pileta, la zona afectada térmicamente y una zona de transición hasta llegar al material base. Dentro de la zona fundida se observa en el centro granos de distinto tamaño y con una aparente tendencia a crecer en dirección hacia el centro de la pileta, en la dirección de extracción del calor, en forma de granos columnares, producto del rápido enfriamiento direccional, lo cual es característico del tratamiento con láser. Además en la imagen se observa el perfil de dureza realizado a la sección transversal de la pista.

En la figura b se observa parte de los granos de la zona fundida los cuales corresponden a una microestructura Martensítica Bainítica, en la cual la Bainita se

aprecia como un arreglo de agujas ordenadas, con similar dirección y la Martensita aparece como agujas desordenadas.

En la figura c, se observa parte del material base y la zona térmicamente afectada, en la cual existe una estructura Ferrita Perlita. En la parte superior de la imagen se observa el crecimiento de la perlita en el borde de grano de la Martensita, en la zona intermedia se observa que los granos de Ferrita crecieron con respecto al material base que se observa en la parte inferior de la imagen.

En la figura d se observa el material base en el cual se aprecian claramente los granos de Perlita, que corresponden a delgadas láminas de Cementita y Ferrita, rodeados por granos de Ferrita.

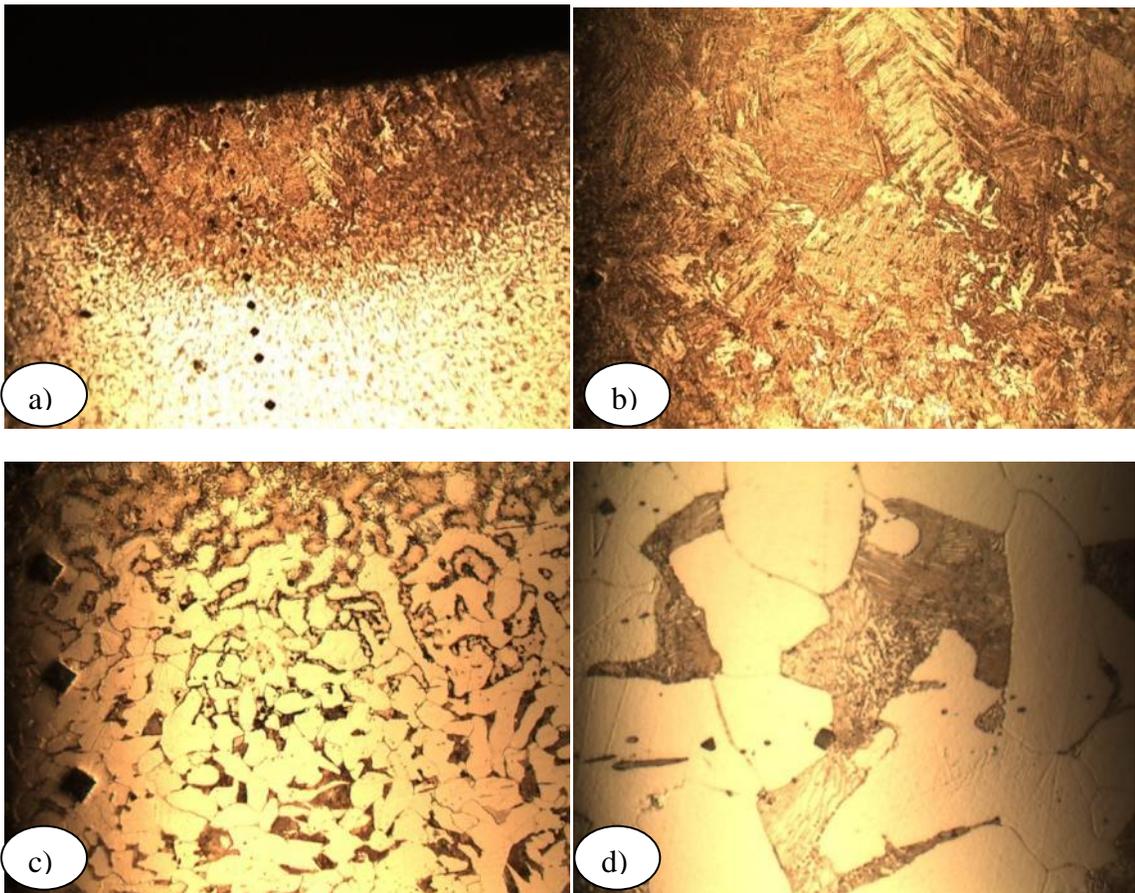


Figura a) 50x Crecimiento Columnar, b) 200x Zona fundida, c) 200x zona transición, d) 1000x material Base.

Perfiles de Microdureza.

Se realizaron perfiles de micro dureza Vickers a la sección transversal de todas las placas de la serie D, los perfiles se realizaron en un durómetro LECO, con una carga de prueba de 200gr durante 15 segundos, se realizó el gráfico con el perfil de dureza y se anexó una fotografía de la sección en la cual se midió la dureza, para poder referenciar la dureza con la zona correspondiente en la pileta fundida, zona afectada térmicamente y material base. En los perfiles de dureza de las placas de la serie D, se observa un patrón similar al variar la potencia, todos los perfiles tienen la zona endurecida, la cual corresponde a la zona fundida y recristalizada, luego una zona de transición en la cual la dureza disminuye gradualmente y finalmente llega al material base con una dureza de 180 HV. Las durezas máximas tienen valores que rondan entre los 450 y 550 Vickers y dependen del tipo de tratamiento y sus parámetros, tal como distancia focal y potencia.

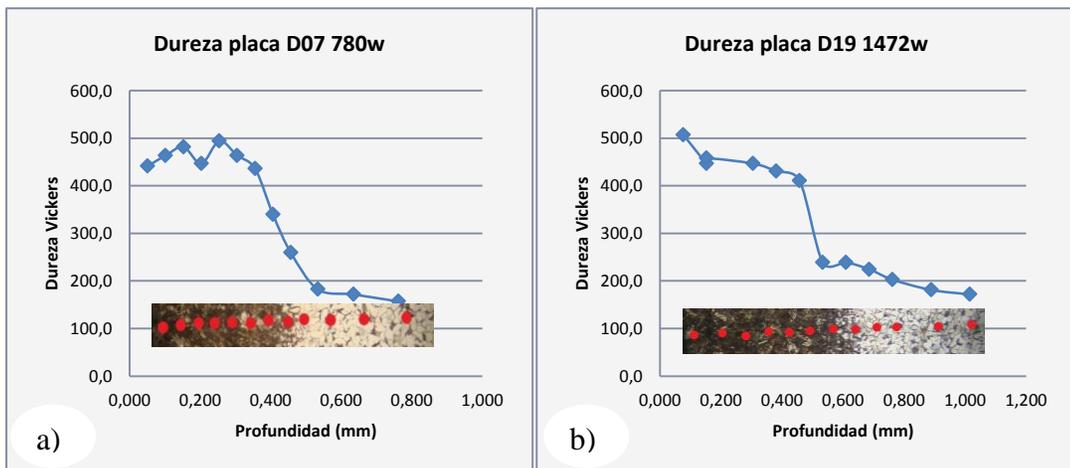
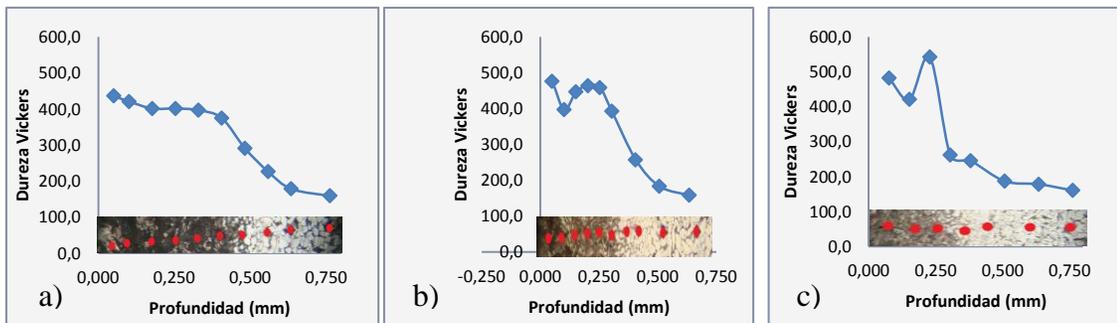


Figura: a) Perfil de dureza placa D07, b) perfil de dureza placa D19.

Como era de esperar, la zona endurecida disminuye al aumentar la distancia focal, ya que aumenta el diámetro del haz para un mismo nivel de potencia, reduciendo la energía específica, por lo tanto reduciendo la profundidad de la zona fundida, por lo tanto variando la profundidad de la zona endurecida y variando a la vez el gradiente de dureza en la zona de transición, el cual aumenta al tener una distancia focal mayor. Este fenómeno se atribuye al fenómeno de transferencia de calor producido en la pileta fundida. El calor se transfiere hacia el material por conducción a través del área de la pileta fundida, por radiación al ambiente desde la superficie incandescente de la pileta fundida y una porción del calor es absorbida por el gas frío de la atmósfera protectora. Entonces al aumentar la distancia focal, el efecto de aumentar el diámetro del foco, aumenta el diámetro de la superficie de la pileta, aumentando el área de radiación, el área de contacto entre el metal fundido y el flujo de gas frío y aumenta el área de contacto entre el material fundido y el material base frío.



Perfiles de dureza Vickers a 1000 W a) Placa D13 distancia focal 35mm, b) Placa D17 distancia focal 40mm, c) Placa D20 distancia focal 45mm.

ANEXO E: OPERACIÓN DEL LÁSER.

Precauciones

- Utilizar siempre Lentes de seguridad (Riesgo de Ceguera)
- Mantener el área de trabajo despejada (Riesgo de caídas)
- No tomar metales calientes con las manos descubiertas (riesgo de quemaduras)
- Evitar tocar el equipo (Riesgo descarga eléctrica)
- No apuntar hacia los tubos con plasma(Riesgo descarga eléctrica)
- No poner las manos bajo la tobera con el Láser en funcionamiento (riesgo de amputación)
- Evitar posibles reflexiones del haz Láser hacia las personas (riesgo de quemaduras)

Encendido Láser

- Encender Compresor y Secador de aire, verificar las llaves de paso de aire.
- Encender bomba de agua y chiller Seteado en 18°.
- Abrir Válvulas de Gases: Nitrógeno, Dióxido de Carbono, Helio, y verificar que su presión sea sobre 9 Bar.
- Abrir Válvula de Aire comprimido hacia el láser.
- Encender Láser, interruptor Grande, parte posterior del equipo.
- Esperar y ver que no aparezcan mensajes de error en el control del láser.
- Pulsar Botón verde “LÁSER ON”.
- Comienza a funcionar la bomba de Vacío, baja la presión hasta 35 mbar y luego aumenta hasta 110 mbar, Comienza a funcionar la turbina.
- Si no hay errores girar llave a la derecha y presionar botón verde “High Volt On”

- Se enciende el alto voltaje, y se ve el plasma en los tubos de vacío, si hay descargas eléctricas (rayos) apagar láser y volver a encender hasta obtener solo plasma.
- Setear la potencia, presionar tecla “control”, luego el valor de la potencia deseada, apretar tecla “enter” iterar hasta obtener la potencia deseada.
- Ponerse Lentes de seguridad, cerrar la reja y despejar el área de trabajo
- Girar llave a la derecha y apretar botón “Shutter On”, se abre el disparador y el haz láser llega a la pieza.
- Con botón “shutter off” el haz deja de irradiar la pieza.
- Para control remoto presionar F3 y aparece en pantalla “remote Trigger”, con la llave encendida al pisar el pedal abre el “shutter” y al soltar el pedal lo cierra.

Apagado Láser

- Presionar botón “shutter off”
- Presionar botón “high voltage off”
- Presionar botón “Laser off”
- En Controlador presionar botón F2 y seleccionar “Láser shutt Down”
- El Láser debiese llenarse de Nitrógeno
- Girar Interruptor grande en la parte posterior del Láser
- Apagar Secador de aire, compresor y cerrar válvulas de aire.
- Apagar chiller y bomba de agua
- Cerrar válvulas de gases.

Mesa de Control

- Encender Computador.
- Encender Fuente de poder controlador.
- Abrir Konsole Programa terminal.
- Con flecha hacia arriba Su do su.
- Otra vez flecha hacia arriba /cnc.

ANEXO F: MEDIDAS DE SEGURIDAD

Toda forma de energía es peligrosa, incluso al ganar energía potencial subiendo escaleras. En el láser, existen diferentes situaciones de riesgo frente a las cuales se debe tener máxima precaución para evitar posibles daños a la visión, quemaduras en la piel, descargas eléctricas y daños por los vapores de los materiales trabajados. Los riesgos de daño varían dependiendo de la longitud de onda y del tipo de láser. En los láseres de gran potencia, se necesitan equipos auxiliares los cuales aumentan los riesgos debido a los propios riesgos de estos equipos.

La intensidad del haz láser puede causar daños importantes en los tejidos humanos tales como la piel y los ojos. Debido a la capacidad especial del ojo de enfocar sobre la retina, este es el órgano más vulnerable, ya que pequeñas cantidades de energía pueden concentrarse sobre la retina causando daño irreversible incluso pérdida de visión. En el ojo el tipo de lesión varía según la longitud de onda de la radiación. Entre longitudes de onda de 400 a 700nm y 700 a 1400 (radiación visible e infrarroja respectivamente), la radiación puede atravesar los tejidos que componen el ojo y alcanzar la retina produciendo una lesión térmica o fotoquímica. Si el ojo está focalizado la lesión se producirá en la fovea, si no está focalizado, la lesión podrá ser en la periferia de la retina y puede ser indetectable. Entre 315 a 400 nm (radiación ultravioleta A), entre estas longitudes de onda, la lesión más común son las cataratas producidas por la radiación absorbida por el cristalino. A longitudes de onda entre 180 a 315 nm y 1,4 μ m a 1mm (ultravioleta B y C e infrarroja B y C respectivamente) radiaciones con estas longitudes de onda afectan principalmente a la córnea, produciendo foto queratitis o quemadura corneal.

Los efectos térmicos de la radiación láser sobre la piel se manifiestan como quemaduras, al igual que cualquier elemento que genere calor, es decir quemaduras de cualquier tipo dependiendo del tiempo de exposición y de la intensidad de la fuente.

Los procesos transitorios termo acústicos, se pueden describir como una consecuencia crítica de los efectos térmicos, corresponde a la evaporación repentina de los líquidos del medio celular generando la desintegración de estas.

Los efectos fotoquímicos responden a la absorbencia selectiva de los tejidos con respecto a una determinada longitud de onda, derivado de esto, dicho tejido en vez de liberar la energía, desarrolla una reacción fotoquímica.

Los daños por exposición crónica derivan en su mayoría del rango ultravioleta de la luz, asociándose este a la generación de ciertos tipos de cáncer de piel.

En conclusión, cada vez que se opere el equipo **es necesario utilizar lentes de protección adecuados**, tener el sistema de extracción de vapores funcionando, precaución con todos los aparatos eléctricos, en especial el resonador que trabaja con alto voltaje, protegerse de quemaduras por la alta temperatura de los materiales tratados y finalmente no exponer la piel al haz láser directamente.

ANEXO G: PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA ANÁLISIS METALOGRÁFICO.

La preparación de las probetas para el análisis metalográfico consiste en preparar la superficie a observar, de manera de que la luz emitida por el microscopio óptico se refleje pudiendo observar la superficie del metal. Para lograr esto, debemos preparar la probeta según las etapas detalladas a continuación

Corte: En esta etapa se debe cortar la probeta en la sección transversal a la pista que se quiere observar, se realiza en una máquina, con un disco de corte con líquido refrigerante, el cual obtiene un corte limpio y sin afectar térmicamente la pieza.

Esmerilado: En este proceso la sección transversal de la probeta es esmerilada, sobre papel lija n°60 montado sobre una base rotatoria a alta revolución para poder eliminar las deformaciones que hayan quedado en la superficie producto del corte, y lograr una superficie plana.

Pulido Grueso: En esta etapa, las probetas se pasan por 4 lijas de granulometrías 100 120 130 y 140, sobre las cuales circula agua para refrigerar la probeta y transportar las partículas de metal desgastado. Se debe girar la probeta en 90 grados entre lija y lija, para así asegurar ir borrando las marcas del pulido anterior.

Pulido Fino: Es la etapa previa al pulido final, en esta etapa se pule la probeta en un paño rotatorio con polvo de diamante y aceite, es necesario mover la probeta circularmente en contra del sentido de giro del paño y evitar que esta se caliente.

Pulido Final: antes de pasar a este proceso, es necesario lavar bien la probeta para quitar el aceite del pulido anterior. Luego la probeta se pule en un paño rotatorio con óxido de aluminio disuelto en agua, al igual que en el pulido fino, es necesario mover la probeta circularmente y evitar que se caliente. Luego de que la probeta queda como

espejo se lava con abundante agua, se aplica alcohol en la superficie para desplazar el agua y se seca.

Revelado: una vez terminado el pulido, la probeta debiese quedar con su superficie como un espejo, para observar la microestructura es necesario realizar un ataque químico, el cual revelará la superficie del material dejando expuesto los planos cristalográficos, límites de grano y delimitaciones de fases presentes. En este caso se revela con Nital 3 y con un reactivo especial para acero inoxidable.

Luego de la preparación de la probeta, es posible llevarla al microscopio Óptico para la medición de los parámetros deseados. Para medir dimensiones de la zona deseada, el microscopio cuenta con un lente graduado, en el cual aparece una escala de 1 a 10, con la cual según el aumento, es posible obtener una medición y mediante el software disponible es posible medir áreas y distancias.

Para realizar el perfil de dureza, se utiliza un durómetro marca LECO, el cual posee un indentador con una punta de diamante con forma piramidal, la cual marca el material aplicando sobre él, una carga de 200gr durante 10 segundos, dejando una marca con forma de rombo, al cual es necesario medir sus 2 diagonales las cuales se transforman en la medida de dureza Vickers con la siguiente expresión:

$$HV = \frac{1854 \cdot 0,102 \cdot F \cdot 10^3}{d^2}$$

Las indentaciones se realizan desde el borde superior de la probeta, idealmente en el centro de la pileta fundida, hasta llegar al material base. Entre cada indentación se deben dejar la separación de al menos 3 veces el tamaño de una indentación, esto para evitar que las deformaciones producidas por la marca, alteren las mediciones adyacentes.

ANEXO H: PARÁMETROS Y RESULTADOS DE SERIE J SEGÚN MASA DE POLVO APLICADO.

Placa	Potencia [w]	Masa Cr [gr/s]	Mf-Mi [gr]	Zmedio [μm]	Wmedio [μm]	Htotal [μm]	Dureza HV(100)
J1	335	0,000	-0,0002	162,1	505,1		305,1
J2	335	0,000	-0,0007	214,1	618,6		392,7
J3	335	0,000	-0,0016	190,45	611,7		456,8
J13	410	0,000	-0,0008	301,45	782,2		390,7
J14	410	0,000	-0,0024	297,95	736,4		340,8
J15	410	0,000	-0,0029	294,95	791,9		399,6
J25	527	0,000	-0,0012	380,9	841,9		266,7
J26	527	0,000	-0,0009	367,45	767,2		266,5
J27	527	0,000	-0,0011	369,9	812,0		333,4
J4	315	0,013	0,0006	204,05	570,4		409,7
J5	315	0,013	-0,0007	200,75	531,2	200,8	408,8
J6	315	0,013	-0,0008	187,3	556,4	187,3	419,0
J16	402	0,013	0,0024	338,35	698,0	359,4	356,6
J17	402	0,013	-0,0001	282,5	698,0	329,7	323,2
J18	402	0,013	-0,0018	227,55	650,6	293,7	299,8
J28	554	0,013	-0,0004	384,1	980,4	384,1	311,6
J29	554	0,013	-0,0005	385,6	837,0	385,6	227,1
J30	554	0,013	0,0029	407,7	914,4	472,2	278,4
J7	308	0,625	0,0065	194,5	515,4	320,4	265,5
J8	308	0,625	0,0061	233,85	535,9	285,8	260,3
J9	308	0,625	0,0048	222,6	551,8	321,9	289,2
J19	396	0,625	0,0049	286,4	598,9	349,4	284,4
J20	396	0,625	0,0066	303,8	608,5	362,0	260,3
J21	396	0,625	0,0022	289,7	617,8	366,9	294,4
J31	490	0,625	0,0169	387,6	754,0	483,6	264,4
J32	490	0,625	0,0120	347,8	761,0	497,3	276,6
J33	490	0,625	0,0092	367,5	772,0	463,5	279,3
J10	309	1,375	0,0108	183,4	523,1	329,8	326,8
J11	309	1,375	0,0086	189,65	509,9	268,4	297,7
J12	309	1,375	0,0071	191,25	506,8	293,6	284,4
J22	402	1,375	0,0163	297,45	648,4	437,7	311,6
J23	402	1,375	0,0161	286,2	673,7	410,7	293,8
J24	402	1,375	0,0163	231,4	646,1	429,7	350,5
J34	498	1,375	0,0198	374,3	852,1	546,9	296,3
J35	498	1,375	0,0217	372,3	824,8	556,4	290,5
J36	498	1,375	0,0171	330,9	780,9	510,4	289,3