

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA

MODELACIÓN MULTIFÍSICA DEL PROCESO DE LA INTERACCIÓN LÁSER-MATERIA EN EL PROCESO DE PLAQUEADO

FELIPE ANDRÉS VÁSQUEZ GARCÉS

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

Profesor Supervisor:

JORGE RAMOS GREZ

Santiago de Chile, (Abril, 2011) © 2011, Felipe Andrés Vásquez Garcés



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA

MODELACIÓN MULTIFISÍCA DEL PROCESO DE LA INTERACCIÓN LÁSER-MATERIA EN EL PROCESO DE PLAQUEADO

FELIPE ANDRÉS VÁSQUEZ GARCÉS

Tesis (Proyecto) presentada(o) a la Comisión integrada por los profesores:

JORGE RAMOS GREZ

MAGDALENA WALCZAK

MARÍA CRISTINA DEPASSIER

RICARDO PÉREZ

Para completar las exigencias del grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Abril, 2011)

A todo los que me apoyaron en este largo camino.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible de realizar sin el apoyo de mis Padres, que me dieron la oportunidad de estudiar, de mis amigos y de las personas que de alguna forma u otra me permitieron ser parte de esta Universidad.

Quiero agradecer también a las personas que aportaron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo, como mi polola Camila Muggli, mi antecesor Ambrosio Olivos, Alfonso Poblete, Gabriel Vilaboa, y a todas esas personas que me brindaron todo el apoyo necesario para lograr esta ardua tarea.

INDICE GENERAL

Agradecimientosiii				
Índice Generaliv				
Índic	e de f	figuras y tablasvii		
Resu	men.	xi		
Abst	ract	xii		
Nom	encla	turaxiii		
1.	Introducción 1			
2.	Marco teórico			
	2.1	Descripción del funcionamiento láser		
		2.1.1 Emisión estimulada		
		2.1.2 Amplificación de la luz		
		2.1.3 Inversión de población		
		2.1.4 Resonador Óptico		
		2.1.5 Características del haz láser		
		2.1.6 Propiedades Láser de CO ₂ 12		
		2.1.7 Interacción Láser-Materia 12		
2.2 Descripción de tratamiento parámetros de interés		Descripción de tratamiento superficial con láser y obtención de parámetros de interés		
		2.2.1 Diferentes métodos de plaqueado láser		
		2.2.2 Alimentación de polvo		
		2.2.3 Propiedades y parámetros importantes del revestimiento23		

2.3 Introducción al modelo de Transferencia de Calor y Fusi Superficial				
	2.3.1 La física del proceso			
	2.3.2 Energía absorbida y temperatura de las partículas de polvo			
	2.3.3 Vaporización de la superficie			
2.4	Modelos presentes en la literatura			
2.5	Descripción del software de simulación COMSOL Multiphysics			
	2.5.1 Validación de COMSOL (numérico vs. analítico)			
2.6	Desarrollo del modelo computacional en COMSOL Multiphysics 44			
	2.6.1 Simplificaciones y supuestos			
	2.6.2 Condiciones de Dominio y de Borde			
	2.6.2.1 Dominio 1			
	2.6.2.2 Domino 2			
	2.6.2.3Condiciones de Bordes			
Re	sultados y discusión			
3.1	Comparación de los resultados la simulación, con resultados obtenidos en la experimentación			
3.2	Efecto de los parámetros operacionales en las dimensiones de la pileta			
	3.2.1 Efecto producido por la variación en el flujo másico en las dimensiones de la pileta			
	3.2.2 Efecto producido por la variación de la velocidad de escaneo en las dimensiones de la pileta			
	3.2.3 Efecto producido por el flujo saliente de vapor			
	3.2.4 Efecto producido por la tensión superficial			

3.

4.	Conclusiones	72
	4.1 Trabajo Futuro	74
Bibli	ografía	75
AN	E X O S	80
Anex	o A: Medidas de Seguridad Láser	81
Anex	o B: Datos usados para los calculos	84
Anex	o C: Detalles de la simulación	85
Anex	o D: Análisis de sensibilidad	87

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1.1: Emisión espontanea y emisión estimulada (Melles Griot, 2009)5
Figura 2.1.2: Amplificación por emisión estimulada (Melles Griot, 2009)6
Figura 2.1.3: Sistema de cuatro niveles de energía (Melles Griot, 2009)7
Figura 2.1.4: Diagrama esquemático de un láser y su resonador (Melles Griot, 2009)
Tabla 2.1.5: Propiedades de los fotones emitidos por diferentes láseres
Figura 2.1.6: Comparación entre onda continua (producto de la coherencia) y onda aleatoria (Steen & Mazumder, 1991)10
Figura 2.1.7: Distintos patrones de modos (Steen & Mazumder, 1991)11
Figura 2.1.8: Interacción del haz láser incidente con la superficie sólida del material irradiado. (Montoya, 2005)
Figura 2.1.9: Movimiento convectivo, debido a la variación de la tensión superficial del charco. (a) $\partial \gamma \partial T < 0$ (b) $\partial \gamma \partial T > 0$ (Montoya, 2005)
Figura 2.1.10: Interacción del vapor o plasma formado con la superficie del charco de material fundido (Montoya, 2005)
Figura 2.2.1: Esquema de fenómenos físicos durante distintos procesos de manufactura (Schneider, 1998)
Figura 2.2.2(a) Aleación, (b) dispersión y (c) plaqueado
Figura 2.2.3: Proceso de dos etapas y proceso de una etapa21
Figura 2.2.4: Esquema de sistema de inyección de polvo, basado en tornillo de Arquímedes (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)22

Figura 2.2.5: Inyección de polvo lateral (Schneider, 1998)
Tabla 2.2.6: Propiedades del recubrimiento
Figura 2.2.7: Geometría del revestimiento
Figura 2.2.8: Porosidad presente al realizar varias pistas adyacentes (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)26
Figura 2.2.9: Revestimientos resultantes según ángulo de mojado
Figura 2.2.10: Correlación entre relación de aspecto, parámetros combinados, potencia por diámetro del haz, flujo másico y factibilidad de realizar el revestimiento por inyección de polvo. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)
Figura 2.5.1: Módulos de modelación predefinidos versión 4.0
Figura 2.5.2: Interfaz de COMSOL 4.0 (COMSOL Multiphysics., 2010)
Figura 2.5.3: Condiciones de borde
Tabla 2.5.4: Propiedades físicas del cilindro. 39
Figura 2.5.5: Distribución de temperatura en el cilindro en $z = 0$ y r = 3 m40
Figura 2.5.6: Distribución radial de temperatura en el cilindro en $z = 0$, en $t = 110$ h, $t = 345$ h y $t = 555$ h respectivamente40
Figura 2.5.7: Distribución de temperatura en el cilindro en $z = 0$, $r = 3$ m41
Figura 2.5.8: Distribución radial de temperatura en el cilindro en $z = 0$, en $t = 110$ h, $t = 345$ h y $t = 555$ h, respectivamente
Figura 2.5.9: Distribución de temperaturas z = 0, r = 3 m. Comparación COMSOL, analítico vs. numérico
Figura 2.5.10: Distribución radial de temperaturas. Comparación COMSOL, analítico vs. numérico

Figura 3.1.5: Gráfico: profundidad fusión vs. potencia. Flujo másico 2,5
g/min, velocidad de escaneo 2mm/s60
Figura 3.1.6: Gráfico: área de fusión vs potencia61
Figura 3.2.1: Efecto en la profundidad de fusión, cuando varia el flujo másico. Velocidad de escaneo 2 mm/s
Figura 3.2.2: Efecto en la profundidad de fusión, cuando varia la velocidad de escaneo. Flujo másico 2,5 g/min
Figura 3.2.3: Gráfico: masa de vapor perdida durante el tiempo de interacción τ por potencia
Figura 3.2.4: Geometría simulada pileta, luego de evaporación del metal por potencia. Velocidad 2 mm/s, Flujo másico 2,5 g/min67
Figura 3.2.5: Comparación de la masa de vapor que sale de la pileta y masa de vapor
Figura 3.2.6: Movimiento de la fase líquida inducida por el cambio de tensión superficial. Condiciones: potencia 396 W, flujo másico 2,5 g/min, velocidad 2 mm/s
Figura 3.2.7: Movimiento de la fase líquida inducida por el cambio de tensión superficial. Condiciones: potencia 490 W, flujo másico 2,5 g/min, velocidad 2 mm/s
Figura 3.2.8: Anomalía en le geometría de la pileta71
Tabla A.1: Daños biológicos producidos por haz láser 82
Figura C.1: Porcentaje de error vs delta
Figura D.1: Sensibilidad a la viscosidad dinámica
Figura D.2: Sensibilidad a la variación de la tensión superficial con respecto a la temperatura

RESUMEN

En esta investigación se estudiarán los parámetros relacionados con el proceso de plaqueado láser mediante la depositación de polvo por medio de una tobera lateral. Para ésto, se desarrolló un modelo de elementos finitos en 3D en estado cuasi-estacionario. El modelo propuesto, puede predecir la forma de la pileta dependiendo de los parámetros del procesos incluyendo, velocidad de escaneo, flujo másico del polvo de aporte, potencia y las propiedades de los materiales. Se consideró en el modelo, los cambios de fases del material base y también el cambio de las propiedades físicas dependientes de la temperatura, como: la densidad, la conductividad térmica y el calor específico. En el modelo, además, se consideró la fuerza termo-capilar y su efecto en el flujo del material fundido. El modelo desarrollado, fue resuelto utilizando las herramientas proporcionadas por COMSOL Multiphysics. Los resultados obtenidos, son presentados y comparados con un experimento previo, en el cual, se depositaba polvo de cromo, lográndose así, la validación del modelo, debido al alto grado de concordancia. Además, se llevó a cabo un análisis de las variaciones de la geometría de la pileta en función de los parámetros operacionales.

Palabras Claves: Plaqueado Láser, Láser CO₂, Modelo Plaqueado Láser, Simulación Plaqueado Láser, Modelo 3D cuasi-estacionario.

ABSTRACT

This work presents the study of the parameters related to the process of laser cladding of a powder deposited through a lateral nozzle. With this motivation, a 3D quasi-stationary finite element model was developed. The proposed model, can predict the shape of the melted pool in function of process parameters, including scanning speed, powder mass flow, laser power and material properties. In the proposed model, phase changes and physical properties of the material (density, thermal conductivity and specific heat) are temperature dependent. The model, also considers, thermo-capillary forces and their effect on fluid flow inside the melt pool. The developed model, was solved using the COMSOL Multiphysics software in order to validate the model. The results are presented and compared with previously obtained experimental data, in which chromium powder was deposited on a steel surface. A high degree of agreement between the experimental and simulated results has been achieved. Finally, an analysis of the variations in the melt pool geometry was addressed in terms of the operational parameters.

Keywords: Laser cladding, CO₂ Laser, Laser cladding model, 3D quasi-stationary finite element model, Laser cladding simulation.

NOMENCLATURA

Aceleración de gravedad	g
Alto de la pista	h _c
Ancho de fusión	W _{max}
Angulo de mojado	θ
Área que cubre nube de polvo	D_p
Calor específico en estado líquido	C _{pl}
Calor específico en estado sólido	C _{ps}
Calor específico en estado vapor	C_{pv}
Calor latente de fusión	L_f
Calor latente de fusión de la partícula	ΔL_p
Calor latente de vaporización	L_v
Coeficiente de absorción de energía de la partícula	η_p
Coeficiente de expansión térmica	β
Coeficiente de extinción	k
Conductividad térmica en estado líquido	k _l
Conductividad térmica en estado sólido	k _s
Constante de Stefan-Blotzman	σ
Densidad en estado líquido	ρ_l
Densidad en estado sólido	$ ho_s$
Densidad polvo aportado	$ ho_c$
Diámetro tobera	d
Dilución	f_{dil}^{g}
Dilución metálica	f_{dil}^m
Distancia de viaje partículas de polvo	l
Emisividad	Е
Entalpía	H _p
Entalpía contenida en la partícula a la temperatura liquidus	h_l
Entalpía contenida en la partícula a la temperatura solidus	h _s
Flujo de vapor que sale de la superficie del material base	J
Flujo másico de polvo	'n
Fracción de energía reflejada	E_r
Fracción volumétrica	g_l
Índice de refracción	n
Intensidad de radiación a una profundidad z	I_A
Longitud de onda	λ
Masa de la partícula de polvo	$\overline{m_p}$

Masa de vapor perdido	m_{vp}
Potencia del láser	P_W
Potencia por unidad de volumen	Q
Potencia transmitida a través de la nube de polvo	P_t
Profundidad de fusión	Z _{max}
Profundidad de fusión (analítica)	d_m
Profundidad de penetración	δ
Punto de ebullición	T_{v}
Punto de fusión	T _m
Radio haz láser	r_l
Radio promedio partículas de polvo	r _p
Temperatura ambiente	T ₀
Temperatura de la superficie que interactúa con haz láser	T _{sup}
Temperatura liquidus	T_l
Temperatura solidus	T_s
Tensión superficial	γ
Tiempo	t
Tiempo de interacción del haz láser con el material	τ
Tiempo de irradiación	t_p
Variación de la tensión superficial con respecto a la temperatura	<i>∂γ/∂Τ</i>
Velocidad de difusión de calor	D
Velocidad de escaneo	U
Velocidad de la interface sólido-líquido	$\dot{S_v}$
Velocidad de partícula de polvo	V _p
Viscosidad dinámica	μ

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la industria está buscando formas económicas para mejorar las propiedades mecánicas de superficies metálicas, tales como: resistencia a la corrosión y el desgaste (Etxeberria, 2006), modificando materiales de bajo costo con una capa superficial de un material que tiene las características deseadas. Existen diversos tratamientos térmicos disponibles como por ejemplo: temple por inducción, temple por haz de electrones y plasma transferido, otra posibilidad es recubrir el material con otro, de características superiores. Dependiendo de la técnica que se utilice, los principales problemas pueden ser la poca adherencia entre materiales o la imposibilidad de realizar un tratamiento muy localizado. Una de las técnicas que supera estas dificultades es el plaqueado láser (*"laser cladding"*).

El plaqueado láser se define como: "proceso por el cual se funde mediante un haz láser un material que tiene propiedades metalúrgicas distintas al material base, en donde una delgada capa del material base es fundida de manera de poder lograr una adhesión metalúrgica con una mínima dilución entre el material añadido y el material base de forma tal que se mantengan las propiedades originales del material con el que se recubre" (Komvopoulos, 1990). En la práctica, el plaqueado láser ha permitido solucionar problemas como, el degaste por abrasión de las válvulas de escape del motor diesel, la corrosión de los álabes de las turbinas a gas; problemas que serían imposibles de solucionar utilizando otro tipo de tratamiento térmico, ya que se logran superficies con muy pocas distorsiones por ende, de muy alta calidad.

Algunas de las ventajas que ofrece el plaqueado láser, con respecto a otros tratamientos es el control que se tiene sobre el proceso de fusión y solidificación, pues las propiedades del material base son alteradas en una porción muy pequeña. Además permite mejorar las propiedades superficiales de aleaciones no templables. Por otro

lado, también se pueden generar prototipos 3D en un corto período de tiempo utilizando esta misma técnica.

Aunque el plaqueado láser ofrece grandes ventajas en comparación con otros métodos, aún no es utilizado por gran parte de la industria, ya que, se pueden obtener resultados variados en el proceso, que repercuten en la calidad, incluso cuando se utilizan los mismos parámetros operacionales. Además, implementar este sistema es costoso y los láseres actuales son poco eficientes energéticamente. Sin embargo, este proceso muestra un gran potencial industrial en el uso de recubrimientos metálicos y prototipado.

Durante esta investigación, se desarrollará un modelo computacional multifísico, en el cual se simulará el proceso de plaqueado láser. Este modelo estará basado en un experimento previo (Olivos, 2010), que consistió en la aplicación de un recubrimiento de cromo en polvo sobre placas de acero SAE1020. Esta simulación, deberá ser capaz de representar los resultados encontrados experimentalmente de manera numérica.

En el modelo, se considerarán leyes y fenómenos físicos que ocurren dentro de la pileta durante el proceso de plaqueado, tales como: la conservación del momentum, la conservación de la masa y la conservación de la energía, además de los cambios de fase, densidad y los efectos de la tensión superficial. De esta manera, se podrá entender de mejor forma cómo interactúan los distintos parámetros operacionales, como la potencia, la velocidad de escaneo y el flujo de polvo inyectado en la geometría de la pileta.

Los objetivos específicos para poder realizar el modelo son:

- Recopilación de datos relevantes del experimento realizado.
- Determinación de ecuaciones a representar en el modelo.
- Incorporación de fenómenos físicos en el modelo.
- Análisis de las pruebas.
- Comparación de los resultados obtenidos de la simulación con el experimento
- Análisis de los efectos de los parámetros operacionales en la geometría de la pileta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción del funcionamiento láser

La sigla LÁSER significa *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*, lo que en otras palabras, significa que es una fuente generadora y amplificadora de ondas electromagnéticas. Estas ondas, poseen las características de coherencia espacial y coherencia temporal, la primera, se refiere a la mayor concentración y menor divergencia de la luz, mientras que la segunda, indica el comportamiento monocromático de luz. No está demás decir, que no existe fuente natural alguna en el Universo que emita ondas lumínicas con tales propiedades.

La física involucrada en la emisión del haz láser, consiste de tres pasos: la emisión estimulada, la amplificación de la luz y la inversión de la población. Pero, para lograr estos fenómenos, es necesaria una fuente de energía externa y por último para aumentar la ganancia, se deberá utilizar un resonador.

2.1.1 Emisión estimulada

En general, cuando un electrón se encuentra en un estado excitado, debe eventualmente decaer a un nivel inferior, emitiendo así un fotón. Este evento, se denomina emisión espontánea, donde el fotón es emitido en una dirección y fase aleatoria. El tiempo promedio que le toma a un electrón decaer, se denomina tiempo de emisión espontánea. Por otro lado, si un electrón se encuentra en un estado de energía E_2 , y su camino de caída es igual a E_1 , pero antes de que decaiga pasa un fotón con una energía aproximadamente igual a E_2 - E_1 , existe una probabilidad, de que el fotón que pasó, cause que el electrón caiga de una manera tal que el fotón emitido tenga la misma longitud de onda, exactamente la misma dirección y la misma fase que el fotón que pasó. Este procedimiento es la llamada emisión estimulada, un esquema se muestra en la figura 2.1.1. (Melles Griot, 2009)



Figura 2.1.1: Emisión espontanea y emisión estimulada (Melles Griot, 2009)

2.1.2 Amplificación de la luz

Si consideramos el mismo caso anterior, pero ahora un grupo de átomos que están en el mismo estado de energía y la mayoría está en el rango de estimulación del fotón que pasa, además, asumimos que el tiempo de emisión espontánea es muy largo y la probabilidad de emisión espontánea es cien por ciento. Este fotón interactúa con el primer átomo, como consecuencia, se consigue la emisión estimulada de un fotón. Estos dos fotones, interactúan con los siguientes dos átomos, resultando así en cuatro fotones coherentes. Multiplicándose así, los fotones que tienen la misma dirección, fase y longitud de onda resultan en el fenómeno que se conoce como amplificación de la luz. Hay que notar, que la energía necesaria para excitar los átomos, debe ser proporcionada

por una fuente de energía externa. Por otra parte, en cualquier población real de átomos, la probabilidad de lograr la emisión estimulada es bastante pequeña.

Esto se debe a que, generalmente van a haber más átomos en niveles inferiores de energía que en estados excitados. Por este motivo, para poder establecer la emisión láser, hay que invertir la población de átomos. Un esquema de esto se muestra en la figura 2.1.2. (Melles Griot, 2009)



Figura 2.1.2: Amplificación por emisión estimulada (Melles Griot, 2009)

2.1.3 Inversión de población

En realidad no hay solo dos niveles de energía, sino que existen muchos más niveles y cada uno de ellos tiene un tiempo de emisión espontánea diferente. Un diagrama de cuatro niveles de energía, tal como se muestra en la figura 2.1.3 es representativo para algunos láseres reales.



Figura 2.1.3: Sistema de cuatro niveles de energía (Melles Griot, 2009)

El electrón es excitado mediante bombeo energético, que permite al medio activo que sus átomos ocupen niveles energéticos mayores al fundamental. Suponiendo que el bombeo energético excita a un electrón hasta el nivel superior E_4 , éste decae al E_3 , posteriormente al E_2 , hasta llegar finalmente al nivel inferior E_1 . Supongamos que el tiempo que le toma al electrón decaer desde el nivel E_3 al E_2 , es mayor que el tiempo que le toma bajar del nivel E_2 al E_1 . En una gran población de estos átomos, en el equilibrio y con un proceso continuo de bombeo, la inversión de la población ocurriría entre el nivel E_3 y el E_2 y un fotón que pase por esta población será amplificado coherentemente. (Melles Griot, 2009)

2.1.4 Resonador Óptico

Aunque logremos la inversión de la población, la ganancia total obtenida será bastante pequeña, además, la mayoría de los átomos excitados emitirán espontáneamente y no permitirán que se forme el haz. Para lograr que el sistema funcione como láser, es necesario que la mayoría de los átomos en niveles excitados contribuyan al proceso. Para esto se utiliza un resonador, que es un sistema de espejos que reflejan los fotones indeseados fuera del sistema y los deseados son reflejados devuelta a la población de átomos, permitiendo que la emisión estimulada continúe, consiguiendo así una mayor amplificación, resultando en el haz láser. Un esquema de un láser que incluye un resonador, se puede apreciar en la figura 2.1.4. (Melles Griot, 2009)



Figura 2.1.4: Diagrama esquemático de un láser y su resonador (Melles Griot, 2009)

2.1.5 Características del haz láser

El haz láser, se presenta como un haz de radiación electromagnética que aparte de la potencia que posee, tiene otras propiedades como: la longitud de onda, coherencia, modo y polarización.

Longitud de onda: depende de las transiciones que se llevan a cabo por la emisión estimulada, además, la longitud de onda puede ser ampliada mediante el efecto Doppler o por las transiciones relacionadas con estados de energía superiores. Cada tipo de láser tiene una longitud de onda característica como se puede apreciar en la tabla 2.1.5. (Steen & Mazumder, 1991)

Dispositivo	Fuente de energía láser	Longitud de onda	Frecuencia	Energía E _p *	
Dispositivo		λ	v	E _p	
		μm	Hz	eV	$J \ge 1 \cdot 10^{20}$
Láser de electrones libres (FEL)	Movimiento magnético	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-11}$	1,00.10-6	$1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-5}$
Excímeros		0,24 (u/v)	$1,20 \cdot 10^{15}$	4,9	79,4
Argón	Orbita de los	0,48 (azul)	$6,10 \cdot 10^{14}$	2,53	40,4
He/Ne	ciccuones	0,63 (rojo)	$4,70 \cdot 10^{14}$	1,95	31,1
Nd-YAG	Vibración	1,06 (IR)	$2,80 \cdot 10^{14}$	1,16	18,5
СО	Molecular	5,4	$5,50 \cdot 10^{13}$	0,23	3,64
CO2		10,6	$2,80 \cdot 10^{13}$	0,12	1,85
* Energía calculada desde $E_p = hv$; $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$					

Tabla 2.1.5: Propiedades de los fotones emitidos por diferentes láseres (Steen & Mazumder, 1991)

• <u>Coherencia:</u> La luz láser se transmite de modo paralelo en una única dirección (coherencia temporal), en un haz muy estrecho que se propaga con mínima divergencia (coherencia espacial), lo que le permite recorrer grandes distancias sin perder intensidad. Esto, a diferencia de otras luces que se propagan en todas las direcciones en haces divergentes. La diferencia con el haz de luz natural, es que éste no forma una onda continua, sino que se propaga en todas las direcciones en haces divergentes. (Steen & Mazumder, 1991)



Figura 2.1.6: Comparación entre onda continua (producto de la coherencia) y onda aleatoria (Steen & Mazumder, 1991)

Modo: La onda que oscila en el resonador cilíndrico del láser, no solo presenta una onda longitudinal, sino que también una transversal. La amplitud de la onda transversal, se describe matemáticamente como la combinación de un perfil Gaussiano con un polinomio de Laguerre. El acrónimo TEM_{mn} hace referencia al modo electromagnético transverso, en donde m y n son números enteros que indican los órdenes radial y angular del polinomio de Laguerre para cada modo. El modo TEM₀₀ es el de menor orden y corresponde a una distribución gaussiana. A medida que aumenta m, los modos exhiben anillos de intensidad concéntricos, a medida que aumenta n se exhiben lóbulos de intensidad distribuidos angularmente como se puede apreciar en la figura 2.1.7. (Steen & Mazumder, 1991)



Figura 2.1.7: Distintos patrones de modos (Steen & Mazumder, 1991)

Polarización: La emisión estimulada no sólo produce una onda electromagnética continua, sino que también esta onda tiene todos sus vectores electromagnéticos alineados, es decir, el haz está polarizado. Esto provoca diferencias notorias en la calidad final en ciertos procesos, como es el caso del corte láser y el procesamiento de materiales, por este motivo se deberá despolarizar el haz. Esta despolarización logra un efecto de rotación en el haz o polarización circular, que elimina los problemas de calidad para algunos procesos como el corte mediante haz láser, en el caso del plaqueado esto no produce problemas. (Steen & Mazumder, 1991)

2.1.6 Propiedades Láser de CO₂

El láser de CO_2 , con el cual se desarrollará el presente trabajo, es uno de los más antiguos láseres de gas. Fue desarrollado por Kumar Patel, en los laboratorios Bell en 1964 y actualmente siguen teniendo un gran número de aplicaciones. Debido a la habilidad que poseen de producir muy alta potencia con una buena eficiencia de conversión eléctrica, este tipo de láser es muy útil para el procesamiento de materiales, como es el caso de los recubrimientos. (Melles Griot, 2009)

En cuanto a sus características, es un láser de cuatro niveles de energía que tiene una eficiencia hasta del 30%. El gas usado en el tubo de descarga está compuesto por CO_2 , He y N_2 en donde el CO_2 actúa como medio activo. Este tipo de láser, emite su haz en longitudes de onda infrarroja, es decir entre 9,4 y 10,6 µm y su potencia va desde 1 W hasta más de 10 KW. Su funcionamiento radica en la excitación del N_2 , el cual traspasa su energía en forma de vibraciones al CO_2 . La temperatura del gas se eleva, debido a las descargas, causando un decaimiento en la inversión de la población, afectando directamente, a la potencia de salida. Para esto, se utiliza He como refrigerante. (Ramos-Grez, 2009)

Al utilizar un láser de alta potencia, es importante seguir algunas medidas de seguridad que minimicen el riesgo a sufrir algún accidente, estas medidas se puede ver en el anexo A.

2.1.7 Interacción Láser-Materia

Al incidir el haz láser sobre una superficie, se produce una transferencia de energía de la región más próxima a la superficie. Esta transferencia energética, que se lleva a cabo en un período de tiempo extremadamente corto, involucra a procesos de excitación y desexcitación a nivel electrónico de los átomos y/o moléculas en la superficie del material.

Aunque la mayor parte del material no altere su temperatura considerablemente, la región superficial afectada por la transferencia de energía puede alcanzar tasas de calentamiento y enfriamiento de hasta 10^{10} K/s, esto puede derivar en cambios de estados y/o fases. (Montoya, 2005)

• <u>Absorción de la radiación</u>: Al incidir el haz láser sobre la superficie de un material, parte de la energía es reflejada y la otra penetra al interior de la pieza tal como se muestra en la figura 2.1.8.



Figura 2.1.8: Interacción del haz láser incidente con la superficie sólida del material irradiado. (Montoya, 2005)

En materiales opacos, la absorción se produce en un espesor muy pequeño en relación a las dimensiones totales de la pieza de trabajo. La cantidad de energía absorbida por el material depende de sus propiedades ópticas, que a su vez están relacionadas con la longitud de onda y temperatura. La ley de Beer-Lambert describe una primera aproximación a la intensidad de la luz que penetra en un material. (Montoya, 2005)

$$I_A(z,t) = I_0(t)(1 - E_r)e^{-(\alpha z)}$$
(2.1)

$$E_r = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k}$$
(2.2)

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{2.3}$$

Donde, I_A es la intensidad de la radiación a una profundidad z de la superficie en un tiempo t, I_0 es la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie, E_r es la fracción de energía reflejada, α es el coeficiente de absorción óptica, n es el índice de refracción, k es el coeficiente de extinción y λ corresponde la longitud de onda. La ecuación 2.3 será válida, siempre y cuando, existan efectos lineales dominantes, en caso contrario, α dependerá también de I_0 como es el caso en la absorción multifotónica. (Montoya, 2005)

• <u>Conducción Térmica</u>: Una delgada capa superficial de poca profundidad, absorbe gran parte de la energía incidente en el material. Esta profundidad de penetración expresada por δ , puede ser estimada a partir ecuación 2.4, donde α se determina a partir de la ecuación 2.3. La energía que incide sobre el material, es convertida en calor en un tiempo muy breve, consiguiéndose un perfil de temperaturas que depende tanto de la energía, como de la velocidad de difusión de calor *D*, que es una función de la conductividad térmica *K*, del calor específico C_p y de la densidad del material ρ , como su puede apreciar en la ecuación 2.5. Por último, la profundidad promedio *z*, a la cual el calor se difunde durante el período de tiempo de irradiación t_p , está dada por la ecuación 2.6. (Montoya, 2005)

$$\delta = \frac{2}{\alpha} \tag{2.4}$$

$$D = \frac{K}{\left(\rho \cdot C_p\right)} \tag{2.5}$$

$$z = \sqrt{4 \cdot D \cdot t_p} \tag{2.6}$$

• <u>Fusión</u>: Este fenómeno se produce, si la radiación absorbida es lo suficientemente intensa para que la superficie del material exceda su punto de fusión $T_{\rm m}$, ocasionándose así la fusión en un punto de la pieza de trabajo. Esto se produce, debido al avance de la interface sólido-líquido hacia el interior del material, produciéndose una pileta o charco fundido. (Montoya, 2005)



Figura 2.1.9: Movimiento convectivo, debido a la variación de la tensión superficial del charco. (a) $\partial \gamma / \partial T < 0$ (b) $\partial \gamma / \partial T > 0$ (Montoya, 2005)

Dentro de la pileta, se generan corrientes convectivas producidas por variaciones locales de la tensión superficial del líquido γ , como consecuencia de los gradientes de temperatura presentes en la interface sólido-líquido y esfuerzos de

corte que actúan sobre la interface. Esto produce un fenómeno de mezclado en el charco fundido (efecto Marangoni), tal como se muestra en la figura 2.1.9, el cual, será un factor relevante en los procesos de revestimiento con láser (Montoya, 2005). Además de producir el mezclado, se altera la geometría de la pileta, consiguiéndose una profundidad de fusión mayor cuando $\partial \gamma / \partial T$ es positivo.

<u>Vaporización</u>: Cuando la temperatura del material fundido, alcanza la temperatura de ebullición, se produce una delgada capa de vapor sobre la pileta. Este vapor está formado por moléculas y átomos, de los cuales algunos se ionizan en función de la temperatura, originándose iones y electrones libres que mejoran el acople de la energía láser.

En la pileta, la absorción de la radiación es mucho mayor que la absorción en el material sólido. Esto se debe a dos mecanismos: la ionización en avalancha y la ionización/absorción multifotónica. El primer mecanismo se produce, debido a que los electrones libres presentes en el material fundido oscilan y ganan energía. Al colisionar estos electrones con moléculas neutras presentes en el líquido, se da lugar a la ionización y a la generación de más electrones libres, proceso que sigue repitiéndose. La ionización y absorción multifotónica, se produce cuando una molécula en el charco fundido absorbe más de un fotón, en consecuencia, la molécula puede ionizarse o disociarse. Los electrones libres son acelerados por el campo magnético del haz láser, colisionando con las moléculas y átomos neutros presentes en el vapor, como consecuencia, estos se ionizan generando un proceso de avalancha. Al seguir aumentando la intensidad de la energía incidente el vapor se irá ionizando cada vez más, convirtiéndose finalmente en plasma, el cual se expandirá en todas direcciones. Se puede apreciar un esquema de este proceso en la figura 2.1.10. (Montoya, 2005)



Figura 2.1.10: Interacción del vapor o plasma formado con la superficie del charco de material fundido (Montoya, 2005)

2.2 Descripción de tratamiento superficial con láser y obtención de parámetros de interés.

El revestimiento por láser es un método que permite mejorar las propiedades superficiales de un metal, mediante la depositación de un material en polvo u otra forma con propiedades físicas deseables. Los efectos positivos que tienen estos tratamientos, están basados en cambios en la microestructura o en la composición de la capa superficial del material, debido al ciclo térmico que es inducido por el movimiento del haz láser. Como se explicó en el punto anterior, el área es calentada por el haz láser; debido a la absorción de la energía entregada, la tasa de calentamiento es bastante elevada, como también la tasa de enfriamiento, produciéndose un refinamiento de los granos y la formación de fases metaestables o microestructuras alteradas.

Existen tres grupos de tratamientos superficiales láser: sin fusión de la superficie, con fusión y con fusión de la superficie y material de aporte. Esto se muestra en la figura 2.2.1

Tanto el tratamiento que no funde la superficie del material, como el de fusión sin material de aporte, basan sus resultados en el cambio microestructural de su superficie. Sin embargo, puede ser necesario o más económico aplicar una capa de un material con otra composición encima del material base. (Schneider, 1998)



Figura 2.2.1: Esquema de fenómenos físicos durante distintos procesos de manufactura (Schneider, 1998)

Al agregar un polvo a la pileta de metal fundido, se alteran las propiedades superficiales, ya que, cambia la composición del material pudiéndose obtener tres tipos diferentes de productos dependiendo del tipo y la cantidad de material agregado. Se clasifican como: aleación, dispersión y plaqueado. Los distintos productos se muestran en la figura 2.2.2. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)



Figura 2.2.2(a) Aleación, (b) dispersión y (c) plaqueado. (ma: material de aporte, mb: material base) (Olivos, 2010)

La aleación láser, puede ser conseguido al introducir una pequeña cantidad de polvo en la pileta de material fundido, pudiéndose lograr una mezcla homogénea de materiales. La dispersión láser, es similar a la aleación pero el material no se mezcla homogéneamente, quedando una fracción del material aportado en estado puro. Por último en el plaqueado láser, consiste en la generación de una capa superficial de un material de distinta composición química, que contiene una cantidad suficiente de material base (mínima dilución entre material base y material aportado) para que ambos materiales estén los suficientemente adheridos y además se mejoren las propiedades superficiales del material base. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

La aplicación que se le da al plaqueado láser, tiene relación a las características que esta técnica puede mejorar, tal como la dureza superficial, la resistencia al desgaste, la resistencia a la abrasión y resistencia a la corrosión. Aunque este método no es el más económico con respecto al costo de producción, cualquier otra técnica no logrará bajas distorsiones térmicas, ni tampoco alcanzar los resultados de adhesión entre materiales. Esto producto de la adhesión metalúrgica entre dos líquidos (donde se maximiza la difusión y dilución) (Schneider, 1998).

Las ventajas que ofrece el plaqueado láser en comparación a otros procesos de tratamiento superficial son (Schneider, 1998):

- Buen control de la energía suministrada.
- Es posible un tratamiento muy localizado.
- Poca distorsión térmica.
- Alta tasa de calentamiento y enfriamiento.

2.2.1 Diferentes métodos de plaqueado láser.

Existen dos técnicas que actualmente se utilizan y que permiten lograr el revestimiento láser, el proceso de dos etapas y el proceso de una etapa. En ambas técnicas, se utiliza un polvo como material de aporte.

<u>Proceso de dos etapas</u>: En este proceso se debe realizar una primera etapa, consistente en la pre-depositación de una capa de polvo, para que en la segunda etapa el haz láser suministre la energía suficiente para fundir, primero el material aportado y luego el material base lográndose una fuerte adhesión. El polvo debe ser mezclado con un aglutinante, para que éste resista, a la fuerza impuesta por los flujos de gases, además este químico debe evaporarse del polvo durante el proceso, provocando una posible porosidad en la capa resultante. El proceso de dos etapas es útil cuando se realiza una sola pista de revestimiento, ya que, al realizar varias pistas adyacentes se producirá un aumento notorio en la dilución. (Schneider, 1998)



Figura 2.2.3: Proceso de dos etapas y proceso de una etapa.

<u>Proceso de una etapa:</u> Este proceso, inicia con la formación de la pileta de material base fundido. Simultáneamente, el material de aporte se suministra a través de una tobera, adhiriéndose inmediatamente al material base. Este proceso tiene varias ventajas en comparación al de dos etapas, ya que, se pueden realizar varias pistas adyacentes sin tener mayores problemas de dilución y también se puede variar el espesor de la capa depositada rápidamente. Existen dos métodos para suministrar el polvo: a través de un cable de alimentación o inyectando polvo mediante un gas. El primero es útil, cuando se realiza una pista continua de recubrimiento mediante la rotación de un producto simétrico. El segundo método, inyección de polvo, es más robusto que el primero, debido a que, no hay un contacto directo entre el polvo y la pileta por lo tanto el láser puede pasar a través de la nube de polvo, en vez de ser obstruido por el cable (Schneider, 1998). Este método será el utilizado en la presente investigación.
2.2.2 Alimentación de polvo

La alimentación de polvo, es una parte fundamental en el proceso de revestimiento mediante haz láser, ya que, su funcionalidad está estrechamente relacionada con la calidad final del revestimiento. Al existir diferentes polvos de distintas dimensiones, forma, propiedades físicas y mecánicas es prácticamente imposible utilizar un solo método para cada tipo de polvo. Un buen alimentador de polvo debe controlar de manera exacta la tasa de material aportado y además la nube de polvo debe ser continua y uniforme para lograr una buena calidad de revestimiento. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

<u>Alimentación mediante tornillo mecánico:</u> Este tipo de alimentador, permite el uso de polvos de distinto diámetro y generalmente, no existe una diferencia de presión entre la entrada del polvo y la salida de éste. Un esquema básico se puede ver en la figura 2.2.4. Consiste en un tornillo de Arquímedes, el cual trasporta el polvo uniformemente desde el contenedor hasta la salida del dispositivo. La principal desventaja que tiene este método, es que el polvo hace contacto con el tornillo, además si el polvo es abrasivo puede erosionar el interior del dispositivo, causando la contaminación del polvo. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)



Figura 2.2.4: Esquema de sistema de inyección de polvo, basado en tornillo de Arquímedes (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

El flujo de polvo que sale del dispositivo de alimentación, debe ser dirigido a la pileta de material fundido para lograr el recubrimiento. Para esto es necesaria la utilización de una tobera, que puede ser coaxial o lateral.



Figura 2.2.5: Inyección de polvo lateral (Schneider, 1998)

La tobera lateral (figura 2.2.5), permite trabajar en una pieza de cualquier forma, tan solo se debe adecuar el largo, la forma y el diámetro de la tobera. (Schneider, 1998)

El sistema utilizado en el trabajo realizado por Olivos (Olivos, 2010), consistió en una tobera lateral y un alimentador de tornillo mecánico.

2.2.3 Propiedades y parámetros importantes del revestimiento

Las propiedades del revestimiento (*clad*), se pueden clasificar en cuatro grupos tal como se muestra en la tabla 2.2.6. Generalmente, es difícil lograr un revestimiento que cumpla cada una de estas propiedades, pero se debe llegar a un balance entre varias de éstas. Por ejemplo, si se desea disminuir la probabilidad de formación de grietas, el sustrato debe ser precalentado, obteniéndose una menor dureza superficial. (Schneider, 1998)

Propiedades Geométricas	Propiedades Mecánicas	Propiedades Metalúrgicas	
Dimensiones de la pista	Distribución de Dureza	Micro-estructura	
Dilución geométrica	Tensiones residuales	Dilución metalúrgica	
Rugosidad	Resistencia al desgaste	Homogeneidad	
Simetría	Resistencia a la Tracción	Resistencia a la Corrosión	
Grietas	Adhesión		

Tabla 2.2.6: Propiedades del recubrimiento

En cuanto a los parámetros de interés del revestimiento, generalmente se asocian a la geometría, las que se muestran en la figura 2.2.7. En esta figura, h_c es el alto del *clad*, w_c el ancho, z_{max} la profundidad y θ el ángulo de mojado.



Figura 2.2.7: Geometría del revestimiento

Una gran variedad de parámetros operacionales y fenómenos físicos, determinan la calidad del revestimiento, algunos de estos parámetros operacionales dependen del láser, el alimentador de polvo, las propiedades de los materiales y las condiciones ambientales en que se lleva a cabo el procedimiento. Estos afectan directamente a la calidad del

revestimiento, geometría, microestructura, formación de grietas, porosidad, rugosidad, pureza, tensiones residuales y dilución. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

<u>Dilución</u>: La dilución tiene dos definiciones, geométrica y metalúrgica. La primera tiene relación con las dimensiones descritas en la figura 2.2.7. De acuerdo de estos parámetros, la dilución es:

$$f_{dil}^{g} = \frac{z_{\max}}{h_c + z_{\max}}$$
(2.7)

Alternativamente, la dilución puede ser definida, como el porcentaje del volumen total de la capa superficial contribuida por la fusión del material base, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$f_{dil}^{m} = \frac{\rho_{c}(x_{c+s} - x_{c})}{\rho_{s}(x_{s} - x_{c+s}) + \rho_{c}(x_{c+s} - x_{c})}$$
(2.8)

donde ρ_c es la densidad del polvo fundido [kg/m³], ρ_s es la densidad del material base [kg/m³], x_{c+s} es el porcentaje en peso total del elemento x en la superficie del revestimiento [%], x_c es el porcentaje en peso total del elemento x en el polvo [%] y x_s es el porcentaje en peso total del elemento x en el material base [%]. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

<u>Porosidad</u>: La presencia de pequeños agujeros en el revestimiento, se denomina porosidad. Puede ser causada por: aparición de burbujas de gas atrapadas al momento de la solidificación de la pileta fundida, solidificación en distintas direcciones, que dejan una región encerrada, presencia de suciedad en la superficie del material base como por ejemplo grasa y al realizar varias pistas adyacentes, tal como se muestra en la figura 2.2.8.



Figura 2.2.8: Porosidad presente al realizar varias pistas adyacentes (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

<u>Angulo de mojado</u>: Este parámetro, junto a la energía libre interfacial determinan la calidad del revestimiento. En general, existen tres tipos de secciones posibles al realizarse el revestimiento láser, tal como se muestra en la figura 2.2.9. Estas secciones, muestran la cantidad de dilución, el correspondiente ángulo de mojado θ y las energías libres interfaciales γ [J/m²]. Se pueden considerar tres energías libres interfaciales, la energía libre sólido-líquido γ_{SL} , la energía libre sólido-vapor γ_{SV} y la energía libre líquido-vapor γ_{LV} .



Figura 2.2.9: Revestimientos resultantes según ángulo de mojado. a) alta dilución, b) revestimiento ideal, c) no hay dilución

Un balance entre las mencionadas energías libres interfaciales gobierna la forma resultante de revestimiento. Este balance puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos(\theta) \tag{2.9}$$

A medida que $cos(\theta)$ tienda a 1, más dilución existirá, esto sucede al aumentar la potencia del láser. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

<u>Otros parámetros importantes:</u> Estos parámetros, son una combinación de los mostrados anteriormente. El primero es la relación de aspecto, que es el cociente entre el ancho y el alto del *clad* tal como se muestra en la ecuación 2.10. Otros dos parámetros tienen relación con la potencia del láser P_w [W], la velocidad del proceso U [mm/s], el radio del haz láser r_l [mm] y el flujo másico de polvo \dot{m} [g/s]. Estos parámetros, corresponden a las ecuaciones 2.11 y 2.12. Estos tres parámetros, nos permiten determinar la zona en que se logra una buena unión entre el material aportado y el material base tal como se muestra en la figura 2.2.10. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)



Figura 2.2.10: Correlación entre relación de aspecto, parámetros combinados, potencia por diámetro del haz, flujo másico y factibilidad de realizar el revestimiento por inyección de polvo. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)

$$AR = \frac{w_{max}}{h_c}$$
(2.10)

$$Parámetro 1 = \frac{P_w}{2\dot{m}r_l}$$
(2.11)

$$Parámetro \ 2 = \frac{P_W}{2r_l U} \tag{2.12}$$

2.3 Introducción al modelo de Transferencia de Calor y Fusión Superficial

El revestimiento mediante haz láser, es un proceso complicado de controlar ya que existen interacciones entre el haz, el polvo y la pileta, estando todas éstas estrechamente

relacionadas con los parámetros mencionados en el punto anterior. Por este motivo, se han desarrollado diversos modelos que permiten entender mejor el proceso.

2.3.1 La física del proceso

Al llegar el haz láser a la superficie del material, una parte de la energía se absorbe, formando una pileta de material fundido. La fracción restante de energía, es absorbida por la nube de polvo, las cuales aumentarán su temperatura e ingresarán al charco. Este proceso, puede ser descrito matemáticamente por la ecuación de conservación de energía (ecuación 2.13). (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

A medida que el polvo fundido ingresa en el material base, la forma en que se transfiere la energía cambia a un mecanismo convectivo. Durante este fenómeno, las partículas de polvo son mezcladas rápidamente en la pileta. Esta etapa del proceso puede ser expresada matemáticamente por las ecuaciones de conservación de energía (ecuación 2.13), conservación de momentum (ecuación 2.14) y de continuidad (ecuación 2.15). (Carslaw & Jaeger, 1959)

$$\frac{\rho C_p \partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho C_p U_t T\right) - \nabla \cdot \left(k \nabla T\right) = Q$$
(2.13)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \rho g - \nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla u)$$
(2.14)

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{2.15}$$

Donde, Q es la potencia por unidad de volumen de material base [W/m³], k es la conductividad térmica del material base [W/m·K], C_p es el calor específico del material base [J/kg·K], ρ es la densidad del material base [kg/m³], t es el tiempo [s], y U_t es la velocidad de la fuente de calor [mm/s] y u es la velocidad del fluido.

Estas ecuaciones pueden ser resueltas analíticamente sólo en algunos casos, generalmente se resuelven numéricamente, simplificando algunos términos. Además, hay que considerar algunas complicadas condiciones de borde, para que estas ecuaciones representen efectivamente al fenómeno de revestimiento mediante haz láser. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

Además de las ecuaciones mostradas anteriormente, existen modelos sencillos, que permiten evaluar la factibilidad de realizar el revestimiento, tomando en cuenta tanto las condiciones en que se realizará el procedimiento, como también los materiales a utilizar.

2.3.2 Energía absorbida y temperatura de las partículas de polvo

Otro punto importante para tener en cuenta, al momento de realizar el proceso de revestimiento láser, es la cantidad de energía que absorberá el polvo y la temperatura a la que estará al momento de llevar a cabo el procedimiento.

Durante el proceso de revestimiento láser, las partículas de polvo son calentadas durante el vuelo hacia la superficie de la pieza de trabajo, almacenando energía que posteriormente se transmite al material base. Aunque, determinar la temperatura de las partículas de polvo puede ser muy complicado, se utilizó un modelo más sencillo propuesto por L. Han *et al.*, 2004, quien realizó una simplificación del modelo propuesto por Jouvard *et al.*, 1997. En este modelo, se considera que durante la interacción entre el láser y las partículas de polvo, se absorbe una cantidad de energía que depende de las propiedades del material. Esto quiere decir, que la entalpia del material aportado aumenta según la ecuación 2.16.

$$dH_p = \frac{S_P}{S} \eta_p P_t(z) \frac{d_z}{V_p}$$
(2.16)

donde, H_p es la entalpía, S_P es el área de la sección transversal de la partícula, S es el área de haz láser colimado, V_p es la velocidad a la que viaja la partícula, η_p es el coeficiente de absorción de energía de la partícula y P_t es la potencia transmitida a través de la nube de partículas. Una de las simplificaciones realizadas, fue asumir que la potencia transmitida P_t , que depende de las propiedades del material y del láser, es equivalente a la potencia inicial del láser. Al integrar numéricamente la ecuación 2.20 y transformar la ecuación de entalpía, que considera el calor latente de fusión, se obtiene la ecuación 2.17, que permite determinar un valor aproximado de la temperatura a la que incide el polvo en la superficie de la pieza de trabajo. (Han, 2004)

$$T_{p} = \begin{cases} T_{i} + \frac{\Delta h}{m_{p}C_{p}} , if h_{p} \leq h_{s} \\ T_{m} , if h_{s} \leq h_{p} \leq h_{l} \\ T_{i} + \frac{\Delta h - \Delta L_{p}}{m_{p}C_{p}} , if h_{p} > h_{l} \end{cases}$$

$$(2.17)$$

donde T_i es la temperatura inicial de las partículas de polvo, m_p es la masa de la partícula, C_p es el calor específico de la partícula, ΔL_p es el calor latente de fusión de la partícula, H_p es la entalpia contenida en la partícula, h_s y h_l es la entalpia contenida en la partícula a la temperatura solidus y liquidus respectivamente. Además $\Delta h = h_s - h_l$.

Por otra parte, la potencia del láser que incide sobre la superficie del material base, se ve atenuada debido a que, el haz debe traspasar una nube de polvo que es capaz de absorber parte de la energía del láser. La atenuación de la potencia del láser depende de la potencia inicial del láser P_{ω} , el coeficiente de extinción Q_{ext} , el flujo másico \dot{m} , de la distancia que deben viajar las partículas de polvo l, del radio de la partícula r_p , del área que cubre la nube de polvo D_P^2 , de la densidad ρ_c , del material en polvo y de la velocidad con que se mueven las partículas V_P . Para el caso de una tobera lateral, la ecuación 2.18 determina la potencia atenuada. (Han, 2004)

$$P_{att} = P_{\omega} \left[1 - \exp\left(-\frac{3Q_{ext}\dot{m}l}{\pi r_p D_P^2 \rho_c V_P}\right) \right]$$
(2.18)

2.3.3 Vaporización de la superficie

La incidencia del haz láser sobre la superficie del metal, puede producir un alza en la temperatura suficiente como para exceder el punto de vaporización del metal en un corto período de tiempo, llevándose a cabo una rápida evaporación de la superficie (Mundra & Debroy, 1993). El flujo con el cual sale el material desde la pileta, depende principalmente de la potencia de láser y del tiempo de interacción. La tasa de vaporización, se puede calcular al considerar el siguiente balance de energía, en la interfaz vapor-líquido. (Sankaranarayanan & Kar, 1999)

$$AI + k_l \frac{\partial T}{\partial z} = \rho_l \dot{S}_v L_v \tag{2.19}$$

La ecuación 2.19 es la ecuación de Stefan, en donde *A* corresponde a la absorción de la superficie, k_l y ρ_l corresponde a la conductividad térmica y la densidad del líquido, L_v corresponde al calor latente de vaporización, \dot{S}_v corresponde a la velocidad de la interfaz vapor-líquido, *I* es la densidad de potencia del haz láser que queda determinada por la ecuación 2.21. (Sankaranarayanan & Kar, 1999)

$$I_0 = \frac{2}{\pi r_l^2} P_w \tag{2.20}$$

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2}{r_l^2}r\right)$$
(2.21)

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{2.22}$$

La velocidad de la interfaz vapor-líquido, alcanza un valor constante cuando en un estado cuasi-estacionario, dependiendo del volumen de plasma y de la temperatura que se alcance.

Finalmente, el flujo de vapor que sale de la superficie del material base, J [kg/m²s], se puede calcular mediante la ecuación 2.23

$$J = \dot{S}_{\nu} \rho_l \tag{2.23}$$

2.4 Modelos presentes en la literatura

Durante los últimos 25 años, han ido en aumento los estudios relacionados con soldadura, aleación y plaqueado utilizando un haz láser como fuente de calor. Esto, probablemente se debe a los grandes beneficios que ofrece este método en la fabricación y reparación de piezas. Muchos de estos investigadores han desarrollado modelos analíticos y/o de elementos finitos para poder entender de una manera más completa el fenómeno.

Uno de los primeros modelos que se pueden encontrar en la literatura fue el realizado por Chande y Mazumder en 1985, el cual, consistió en el desarrollo de un modelo numérico en dos dimensiones, que resolvía la ecuación de convección difusa transiente, dentro de la pileta para el proceso de aleación láser. Esta investigación, permitió determinar que las partículas de polvo inyectadas se fundían instantáneamente al llegar a la pileta y que la cantidad de soluto aumenta linealmente, al aumentar la cantidad de soluto inyectado. (Chande & Mazumder, 1985).

Un poco antes que T. Chande, T. Debroy desarrollaba junto a A. Khan en el año 1984 una investigación sobre la tasa de vaporización, composición del plasma y los cambios en la composición de la soldadura, durante el proceso de soldadura mediante haz láser. En esa investigación, lograron desarrollar un método para determinar la temperatura superficial utilizando como indicador la cantidad de material vaporizado. (Debroy & Khan, 1984).

T. Debroy, ha seguido aportando con nuevas investigaciones, que han permitido complementar aun más el entendimiento de los procesos de soldadura, aleación y plaqueado. Es así como el año 2006, publica una investigación que consistió en la determinación de la expulsión de metal líquido durante la soldadura láser del acero inoxidable 304. En esa investigación T. Debroy junto a X. He, J. T. Norris, P. W. Fuerschbach descubrieron, que debido a las altas temperaturas presentes en la superficie

del metal base, las cuales pueden superar el punto de ebullición del metal, la presión de equilibrio en la pileta es mayor que la presión atmosférica y el vapor que sale de la pileta ejerce una gran presión en la superficie de la pileta. Como consecuencia de esto, el metal fundido puede salir eyectado. (Debroy, He, Norris, & Fuerschbach, 2006)

En el año 1994, M. Picasso, CF. Marsdan, J.D. Wangniere, A. Frenk y M. Rappaz publican una investigación que se tituló "A Simple but Realistic Model for Laser Cladding". Como dice el título de esta investigación, se desarrolló un modelo analítico simple que consideraba los principales fenómenos que ocurren durante el plaqueado láser. Este modelo se desarrollo en un ambiente en 3D, con el cual, se obtuvieron resultados que concordaban bastante bien con los resultados experimentales. (Picasso, Marsden, Wagniere, Frenk, & Rappaz, 1994)

Ese mismo año M. Picasso, junto a A. Hoadley desarrollan un modelo de elementos finitos estacionario, que incluía convección en la pileta de metal fundido. En esta investigación encuentran que el efecto que produce las fuerzas termo-capilares en la geometría de la pileta es importante, además, este efecto puede tener consecuencias en la microestructura de la muestra. (Picasso & Hoadley, 1994)

Así como estas investigaciones, muchas otras se han enfocado en representar el problema del plaqueado láser mediante un modelo de diferencias finitas. Otros ejemplos son los modelos desarrollados por E. Toyserkani, el cual consistió en un modelo tridimensional en estado transiente para investigar los efectos del láser pulsado en la geometría del plaqueado (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004), L. Han desarrolló un modelo de plaqueado láser con tobera coaxial que incluyó la interacción entre láser-sustrato, láser-polvo y polvo-sustrato (Han, 2004) entre otros.

2.5 Descripción del software de simulación COMSOL Multiphysics

La simulación por computador se ha vuelto una parte importante tanto en el mundo de la ciencia como en la ingeniería. Hoy en día, hay una amplia gama de opciones de simulación disponibles, pero la principal preocupación de los investigadores, es si pueden confiar en los resultados obtenidos. Para poder confiar en los resultados, es necesario que el modelo represente con la mayor precisión posible lo que sucede en el mundo real.

COMSOL Multiphysics es un paquete de modelación para la simulación de fenómenos físicos complejos. Está provisto por distintos algoritmos y resolvedores que permiten resolver problemas complejos, siempre y cuando, éstos puedan ser descritos por ecuaciones diferenciales (COMSOL Multiphysics., 2010). Además, cuenta con varias plantillas de modelado predefinidas (figura 2.5.1), las cuales, pueden ser modificadas para obtener aplicaciones más específicas.

Una de las grandes ventajas que ofrece COMSOL Multiphysics, es la posibilidad de acoplar las distintas plantillas de modelado predefinidas, permitiendo recrear con mayor precisión los problemas del mundo que nos rodea. (COMSOL Multiphysics., 2010)



Figura 2.5.1: Módulos de modelación predefinidos versión 4.0 (COMSOL Multiphysics., 2010)

COMSOL Group fue fundada en Julio de 1986 por Svante Littmarck y Farhad Saeidi en Estocolmo, Suecia (COMSOL Multiphysics., 2010). El producto que desarrollaron, fue denominado FEMLAB, por *"finite element modeling"* o modelamiento por elementos finitos. Su aparición en el mercado, sería recién en 1998. Este software, permitía resolver problemas multifísicos basados en ecuaciones diferenciales parciales. En septiembre de 2005, se decidió cambiar el nombre de FEMLAB a COMSOL. Cada cierto tiempo al software se le han ido integrando nuevos módulos llegando hoy a once módulos (figura 2.5.1).

La versión de COMSOL Multiphysics utilizada para el desarrollo de esta investigación, es la 4.0, la interfaz de esta versión se puede apreciar en la figura 2.5.2. Aunque, una desventaja muy grande con respecto a las versiones anteriores, es la dificultad de visualizar las ecuaciones que se están resolviendo, problema que es solucionado en la versión 4.1.



Figura 2.5.2: Interfaz de COMSOL 4.0 (COMSOL Multiphysics., 2010)

2.5.1 Validación de COMSOL (numérico vs. analítico)

Sin duda, COMSOL es una herramienta poderosa y simple de utilizar, pero es importante saber si los resultados obtenidos mediante este software son confiables. Para esto, se desarrolló un problema simple, el cual posee una solución analítica conocida.

El ejemplo realizado, se obtuvo de un paper titulado "An Axisymmetric Finite Volume Formulation for the Solution of Heat Conduction Problems Using Unstructured Meshes" desarrollado por Lyra, Lima Carvalho y da Silva el año 2005. En este paper se muestra el desarrollo de un código, capaz de resolver problemas de transferencias de calor axisimétricos y de volumen finito. Además, compararon los resultados obtenidos utilizando el modelo, con los resultados analíticos. Esto nos permitirá comparar los resultados obtenidos mediante COMSOL, con los resultados obtenidos en este paper.

El problema desarrollado consistió en un cilindro de radio 5 m y alto de 5 m, que inicialmente se encuentra a una temperatura de 30°C. El manto del cilindro, se encuentra una temperatura de 0°C (Lyra, Lima, & Carvalho, 2005). En la figura 2.5.3 se puede observar las condiciones de borde del problema.



Figura 2.5.3: Condiciones de borde. (Lyra, Lima, & Carvalho, 2005)

Las propiedades físicas del cilindro, se observan en la tabla siguiente.

Conductividad térmica	k	15,1	W/mK
Calor específico	C_p	480	J/kgK
Densidad	ρ	8055	kg/m ³

Tabla 2.5.4: Propiedades físicas del cilindro.

Los resultados obtenidos por Lyra y colaboradores en términos de la distribución de temperatura se muestran en las figuras 2.5.5 y 2.5.6.



Figura 2.5.6: Distribución radial de temperatura en el cilindro en z = 0, en t = 110 h, t = 345 h y t = 555 h respectivamente. (Lyra, Lima, & Carvalho, 2005)

El problema se introdujo en COMSOL, utilizando el modulo de transferencia de calor prediseñado, el cual contiene las ecuaciones necesarias para resolver el problema. Como condiciones de borde se utilizó:

- Temperatura: $T = 0^{\circ}$ C en el manto del cilindro.
- Aislación Térmica: $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ en las bases del cilindro.

Como condición inicial, se introdujo la temperatura del cilindro en t = 0 que corresponde a 30°C. Finalmente, se resolvió el problema para un tiempo de 2000 horas.

Detalles de la simulación:

- Modelo: tridimensional
- Resolvedor: iterativo y dependiente del tiempo (GMRES)
- Tiempo de resolución: 112,067 s
- Número de grados de libertad: 1593
- Número de elementos en la malla: 961 (elementos tetraédricos)

Los resultados obtenidos por COMSOL fueron los siguientes:



Figura 2.5.7: Distribución de temperatura en el cilindro en z = 0, r = 3 m



Figura 2.5.8: Distribución radial de temperatura en el cilindro en z = 0, en t = 110 h, t = 345 h y t = 555 h, respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos por COMSOL, con los resultados obtenidos por el modelo desarrollado por Lyra, Lima, Carvalho y da Silva se obtiene lo siguiente.



Figura 2.5.9: Distribución de temperaturas z = 0, r = 3 m. Comparación COMSOL, analítico vs. numérico. (Lyra et.al)





Se puede apreciar en las figuras 2.5.9 y 2.5.10 que las diferencias presentes en los resultados obtenidos mediante COMSOL existen, pero son menores, no superando 3% de error. Con esto, podemos confiar en que los resultados obtenidos representan bien el fenómeno a estudiar.

2.6 Desarrollo del modelo computacional en COMSOL Multiphysics

El modelo computacional desarrollado, se basa en términos de la potencia que ingresa y sale de la pileta fundida, considerándolo en un estado pseudo-estacionario. También se consideró, el efecto producido por los cambios de fase, sólido-líquido y líquido-vapor, además de la estimación del vapor que escapa de la pileta de metal fundido. Aunque el modelo incluye todas las características más importantes de este problema, fue necesario establecer algunas simplificaciones las cuales se detallan a continuación.

2.6.1 Simplificaciones y supuestos

1. La radiación emitida por el láser de potencia inicial P_w viaja a través de un haz circular de radio constante r_l centrado en el eje z. Además, se asume que la potencia del haz se distribuye de forma uniforme, asemejándose un modo transversal TEM₀₀. Esto se asemeja bastante al haz producido por un láser de CO₂.



Figura 2.6.1: Distribución Gaussiana de la densidad de potencia en función del eje x para distintas potencias: 300 W, 400 W, 500 W y 600 W

- 2. Las partículas de polvo se consideraron como partículas esféricas idénticas de radio r_p . Esta es una buena aproximación para polvos atomizados mediante un gas. Esta simplificación, puede tener un efecto significativo en el resultado de proceso, pero las comparaciones entre distintos experimentos y tipos de láseres siguen siendo válidas, sin importar la morfología de las partículas.
- 3. El material de aporte en polvo, fluye a una velocidad uniforme V_p , a una distancia *l* del punto de interacción entre el láser y el material base y a 45° del eje z. Además, no se consideran choques entre las partículas.



Figura 2.6.2: Montaje tobera lateral

4. El ancho de la pileta w_{max} es equivalente al diámetro del láser en el punto de interacción con el material (figura 2.6.3). Generalmente, en los modelos de dos dimensiones se considera que ambos son iguales. Además, se considera que la sección transversal de la pileta es circular, lo que concuerda con la geometría obtenida experimentalmente.



Figura 2.6.3: Diámetro haz láser equivalente a ancho de la pileta.

- 5. La absorción de la energía, tanto del material base como de las partículas de polvo es constante durante la irradiación debido al corto período de interacción entre el haz, las partículas de polvo y el material base.
- 6. No se consideran pérdidas de calor por convección o radiación desde las partículas, debido al corto período de interacción con el láser. Además, se determinó analíticamente que la cantidad de energía que absorben las partículas de polvo es menor al 2% de la cantidad de energía que llega a la superficie del material base.
- 7. Se resolvió el problema como un proceso cuasi-estacionario. Según Laveda (Laveda, 1978) esto quiere decir, que es un proceso termodinámico que ocurre infinitamente lento. Un proceso cuasi-estacionario, generalmente asegura que el sistema va a pasar a través de una secuencia de estados que están infinitesimalmente cerca del equilibrio. En la práctica, se refiere a que $\partial T/\partial t$ y

 $\partial u/\partial t$ tienden a 0. Se diferencia del estado estacionario en donde las variables de estado (temperatura, presión, volumen, etc.) no varían.

2.6.2 Condiciones de Dominio y de Borde

La formulación del problema, en COMSOL Multiphysics, requiere la generación de una o más geometrías que funcionan como dominios. En estos dominios se les aplicarán las ecuaciones diferenciales correspondientes a los fenómenos físicos que ocurren. Cada uno de los bordes de esta geometría, deberá tener las condiciones suficientes para representar fielmente lo que sucede en el proceso de plaqueado láser.



Figura 2.6.4: Configuración geométrica de los dominios, visto desde la interfaz de COMSOL Multiphysics. Unidades en mm

Los dominios que se generaron fueron dos, ambos hacen referencia al material base pero el dominio de menor tamaño (dominio 2), corresponde a la fracción de material que interactúa con el haz láser y cambia de estado de sólido a líquido. En la figura 2.6.4 y en la figura 2.6.5 se puede apreciar la configuración geométrica de los dominios.



Figura 2.6.5: Configuración geométrica de los dominios, visto desde la interfaz de COMSOL Multiphysics

Cada una de las caras de los dominios, posee las condiciones necesarias para que el problema quede completamente determinado y pueda resolverse mediante el software. A continuación, se describirán cada una de las ecuaciones utilizadas en los dominios y bordes.

2.6.2.1 Dominio 1

Este dominio al no cambiar de fase, solo resuelve la ecuación de conservación de energía, siendo esta la ecuación 2.13 modificada para el estado cuasi-estacionario. El modelo que se debe utilizar en COMSOL para este dominio, corresponde al de trasferencia de calor en cuerpos sólidos.

$$\rho C_{pS}(\nabla T) - \nabla \cdot (k_S \nabla T) = Q \tag{2.24}$$

2.6.2.2 Domino 2

Este dominio es que le presenta mayor complejidad, ya que, se deben resolver a través de COMSOL dos modelos físicos, obteniendo resultados para la ecuaciones de conservación de energía (ecuación 2.13), la ecuación de conservación de momentum (ecuación 2.14) y la ecuación de continuidad (ecuación 2.15). Para esto, en COMSOL se deben utilizar los módulos *"Heat Transfer"* y *"Laminar Flow"*, que son librerías que vienen incluidas en COMSOL Multiphysics. El primer módulo contiene las ecuaciones de transferencia de calor, y el segundo las ecuaciones relacionadas con el movimiento del fluido. Estos módulos se acoplan mediante la temperatura. Además, hay que introducir las modificaciones a las ecuaciones que se muestran a continuación (ecuaciones 2.29 - 2.36) para que permitan acercarse más al fenómeno de plaqueado láser. Esto, porque el módulos utilizados no incluyen los efectos que se producen cuando el metal cambia de fase, ni tampoco determina cuanto metal vaporizado deja la pileta.

Lo primero que se adicionó al modelo predefinido por COMSOL fue el cambio de fase, para esto, se definió la fracción líquida f_L y se asumió que ésta varía linealmente con la temperatura en la región de transición sólida-líquida.

$$f_{L} = \begin{cases} 1, & si \ T > T_{L} \\ \frac{T - T_{S}}{T_{L} - T_{S}}, & si \ T_{S} \le T \le T_{L} \\ 0, & si \ T < T_{L} \end{cases}$$
(2.25)

donde, T_S corresponde a la temperatura solidus y T_L corresponde a la temperatura liquidus.

Para poder seguir con la forma clásica de la ecuación de transferencia de calor se define $C_p^{eq} = C_p + L_f f_L / (T_m - T_0)$, en donde L_f corresponde al calor latente de fusión, obteniéndose de esta forma la siguiente ecuación de transferencia de calor incluyendo el cambio de fase de sólido a líquido. Para el cambio de fase de líquido a vapor el procedimiento utilizado fue similar (Traidia, Roger, & Guyotv, 2010).

El movimiento del haz láser se simuló mediante el módulo de movimiento de translación o "*translational motion*", este módulo permite asignar una velocidad en cualquier dirección (según los ejes coordenados) a un dominio. Finalmente, al introducir todas estas modificaciones a la ecuación de conservación de energía, la ecuación resultante es la siguiente:

$$\rho C_p^{eq} U_t(\nabla T) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q$$
(2.26)

Aunque esto ya es un gran avance para poder introducir el efecto del cambio de fase en la ecuación de transferencia de calor, es necesario que las propiedades del material varíen con la temperatura, para esto, se utilizaron las siguientes ecuaciones (Han, 2004).

$$C_p = C_{pS}(1 - f_L) + C_{pL}f_L$$
(2.27)

$$k = k_S (1 - g_L) + k_L g_L$$
 (2.28)

$$f_L = \frac{g_L \rho_L}{\rho}, \qquad f_L + f_S = 1, \ g_L + g_S = 1$$
 (2.29)

En donde ρ_S , C_{pS} y k_S corresponden a la densidad, calor específico y conductividad térmica del metal en estado sólido y ρ_L , C_{pL} y k_L corresponden a la densidad, calor específico y conductividad térmica del metal en estado líquido. Obteniéndose así, las propiedades del metal cuando la temperatura sobrepasa el punto de fusión. Integrando en el modelo, los efectos del cambio de fase. Con esto se obtiene el gráfico de la figura 2.6.6



Figura 2.6.6: Cambios de calor específico del material base considerando cambio de fase.

Una segunda modificación se introdujo en la ecuación de conservación de momentum (ecuación 2.14), en donde el término ρg es reemplazado por una fuerza volumétrica, fuerza de empuje (Kou, 1986), que se presenta en la pileta y se expresa como:

$$F_V = \rho_L (1 - \beta (T - T_L))g$$
 (2.30)

En donde ρ_L corresponde a la densidad del material en estado líquido, β corresponde al coeficiente de expansión térmica y T_m la temperatura a la cual se funde el material. Finalmente, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho(u \cdot \nabla u) = \rho_L (1 - \beta (T - T_m))g - \nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla u)$$
(2.31)

2.6.2.3 Condiciones de Bordes

Para poder ahorrar tiempo de procesamiento, se dividió la geometría en dos dominios con densidad de mallas distintas. Cada lado de las geometrías debe tener una condición que permita resolver de forma correcta el problema.

1. Superficie del material base y lados



Figura 2.6.7: Bordes: (a) lados (b) superficie. En estas fronteras se aplican la condición de radiación.

Para este lado de la geometría, se consideró que irradia el calor absorbido hacia el aire (ecuación 2.32)

$$-k\frac{\partial T}{\partial z} = \sigma e(T^4 - T_0^4) \tag{2.32}$$

Donde, σ corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann, ε es la emisividad de la superficie y T_0 es la temperatura ambiente.

2. Superficie del material base que interactúa con haz láser



Figura 2.6.8: Superficie de interacción láser-materia.

En esta zona de la geometría, el haz láser interactúa con el material produciéndose un aumento en la temperatura y cambio en las propiedades del material.

Se consideró en el modelo la emisión de radiación desde la superficie al ambiente tal como en el punto anterior (ecuación 2.32) pero además se le agrega el efecto Marangoni que hace relación con la tensión superficial del fluido. Este efecto se describe agregando la siguiente ecuación (Kou, 1986) en el modelo:

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}$$
(2.33)

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}$$
(2.34)

$$w = 0 \tag{2.35}$$

Donde u, v y w son componentes de la velocidad del fluido, en donde u corresponde a la velocidad del fluido en el eje x, v corresponde a la velocidad del fluido en el eje y, wcorresponde a la velocidad del fluido en el eje z, γ corresponde a la tensión superficial del metal fundido. $\partial \gamma / \partial T$ corresponde a la variación de la tensión superficial con la temperatura y μ corresponde a la viscosidad dinámica, en el caso de metales puros se considera constante supuesto que será tomado en cuenta en esta investigación. (Han, 2004).

3. Cara inferior del material base



Figura 2.6.9: Borde: base. Frontera a la cual se le aplica la condición de temperatura inicial

Esta parte se encuentra apoyada en la mesa de trabajo, por lo tanto no se considera que emita radiación a la superficie. La única condición de borde que aplica en este lado de la geometría corresponde a la temperatura inicial.

$$T = T_0 \tag{2.36}$$

4. Manto de la semiesfera.



Figura 2.6.10: Borde: Manto de la semiesfera.

Este borde delimita las características posibles que posee el material al interactuar con el haz láser. Desde este límite hacia el interior, el material puede estar en estado sólido, líquido o vapor, hacia el exterior el material puede estar solo en estado sólido. Por lo

tanto, este borde tiene que condicionar la velocidad del fluido tal como se muestra en la ecuación 2.37. Además, se introduce la ecuación 2.38 como condición térmica en el manto.

$$u = v = w = 0$$
 (2.37)

$$T_s = T_L \tag{2.38}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados y discusión obtenidos durante esta investigación.

3.1 Comparación de los resultados la simulación, con resultados obtenidos en la experimentación

En un trabajo previo (Olivos, 2010), se realizó una serie de experimentos de plaqueado láser utilizando como material de aporte cromo. La figura 3.1.1 muestra una pista de cromo sobre acero SAE1020, resultado del experimento realizado por Olivos.



Figura 3.1.1: Geometría de la pileta obtenida experimentalmente para potencia 402 W, flujo másico 5,5 g/min, velocidad de escaneo 2 mm/s. (Olivos, 2010)

En esta figura se puede apreciar la geometría de la pileta y de la pista. Las dimisiones fueron son las siguientes:

- La altura de la pista h_c : 198 μm
- La profundidad de fusión z_{max} : 173 μm
- El ancho de la pileta de w_{max} : 603 μm
- Ángulo de mojado de θ : 68°.

Los resultados de este experimento, fueron los que se utilizaron para validar el modelo computacional desarrollado durante esta investigación. Para esto, se resolvió el modelo con los mismos parámetros de potencia, flujo másico de polvo, velocidad de escaneo y radio del haz láser. Además, se consideraron dentro del modelo las propiedades del material base, acero SAE1020, y del material de aporte, cromo. Estos parámetros se puede ver el en anexo B.

El experimento fue realizado con una distancia focal fija de 131 mm, con potencias entre 300 y 500 W y 3 niveles de polvo: 0,05, 2.5 y 5,5 g/min. Se utilizó gas argón para evitar que las muestras se oxidaran. Al obtener los resultados, estos se normalizaron en función del radio experimental promedio 0,5 mm y luego se graficaron los resultados obtenidos en la simulación vs. los resultados obtenidos en la experimentación (figuras 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4)


Figura 3.1.2: Ancho fusión. Gráfico comparación simulación vs. experimentación.



Figura 3.1.3: Profundidad fusión. Gráfico comparación simulación vs. experimentación.



Figura 3.1.4: Área fusión. Gráfico comparación simulación vs. experimentación.

Como se puede apreciar en las figuras 3.1.2, 3.1.3 y figura 3.1.4, la simulación se correlaciona bastante bien con los resultados experimentales obteniendo sobre 90% de ajuste en la regresión lineal. Otro punto importante es la pendiente de la línea de tendencia, ya que al estar normalizadas las muestras, se espera que los resultados obtenidos por ambos métodos se encuentren en la misma proporción, es decir, la pendiente sea igual a 1. Vemos gráficamente, que las pendientes de los gráficos anteriores superan 0,9 con lo que se comprueba la validez del modelo computacional.



Figura 3.1.5: Gráfico: profundidad fusión vs. potencia. Flujo másico 2,5 g/min, velocidad de escaneo 2mm/s

En la figura 3.1.5, podemos apreciar un gráfico que comprara los resultados obtenidos en función de la potencia para ambos casos. En esta comparación, la velocidad de escaneo se mantuvo en 2 mm/s y el flujo másico de polvo en 2,5 g/min. Se puede apreciar, que hay una gran similitud entre los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos mediante la simulación, obteniéndose un error menor al 2%, sin embargo, hay pequeñas diferencias que siempre van a estar presentes por las simplificaciones asumidas en el desarrollo del modelo. Los errores se producen en parte por la variabilidad presente en el flujo de polvo que fluye desde el dispositivo alimentador hasta la pieza de trabajo, también se puede deber a pequeñas diferencias en los valores de los parámetros utilizados en la simulación.



Figura 3.1.6: Gráfico: área de fusión vs potencia.

Como última comprobación de la validez del modelo, en la figura 3.1.6 se muestra el área de fusión en función de la potencia, para los distintos niveles de aporte de polvo; 0,05 g/min, 2,5 g/min y 5,5 g/min. En esta figura, se puede apreciar que tanto en la experimentación como en la modelación, el área fundida es bastante similar obteniéndose un error relativo de 1,65% en el caso de 5,5 g/min, 2,77% en el caso de 2,5 g/min y 3,22 en el caso de 0,05 g/min.

Finalmente, podemos decir que la simulación nos entregará una buena estimación de la geometría de la pileta, en función de los tres parámetros claves: potencia, velocidad de escaneo y flujo másico. Esto nos permitirá estimar los parámetros más adecuados para realizar el plaqueado láser. Además, en el anexo D se muestra un análisis de sensibilidad para la viscosidad dinámica y para la variación de la tensión superficial en función de la temperatura, parámetros que numéricamente son difíciles de medir.

3.2 Efecto de los parámetros operacionales en las dimensiones de la pileta

Para poder determinar la potencia, el flujo másico y la velocidad de escaneo más adecuados para realizar el proceso de plaqueado láser, es necesario comprender como afecta cada uno de estos parámetros por si solos a la forma final de la pileta. Los resultados siguientes, fueron obtenidos mediante el modelo computacional.

3.2.1 Efecto producido por la variación en el flujo másico en las dimensiones de la pileta.



Figura 3.2.1: Efecto en la profundidad de fusión, cuando varia el flujo másico. Velocidad de escaneo 2 mm/s.

En el gráfico de la Figura 3.2.1, se observa que al aplicar una mayor cantidad de polvo la profundidad de la zona fundida disminuye. Esto, es esperable ya que una mayor parte de la energía entregada por el haz láser es reflejada por las partículas que pasan por la zona de interacción. Además, se aprecia una linealidad en curvas obtenidas, siendo esto

consistente con la linealidad predicha por el modelo de Rosenthal (Rosenthal, 1941). Es importante notar que en el modelo no se consideró el aporte energético de las partículas de polvo calentadas, por lo que hay que tener en cuenta que la profundidad puede ser mayor en los casos que hay un mayor aporte de material.

Al cuantificar el efecto del flujo másico en las dimensiones de la pileta, podemos ver que este tiene un efecto importante, por ejemplo al comparar el caso sin aplicación de polvo (0 g/min), con el caso de aplicación de polvo a 10 g/min a una potencia de 600 W, vemos que la profundidad de la zona fundida disminuye en un 49%.



3.2.2 Efecto producido por la variación de la velocidad de escaneo en las dimensiones de la pileta.

Figura 3.2.2: Efecto en la profundidad de fusión, cuando varia la velocidad de escaneo. Flujo másico 2,5 g/min

En el gráfico de la figura 3.2.2, se observa que al aumentar la velocidad de escaneo, la profundidad de la pileta disminuye. Esto se debe a que el tiempo de interacción del láser

con la superficie del metal es menor, por consiguiente, la energía acoplada es menor y la temperatura alcanzada es menor disminuyendo así, la profundidad de fusión. La variación de este parámetro afecta menos que el aumento en la cantidad de polvo, obteniéndose una disminución de un 85% cuando se comparan los casos extremos de sin movimiento del haz (0 mm/s) y 10 mm/s con una potencia de 600 W.

3.2.3 Efecto producido por el flujo saliente de vapor

Como se vio en puntos anteriores, al incidir el láser sobre la superficie de un material, a medida que va aumentando su temperatura, primero se funde y luego se vaporiza si la energía es suficiente. Este vapor, dependiendo de la potencia y de las propiedades del material, puede salir de la pileta hacia el ambiente modificando, las propiedades geométricas de la pileta.

Para poder determinar el flujo de vapor que sale de la pileta *J*, es necesario resolver la condición de Stefan de manera analítica. Para esto, se utilizó la ecuación 2.23 la cual se desarrollo con los parámetros utilizados en el modelo de COMSOL. Además, se definió d_m que corresponde a la profundidad de fusión obtenida de forma analítica, lo que permite determinar el gradiente de temperatura $\partial T/\partial z$. (Sankaranarayanan & Kar, 1999)

$$d_m = \left(\frac{L_v}{L_f} - 1\right) \dot{S_v} \tau \tag{3.1}$$

$$\tau = \frac{2r_l}{U} \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{T_{sup} - T_m}{d_m} \tag{3.3}$$

Reemplazando $\partial T/\partial z$ en la ecuación 2.19, se obtiene la ecuación 3.4 que se muestra a continuación.

$$AI + k_l \left(-\frac{T_s - T_m}{\left(\frac{L_v}{L_m} - 1\right) \dot{S_v} \tau} \right) = \rho_l \dot{S_v} L_v$$
(3.4)

El término que nos interesa en la ecuación 3.4 es $\dot{S_{\nu}}$, ya que nos permitirá determinar el flujo de vapor. Resolviendo esta ecuación para este parámetro, obtenemos dos soluciones, descartándose una de ellas por no representar correctamente el problema.

Finalmente, utilizando la ecuación 2.23 se encuentra el flujo de vapor. Para poder entender de mejor manera este valor, se decidió calcular cuanta masa se perdió durante el tiempo de interacción. Utilizando la ecuación 3.5

$$m_{vp} = J r_l^2 \pi \tau \tag{3.5}$$



Figura 3.2.3: Gráfico: masa de vapor perdida durante el tiempo de interacción τ por potencia.

Utilizando la ecuación 3.5 se obtiene el gráfico de la figura 3.2.3. En él se puede observar que a medida que aumenta la potencia, la cantidad vapor que sale de la pileta de metal fundido disminuye. Esto se debe, al aumento de la presión que ejerce el plasma sobre el vapor presente en la superficie del material base. (Sankaranarayanan & Kar, 1999)

Por otro lado, es interesante comparar cuánto metal vaporizado se solidifica sin salir de la pileta y cuál es la forma resultante de la pileta. Esto puede ser determinado, mediante el procedimiento descrito anteriormente, en conjunto con el seguimiento de la frontera líquido-vapor, el cual es realizado utilizando una variable binaria.



Figura 3.2.4: Geometría simulada pileta, luego de evaporación del metal por potencia. Velocidad 2 mm/s, Flujo másico 2,5 g/min

En la figura 3.2.4, se puede apreciar como es la geometría simulada de la pileta, a distintas potencias, según la isoterma que corresponde a la temperatura de vaporización T_v . A 300 W de potencia, la totalidad del metal vaporizado escapa debido a la baja presión que ejerce el plasma sobre el metal, mientras que la alta presión que ejerce el plasma a 600 W impide que el vapor salga de la pileta, en este caso, solo un 94% de metal se solidifica en la pileta. Además, se puede observar que la mayor cantidad de vapor sale de la parte central de la muestra y decrece hacia los costados, esto se debe a la distribución gaussiana del haz láser.

Finalmente, el gráfico de la figura 3.2.3 debe ser ajustado, ya que a una potencia menor de 300 W no se produce vapor, por lo tanto éste no puede escapar de la pileta. En el gráfico de la figura 3.2.5, se pueden observar las diferencias entre la masa vaporizada, la

masa de vapor perdido (ecuación 3.5) y la masa vaporizada que escapa de la pileta según el modelo de COMSOL.



Figura 3.2.5: Comparación de la masa de vapor que sale de la pileta y masa de vapor.

En este caso no se tomó en cuenta el efecto que produce la absorción de energía por parte del plasma, este efecto aumenta cuando el procedimiento se hace a baja velocidad de avance (Mundra & Debroy, 1993).

3.2.4 Efecto producido por la tensión superficial

El efecto producido por la tensión superficial, modifica la geometría de la pileta, debido a que se busca la energía de tensión mínima en la interface. Este fenómeno es descrito por las ecuaciones 2.33, 2.34 y 2.35 descritas anteriormente. Para que COMSOL sea capaz de resolver estas ecuaciones, es necesario crear una contribución débil (*weak contribution*), la cual permite tener mayor control sobre las variables del problema, como en este caso particular la velocidad. Al introducir la contribución débil, la variable es resuelta según la ecuación que se ingrese (ecuaciones 2.33, 2.34 y 2.35) y finalmente introducida en la ecuación general del problema. En este caso, ingresa a la ecuación de conservación de momentum. Finalmente, esta contribución se estableció en la superficie del material base, que interactúa con el haz láser (figura 2.6.10)

Como se puede observar en las figura 3.2.6, 3.2.7, la geometría va variando dependiendo de la potencia a la cual incide el haz láser sobre la superficie del material. Mientras más potencia, mayor es el desplazamiento del metal. Esto ocurre, debido al gradiente de temperatura, ya que el líquido trata de escapar de las zonas donde la tensión superficial es menor. En este caso la tensión superficial es menor en el centro de la pileta, por este motivo el metal líquido se mueve hacia los extremos de la pileta. El montaje de las imágenes, fue realizado escalando proporcionalmente las imágenes obtenidas desde COMSOL hasta que estas coincidiesen con las dimensiones de la pileta resultante del proceso de simulación.



Figura 3.2.6: Movimiento de la fase líquida inducida por el cambio de tensión superficial. Condiciones: potencia 396 W, flujo másico 2,5 g/min, velocidad 2 mm/s



Figura 3.2.7: Movimiento de la fase líquida inducida por el cambio de tensión superficial. Condiciones: potencia 490 W, flujo másico 2,5 g/min, velocidad 2 mm/s

Se puede apreciar en la figura 3.2.8 que existe una anomalía en la geometría de la pileta, esto puede ser provocado por la formación de plasma sobre el material, el cual, mueve el metal líquido hacia los extremos de la pileta.



Figura 3.2.8: Anomalía en le geometría de la pileta.

4. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un modelo computacional del proceso de plaqueado láser implementado en COMSOL que se ajusta con un alto grado de concordancia a los resultados experimentales obtenidos en trabajos anteriores. Este modelo, incluye los fenómenos físicos más relevantes que se llevan a cabo en el plaqueado láser. Se logró ver los cambios en la geometría de la pileta y la relación que tiene las dimensiones de la pileta con los parámetros operacionales más relevantes (potencia, flujo másico y velocidad de escaneo).

Se utilizó un modelo multifísico para resolver las ecuaciones de masa, momentum y energía. Además, con la aplicación de ecuaciones no lineales en la zona de interacción con el haz láser, se pudo resolver el problema de cambios de fases. También se consideró la atenuación del haz láser debido a la absorción de energía, por parte de las partículas de polvo. Finalmente, todas las ecuaciones fueron acopladas por la variable de temperatura.

Finalmente, este modelo permitió entender el efecto de la variación de los parámetros más importantes de manera sencilla, sin tener que llevar a cabo una batería de experimentos para obtener resultados satisfactorios. Cabe señalar, que este modelo sólo permite determinar las propiedades geométricas de la pileta, dependiendo del polvo aportado, potencia y velocidad de escaneo que se utilice y no estima la calidad ni cantidad definida por las propiedades geométricas resultantes del recubrimiento, ya que no se toma en cuenta la depositación del material de aporte, ni la adhesión de las partículas de polvo fundido al material base.

Como conclusión a los efectos que tienen los distintos parámetros en la geometría de la pileta, se puede decir que:

• <u>Potencia aplicada</u>: Sin duda, la potencia es el factor más relevante al momento de realizar el proceso de plaqueado, la profundidad de fundido (z_{max}) y el ancho de la pileta (w_{max}) . Al aumentar la potencia ambas propiedades geométricas aumentan su dimensión. En los casos extremos $(P_W = 300 \text{ W y } P_W = 600 \text{ W})$ la profundidad de fusión (z_{max}) aumenta 2,4 veces, mientras que el ancho de la pileta para el mismo caso aumenta 1,76 veces.

Además, la potencia aplicada tiene influencia en otros fenómenos que modifican la geometría de la pileta, los cuales, se describen a continuación:

- <u>Vapor perdido por evaporación</u>: El aumento de la potencia disminuye la cantidad de vapor que sale de la pileta, esto se debe al aumento de la presión que ejerce el plasma sobre la superficie afectada por el haz láser. Por lo tanto, este efecto predomina a potencias altas. Es importante notar que en esta investigación, no se tomó en cuenta el efecto que tiene el polvo aportado en escape de gases desde la pileta.
- <u>Tensión Superficial</u>: La tensión superficial tiene un efecto importante en la superficie de la pileta, desplazando el metal fundido a zonas de mayor tensión superficial, obteniendo una geometría que queda determinada cuando la energía potencial de superficie es mínima. Al aumentar la potencia este efecto también aumenta, debido a que el gradiente de temperaturas es mayor. En este caso, no se tomó en cuenta el polvo que cae sobre la superficie del material.
- <u>Flujo Másico</u>: Al aumentar la cantidad del polvo inyectado, la profundidad de la pileta disminuye, como también disminuye el área de material fundido. Este parámetro tiene una gran relevancia en el proceso de plaqueado, ya que las diferencias en la profundidad de fusión (z_{max}) que se producen al no aplicar

polvo y al aplicar polvo puede llegar al 50% (según los gráficos en los resultados). Además, el flujo másico es una variable fácil de manejar operacionalmente. Finalmente, se puede afirmar que la dependencia lineal entre la profundidad de fusión y la potencia aplicada está preservado para todos los flujos másicos simulados.

• <u>Velocidad de Escaneo</u>: Al aumentar la velocidad con la que el haz se desplaza sobre el material base, la profundidad de la pileta disminuye. Este parámetro influye en las dimensiones de la pileta, siendo importante controlarlo de manera adecuada. La disminución en la profundidad de fusión (z_{max}), para casos extremos, sin movimiento y a 20 mm/s, es menor al 20%.

4.1 Trabajo Futuro

- Simular experimentos con distintos sustratos y polvos de aporte, de manera tal que permita mejorar el modelo actual y lograr así predecir la geometría de la pileta.
- Agregar al modelo la determinación de la geometría del plaqueado y ajustarlo a experimentos anteriores.
- Incorporar el flujo másico de polvo utilizando mallas adaptables.
- Generar un mapa de trabajo, en el cual se correlacione los parámetros operacionales y resultados.

BIBLIOGRAFÍA

ASM International. (1997). *ASM Handbook Volume 7 "Powder Metal Technologies and Aplications"* (2nd ed.). ASM International.

Block-Bolten, A., & Eagar, T. (1984). Metal Vaporization from Weld Pools. *Metallurgical Transactions B, volume 15*, 461-469.

Carslaw, H., & Jaeger, J. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford: Clarendon Press, 2nd ed.

Chande, T., & Mazumder, J. (1985). Two-dimensional, transient model for mass transport in laser surface alloying. *Journal of Applied Physics, volume 57, issue 6*, 2226-2232.

COMSOL Multiphysics. (n.d.). COMSOL Multiphysics User Guide.

COMSOL Multiphysics. (2010). Comsol. Retrieved from http://www.comsol.com/

Debroy, T., & David, S. (1995). Physical processes in fusion welding. *Reviews of Modern Physics, Vol* 67, 85-97.

Debroy, T., & Khan, A. (1984). Alloying Element Vaporization and Weld Pool Temperature During Laser Welding of AISI 202 Stainless Steel. *Metallurgical Transactions, vol. 15B*, 641-644.

Debroy, T., Basu, S., & Mundra, K. (1991). Probing laser induced metal vaporization by gas dynamics and liquid pool trasport phenomena. *Journal of Applied Physics, volume 70, issue 3*, 1313-1319.

Debroy, T., He, X., Norris, J., & Fuerschbach, P. (2006). Liquid Metal Expulsion during Laser Spot Welding of 304 Stainless Steel. *Journal of Physics D: Applied Physics, volume 39, issue 3*, 525-534.

Environmental Chemistry. (n.d.). *Element Chromium - Cr*. Retrieved from Environmental Chemistry: http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Cr.html

Etxeberria, A. V. (2006). Láser "cladding": novedosa técnica de aporte de material.

Fu, Y., Loredo, A., Martin, B., & Vannes, A. (2002). A theoretical model for laser and powder particles interaction during laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology, volume 128, issue 1-3*, 106-112.

García-Romero, A., Angelada, M., & Irisarri, A. (2005). Estudio del Comportamiento Frente al Desgaste de un Material Compuesto de Matriz de Aleción de Aluminio. *Analisis de la fractura, volumen 22*, 288-893.

Gómez, M. (2005). *Caracterización de las Propiedades Tribológicas de los Recubrimientos Duros*. Barcelona: Universitat de Barcelona.

Han, L. (2004). Modeling of Laser Cladding with Powder Injection. *Metallurgical and materials transactions B, volume 35, number 6*, 1139-1150.

Islam, D. (2000). Laser Cutters. Michigan: Central Michigan University.

Komvopoulos, K. (1990). Processing and Characterization of Laser-Cladded Coating Materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Vol 112*, 131-143.

Kou, S. (1986). Three-Dimensional Convection in Laser Melted Pools. *Metallurgical* and materials transactions A, volume 17, number 12, 2265-2270.

Laveda, B. (1978). *Thermodynamics of Irreversible Processes*. London: Macmillan Press.

Lyra, P., Lima, R., & Carvalho, D. (2005). Axisymmetric Finite Volume Formulation for the Solution of Heat Conduction Problems Using Unstructured Meshes. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., vol XXVII*, 407-414.

Márquez, A., Blanco, G., Fernandez de Rapp, M. E., Lamas, D. G., & Tarulla, R. (2003). Properties of Cupric Oxide Coatings Prepared by Cathodic Arc Deposition. *Surface & Coatings Technology 187*, 154-160.

Melles Griot. (2009). Basic Laser Principles. Melles Griot.

Moita de Deus, A. (2004). *A Thermal and Mechanical Model of Laser Cladding*. Lisbon: University of Lisbon.

Montoya, J. (2005). *Marcado y Esmaltado de Materiales Cerámicos con Láser*. Barcelona: Universitat de Barcelona.

Mundra, K., & Debroy, T. (1993). Calculation of Weld Metal Composition Change in High Power Conduction Mode Carbon Dioxide Laser Welded Stainless Steels. *Metallurigcal Transactions B, Volume 24B*, 145-155.

Olivos, A. (2010). Caracterización de las propiedades mecánicas superficiales de aceros dulces con aplicación de tratamiento superficial láser. Santiago: Pontificia Universidad Catolica de Chile.

Picasso, M., & Hoadley, A. (1994). Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 61-83.

Picasso, M., & Rappaz, M. (1994). Laser powder material interactions in laser cladding process. *Journal de physique IV, volume 04, numéro C4*, 27-33.

Picasso, M., Marsden, C., Wagniere, J., Frenk, A., & Rappaz, M. (1994). A Simple but Realistic Model for Laser Cladding. *Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, vol. 25, num. 2*, 281-291.

Pinkerton, A., & Li, L. (2004). An analytical model of energy distribution in laser direct metal deposition. *Proc. Mech. Engrs Vol 218 Part B*, 363-374.

Pinkerton, A., & Li, L. (2004). Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances. *Journadl of physics D: Applied physics*, 1885-1895.

Qi, H., & Mazumder, J. (2006). Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser. *Journal of applied physics, volume 100*, 1-11.

Ramos-Grez, J. (2009). *Apuntes del curso métodos modernos de manufactura*. Santiago: Pontificia Universidad Catolica de Chile.

Robert, A., & Debroy, T. (2001). Geometry of Laser Spot Welds from Dimensionless Numbers. *Metallurgical and materials transactions, volume 32 B*, 941-947.

Rosenthal, D. (1941). Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding Journal*, *Vol* 20, 220-234.

Sankaranarayanan, S., & Kar, A. (1999). Nonlinear effects of laser-plasma interaction on melt-surface temperature. *Journal of Physics D: Applied Physics, volume 32*, 777-784.

Schneider, M. (1998). Laser Cladding with Powder. Enschede: University of Twente.

Shen, Z., Zhang, S., Lu, J., & Ni, X. (2001). Mathematical modeling of laser induced heating and melting in solids. *Optics and Laser Technology, volume 33, issue 8*, 533-537.

Steen, W., & Mazumder, J. (1991). Laser Material Processing (4th ed.). London: Springer.

Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2004). 3-D finite element modeling of laser cladding by powder inyection: effectos of laser pulse shaping on the process. *Optics and Lasers in Engineering, volume 41, issue 6*, 849-867.

Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2005). Laser Cladding. CRC Press.

Traidia, A., Roger, F., & Guyotv, E. (2010). Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools. *International Journal of Thermal Sciences, volume 49, issue 7*, 1197 - 1208.

ANEXOS

ANEXO A: MEDIDAS DE SEGURIDAD LÁSER

El procesamiento de materiales mediante láser de alta potencia es una actividad que puede ser peligrosa para la salud si no se consideran algunas medidas de seguridad. Los principales peligros al trabajar con este equipo son: Daños en los ojos, daños en la piel, riesgo de electrocución e intoxicación por humo. Estos riesgos, se pueden disminuir siguiendo algunos estándares que han sido desarrollados por distintas compañías como la *American National Standard Institute* (ANSI). Estos estándares aportan reglas relativas a equipos de protección personal y procedimientos de control. Al no seguir las medidas propuestas, se puede provocar en un accidente. (Steen & Mazumder, 1991)

<u>Daños en los ojos</u>: El potencial daño a las distintas estructuras de los ojos depende de qué estructura absorba la energía. La radiación láser puede dañar la cornea, el cristalino o la retina, dependiendo de la longitud de onda, intensidad de la radiación del haz láser y de las características de absorción de cada tejido del ojo. En la tabla A.1, se puede apreciar un resumen de los posibles daños en función de la longitud de onda. Como se puede apreciar en la tabla, para un haz láser de 10.6 micrones, correspondiente a la longitud de onda de un haz láser producido por un láser de CO_2 , se puede recibir un daño en la cornea. (Steen & Mazumder, 1991)

Laser Type	Wavelength µm	Biological Effects	Skin	Cornea	Lens	Retina
CO2	10.6	Thermal	х	х		
H2F2	2.7	Thermal	х	х		
Erbium-YAG	1.54	Thermal	х	х		
Nd-YAG	1.33	Thermal	х	х	х	x
Nd-YAG	1.06	Thermal	х			x
GaAs Diode	0.78-0.84	Thermal	**		x	
He/Ne	0.633	Thermal	**		x	
Argon	0.488-0.514	Thermal photochem	x			x
Excimer: XeF	0.351	Photochem	x	х	х	
XeCl	0.308	Photochem	х	x		1
KrF	0.254	Photochem	x	х		í.
** Insufficient power						

Tabla A.1: Daños biológicos producidos por haz láser (Steen & Mazumder, 1991)

Al utilizar el láser es obligatorio el uso de gafas protectoras para minimizar el riesgo, estas gafas, deben ser las adecuadas para la longitud de onda y la densidad óptica del haz láser.

<u>Daño en la piel</u>: Los posibles daños en la piel, generalmente son considerados de segundo orden exceptuando el caso de que el haz láser sea de alta potencia e infrarrojo. En el caso de utilizar un haz cercano al espectro del ultravioleta toma una importancia mayor pudiendo producir envejecimiento acelerado de la piel y cáncer de piel. Para el láser de CO_2 , las posibles consecuencias para la piel pueden variar desde un leve enrojecimiento hasta ampollas y carbonización. Estas condiciones generalmente son reversibles. (Steen & Mazumder, 1991)

<u>Riesgo de electrocución</u>: El mayor riesgo que posee utilizar láseres de alta potencia, es el peligro a electrocutarse debido al alto voltaje. No seguir las medidas de seguridad puede provocar la muerte. Para minimizar los riesgos, es recomendable no utilizar elementos metálicos como reloj o anillos, no utilizar el equipo con las manos o pies mojados. (Steen & Mazumder, 1991)

	I .	
Flujo másico de polvo	'n	2.5[g/min]
Velocidad de escaneo	U	2[mm/s]
Radio haz láser	r_l	0.25[mm]
	Т	1811[K]
Punto de fusión	¹ m	(Robert & Debroy, 2001)
	T_v	3135 [K]
Punto de ebullición		(Debroy, Basu, & Mundra, 1991)
Temperatura ambiente	T_0	293[K]
	L _f	247·10 ³ [J/(kg)]
Calor latente de fusión		(Islam, 2000)
	L_v	6,25 · 10 ⁶ [J/kg]
Calor latente de vaporización		(Pinkerton & Li, 2004)
	C	502[J/(kg*K)]
Calor específico en estado sólido	Cps	(Sankaranarayanan & Kar, 1999)
	C,	620[J/(kg*K)]
Calor específico en estado líquido	Upl	(Islam, 2000)
	C_{pv}	747.14[J/(kg*K)]
Calor específico en estado vapor		(Sankaranarayanan & Kar, 1999)
	$ ho_l$	6350[kg/m^3]
Densidad en estado líquido		(Traidia, Roger, & Guyotv, 2010)
	$ ho_s$	7500[kg/m^3]
Densidad en estado sólido		(Traidia, Roger, & Guyotv, 2010)
	k_{1}	43[W/(m*K)]
Conductividad térmica en estado líquido		(Qi & Mazumder, 2006)
Conductividad térmica en estado sólido	k _s	40[W/(m*K)]
		5•10 ⁻³ [kg/m/s]
Viscosidad dinámica	μ	(Robert & Debroy, 2001)
	P	1,45 [•] 10 ⁻⁴ [1/K]
Coeficiente de expansión térmica	μ	(Qi & Mazumder, 2006)
Variación de la tensión superficial con respecto a la	$\partial y / \partial T$	-5•10 ⁻⁴ [N/m/K]
temperatura	07701	(Robert & Debroy, 2001)
Velocidad de partícula de polvo	V_p	26[m/s]
Distancia de viaje partículas de polvo	l	25[mm]
Radio promedio partículas de polvo	r _p	34[um]
Diámetro tobera	d	1.8[mm]
	ρ _c	7.19[g/cm^3]
Densidad polvo aportado		(Enviromental Chemistry)

ANEXO B: DATOS USADOS PARA LOS CALCULOS

ANEXO C: DETALLES DE LA SIMULACIÓN

Los detalles de la simulación son entregados a continuación:

- Modelo: tridimensional
- Resolvedor: Estacionario Iterativo (GMRES)
- Tiempo de resolución: 584 s
- Número de grados de libertad: 54.557
- Número de elementos en la malla: 36139 (elementos tetraédricos)
- Variable de acople: temperatura

El ajuste de la simulación, fue realizado con un parámetro constante que se aplica a la potencia atenuada del haz láser. El valor de este parámetro de ajuste δ fue de 0,3. El valor se encontró corriendo una serie de simulaciones a distintas potencias variando el valor de δ , se calculo el error porcentual entre el valor experimental y el encontrado mediante la simulación. El valor utilizado corresponde al que minimiza el error porcentual (figura C1).



Figure C1: Porcentaje de error vs delta.

ANEXO D: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros μ y $\partial \gamma / \partial T$, los cuales, tienen valores que son difíciles de obtener y puede tener influencia en las dimensiones de la pileta.

Para esto, se resolvió el modelo desarrollado para distintas potencias, a una velocidad de escaneo de 2 mm/s y un flujo másico de 2,5 gr/min, variando los parámetros, μ y $\partial \gamma / \partial T$, a la mitad y al doble de los valores utilizados en el desarrollo de la tesis.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras D.1 y D.2



Figura D.1: Sensibilidad a la viscosidad dinámica.

En el caso de la viscosidad dinámica, se puede apreciar, en la figura D.1, que este parámetro prácticamente no afecta en la profundidad de la pileta, determinando que el modelo es poco sensible a este parámetro.



Figura D.2: Sensibilidad a la variación de la tensión superficial con respecto a la temperatura.

Se puede apreciar en la figura D.2, que existe una sensibilidad mayor en este caso, pero aun así, la variación obtenida es mínima. Llegando a la conclusión de que el modelo es poco sensible a este parámetro.