

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	2
1.1.1. Objetivos general . . . . .	2
1.1.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.2. Alcances . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1. Proyección térmica . . . . .	4
2.2. <i>Cold Spray</i> . . . . .	6
2.2.1. Velocidad de partículas . . . . .	8
2.2.2. Eficiencia de adherencia (DE) . . . . .	9
2.2.3. Mecanismo de adherencia . . . . .	12
2.2.3.1. Unión por enlace metálico . . . . .	12
2.2.3.2. Unión mecánica . . . . .	12
2.2.4. Inestabilidad de corte adiabática ( <i>Adiabatic shear instability, ASI</i> ) . .	13
2.3. Modelo de plasticidad: Johnson – Cook . . . . .	14
2.4. Modelo de elasticidad: Mie–Grüneisen . . . . .	15
2.5. Dureza Vickers . . . . .	16
2.6. Relación de dureza y esfuerzo de fluencia . . . . .	17
2.6.1. Ecuación general . . . . .	17
2.6.2. Ecuaciones para el cobre . . . . .	17
<b>3. Revisión bibliográfica</b>	<b>20</b>
3.1. Simulación de impactos de partículas . . . . .	20
<b>4. Metodología</b>	<b>23</b>
4.1. Metodología computacional . . . . .	23
4.1.1. Validación numérica . . . . .	24
4.1.2. Parámetros del material . . . . .	24
4.1.3. Tamaño de partículas . . . . .	25

4.1.4.	Parámetros experimentales . . . . .	26
4.1.5.	Temperatura de partículas . . . . .	27
4.1.6.	Temperatura del sustrato . . . . .	29
4.1.7.	Resumen parámetros de simulación . . . . .	30
4.1.8.	Determinación del número de partículas . . . . .	30
4.1.9.	Sensibilidad de malla . . . . .	33
4.1.10.	Simulación en ABAQUS . . . . .	33
4.2.	Análisis de datos: Cálculo de dureza . . . . .	40
<b>5.</b>	<b>Validación numérica</b>	<b>42</b>
5.1.	Geometría . . . . .	42
5.2.	Material . . . . .	43
5.3.	Interacciones . . . . .	44
5.4.	Condiciones de borde . . . . .	44
5.5.	Mallado . . . . .	44
5.6.	Condiciones iniciales . . . . .	45
5.7.	Resultados y análisis . . . . .	45
<b>6.</b>	<b>Resultados, Análisis y Discusiones</b>	<b>49</b>
6.1.	Número de partículas . . . . .	49
6.2.	Resultados de análisis sensibilidad de malla . . . . .	51
6.3.	Resultado de simulaciones . . . . .	53
6.3.1.	Primera capa de partículas . . . . .	53
6.3.2.	Segunda capa de partículas . . . . .	55
6.3.3.	Tercera capa de partículas . . . . .	56
6.3.4.	Cuarta capa de partículas . . . . .	58
6.3.5.	Quinta capa de partículas . . . . .	59
6.3.6.	Sexta capa de partículas . . . . .	61
6.3.7.	Séptima capa de partículas . . . . .	62
6.3.8.	Resumen de resultados de simulaciones . . . . .	65
6.4.	Resultado de cálculo de dureza . . . . .	67
6.4.1.	Esfuerzo de fluencia . . . . .	67
6.4.2.	Dureza . . . . .	68
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
	<b>Anexo A. Análisis de sensibilidad de malla</b>	<b>76</b>



# Índice de Tablas

4.1.	Propiedades del cobre . . . . .	25
4.2.	Datos experimentales . . . . .	27
4.3.	Parámetros de impacto . . . . .	30
4.4.	Resumen propiedades de interacción . . . . .	35
4.5.	Condiciones iniciales . . . . .	36
4.6.	Tamaño de mallado y medidas del sustrato . . . . .	37
5.1.	Propiedades del aluminio . . . . .	43
6.1.	Análisis de sensibilidad de malla . . . . .	51
6.2.	Promedio deformación plástica capa 1 . . . . .	53
6.3.	Promedio deformación plástica capa 2 . . . . .	55
6.4.	Promedio deformación plástica capa 3 . . . . .	56
6.5.	Promedio deformación plástica capa 4 . . . . .	58
6.6.	Promedio deformación plástica capa 5 . . . . .	59
6.7.	Promedio deformación plástica capa 6 . . . . .	61
6.8.	Promedio deformación plástica capa 7 . . . . .	62
6.9.	Resumen de promedios de PEEQ por capa de partículas . . . . .	66
6.10.	Esfuerzo de fluencia calculado del recubrimiento . . . . .	68
6.11.	Dureza Vickers calculada por capa . . . . .	68
6.12.	Dureza Vickers calculada del recubrimiento . . . . .	69

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema de las familias de proyección térmica . . . . .	5
2.2.	Esquema del proceso de <i>Thermal Spray</i> . . . . .	5
2.3.	Esquema del proceso de <i>Cold Spray</i> . . . . .	7
2.4.	Comparación de velocidad de partículas, temperatura de gas y temperatura del sustrato entre procesos de proyección térmica . . . . .	8
2.5.	Ventana de adherencia. Relación entre eficiencia, velocidad y temperatura de partículas . . . . .	10
2.6.	Relación entre la velocidad de partículas y la eficiencia de adherencia, para una temperatura de impacto constante . . . . .	11
2.7.	Entrelazamiento mecánico . . . . .	13
2.8.	Curva típica de esfuerzo de fluencia ( <i>stress</i> ) – deformación plástica ( <i>strain</i> ) . . . . .	14
2.9.	Esquema de indentación . . . . .	16
2.10.	Relaciones esfuerzo de fluencia y dureza para distintas aleaciones de Cu . . . . .	19
3.1.	Perfiles de simulación utilizando un arreglo FCC . . . . .	21
3.2.	Morfología obtenida por la deformación por impacto de 3 partículas de cobre . . . . .	22
3.3.	Deformación plástica equivalente del impacto de 100 partículas . . . . .	22
4.1.	Diagrama resumen de la metodología computacional . . . . .	24
4.2.	Microscopía (SEM) de las partículas de cobre Cu-159 . . . . .	26
4.3.	Distribución de tamaños de partícula . . . . .	26
4.4.	Temperatura de impacto de partículas en función de la presión y temperatura del gas . . . . .	28
4.5.	Gráfico de temperatura del sustrato en función de la temperatura del gas . . . . .	29
4.6.	Curva de esfuerzo-deformación para un recubrimiento de cobre . . . . .	31
4.7.	Esquema del radio de deformación . . . . .	32
4.8.	Dimensiones partícula deformada . . . . .	32
4.9.	Esquema con medidas del sustrato . . . . .	34
4.10.	Esquemización de las condiciones de bordes aplicadas . . . . .	35
4.11.	Zonas de mallado del sustrato . . . . .	37
4.12.	Primera capa de partículas . . . . .	38

4.13.	Mapa conceptual modelo por capas . . . . .	38
4.14.	Configuración inicial para el modelo de cada capa simulada. Elaboración propia.	39
5.1.	Esquema de la geometría del modelo axisimétrico 2D . . . . .	43
5.2.	Esquema de las condiciones de borde del modelo axisimétrico 2D . . . . .	44
5.3.	Detalles del mallado del modelo axisimétrico 2D. . . . .	45
5.4.	Esfuerzos de Von Mises . . . . .	46
5.5.	Esfuerzos de Von Mises . . . . .	46
5.6.	Evolución de la deformación plástica equivalente (PEEQ) . . . . .	47
5.7.	Evolución de la deformación plástica equivalente (PEEQ) . . . . .	47
6.1.	Resultado del modelo de 1 partícula . . . . .	49
6.2.	Radio de deformación . . . . .	50
6.3.	Dimensiones partícula deformada . . . . .	50
6.4.	Gráfico resumen de las curvas de deformación plástica promedio de cada tamaño de elemento de malla . . . . .	51
6.5.	Distribución de la deformación plástica en la capa 1 . . . . .	54
6.6.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 1 . . . . .	54
6.7.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 1 . . . . .	55
6.8.	Distribución de la deformación plástica en la capa 2 . . . . .	55
6.9.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 2 . . . . .	56
6.10.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 2 . . . . .	56
6.11.	Distribución de la deformación plástica en la capa 3 . . . . .	57
6.12.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 3 . . . . .	57
6.13.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 3 . . . . .	58
6.14.	Distribución de la deformación plástica en la capa 4 . . . . .	58
6.15.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 4 . . . . .	59
6.16.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 4 . . . . .	59
6.17.	Distribución de la deformación plástica en la capa 5 . . . . .	60
6.18.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 5 . . . . .	60
6.19.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 5 . . . . .	61
6.20.	Distribución de la deformación plástica en la capa 6 . . . . .	61
6.21.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 6 . . . . .	62

6.22.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 6 . . . . .	62
6.23.	Distribución de la deformación plástica en la capa 7 . . . . .	63
6.24.	Selección de elementos para cálculo de promedio PEEQ. Capa 7 . . . . .	63
6.25.	Evolución de la deformación plástica promedio durante el tiempo de impacto. Capa 7 . . . . .	64
6.26.	Progresión de las simulaciones por capa. Elaboración propia. . . . .	65
6.27.	Evolución de la deformación plástica promedio de cada capa de partículas . . .	66
A.1.	Resultado simulación tamaño de malla $\varnothing/10$ . . . . .	76
A.2.	Resultado simulación tamaño de malla $\varnothing/20$ . . . . .	77
A.3.	Resultado simulación tamaño de malla $\varnothing/25$ . . . . .	77
A.4.	Resultado simulación tamaño de malla $\varnothing/30$ . . . . .	78
A.5.	Resultado simulación tamaño de malla $\varnothing/35$ . . . . .	78
A.6.	Resultado simulación tamaño de malla $\varnothing/40$ . . . . .	79