



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES DE  
RECUBRIMIENTOS COBRE-ALUMINIO PRODUCIDOS POR COLD-SPRAY  
SOMETIDAS A TRATAMIENTOS TÉRMICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

JAVIERA CAMILA TRONCOSO CASTILLO

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES  
RODRIGO PALMA HILLERNS

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA  
POR: JAVIERA CAMILA TRONCOSO CASTILLO  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

## ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES DE RECUBRIMIENTOS COBRE-ALUMINIO PRODUCIDOS POR COLD-SPRAY SOMETIDAS A TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El sistema Al-Cu se ha investigado intensamente durante las últimas décadas, principalmente debido a las aleaciones basadas en Aluminio que dado a su bajo peso atómico, permiten generar estructuras livianas y disminuir costos.

Por otro lado, las nuevas tecnologías disponibles han dado paso a un mayor control de las aleaciones y procesos dando la posibilidad de obtener las propiedades mecánicas deseadas con mayor exactitud.

En este trabajo de título se realizó un estudio de la microestructura y propiedades de recubrimientos Al-Cu producidos por Cold-Spray.

Se estudiaron muestras de sustrato de aluminio con recubrimiento de Al-Cu provenientes de Cold-Spray Laboratory de la Universidad de Ottawa, Ontario, Canadá, a las cuales se les aplicaron diferentes tratamientos térmicos en las dependencias de la Universidad de Chile, con posterioridad se realizó un análisis microestructural y de dureza, con el objetivo de estudiar la evolución de estas características, para así determinar cómo afectan los tratamientos térmicos a la dureza del recubrimiento.

Posterior a esto se estudió la estructura microscópica del material dando énfasis a los compuestos Intermetálicos obtenidos para luego realizar los ensayos de dureza. Se finaliza el estudio con un análisis de resultados experimentales y con un informe final.

Con respecto a los resultados obtenidos, se puede destacar que la dureza del recubrimiento aumenta a medida que el tiempo de permanencia en el tratamiento térmico es mayor, lo cual se atribuye a la presencia de intermetálicos como  $Al_2Cu$ . Por otro lado, se pudo comprobar mediante EDS la presencia y crecimiento de las fases  $\gamma_1$ ,  $\theta$ ,  $\delta$  a medida que el tiempo de permanencia era mayor.

En cuanto a la eficiencia de deposición de polvos es de 25,83 % en masa, en cuanto a la deposición de cobre, esta fué de un 52 % en masa y con respecto al Aluminio esta fue de un 47 % en masa. Considerando que la mezcla de polvos para realizar el recubrimiento tenían un porcentaje en masa de 60 % Cu y 40 % Al, se puede concluir que el Aluminio tiene mayor eficiencia de deposición que el cobre en un sustrato de aluminio.

Entre los recursos necesarios para desarrollar este trabajo de título los pecuniarios destaca la adquisición de muestras con recubrimiento Cu-Al mediante Cold-Spray y respecto a los recursos pecuniarios se destaca el uso de microscopía electrónica, hornos, literatura y bibliografía de libre acceso.

La etapa crítica que presentó el trabajo fue principalmente la adquisición de muestras ya que, al ser un trabajo en su mayoría experimental, este no pudo comenzar hasta que no se obtuvieron estas muestras.



*Dedicado con amor a mi hijo, Benjita*



# Agradecimientos

A todos los que fueron parte de todo este proceso, con especial dedicación a mi Mamá y Papá, que siempre estuvieron apoyandome en todas mis decisiones.

Agradezco la compañía de mis amigos de colegio y universidad, que después de tantos años seguimos apoyandonos, en especial a Constanza que gracias a su amistad incondicional ha sido un gran soporte en todo este tiempo.

Por otro lado quisiera dar las gracias a mi compañero de estos años, Felipe, por darme su amor y ser un gran papá.

A los profesores que me han entregdo su conocimiento, destacando a mi profesor guía Rubén Fernández, gracias por su comprensión, paciencia y apoyo en estos últimos años de carrera y por entregar su confianza en mi cuando fuí parte de su grupo docente como permitirme ser su alumna memorista.

Y por último a mi hijo Benjita, por darme la fuerza necesaria para cumplir todas las metas y entregarme su amor incondicional.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Cold Spray, proceso de aspersión térmica . . . . .	3
2.1.1. Inestabilidad de corte adiabático . . . . .	6
2.2. Compuestos Intermetálicos . . . . .	7
2.2.1. Diagrama de fases Cu-Al . . . . .	7
2.2.2. Tratamiento térmico . . . . .	8
2.2.3. Difusión . . . . .	9
2.3. Perfil de composición, segunda ley de Fick . . . . .	12
<b>3. Metodología</b>	<b>13</b>
3.1. Elaboración de recubrimiento Al-Cu sobre sustrato de aluminio . . . . .	13
3.2. Preparación de muestras para realizar tratamiento térmico . . . . .	15
3.2.1. Corte transversal de las muestras . . . . .	15
3.2.2. Tratamiento térmico . . . . .	16
3.3. Preparación de la superficie . . . . .	16
3.3.1. Corte transversal de las muestras . . . . .	17
3.3.2. Montaje . . . . .	18
3.3.3. Desbaste y pulido . . . . .	19
3.4. Medición de la Microdureza . . . . .	20
3.4.1. Microscopía óptica . . . . .	21
3.4.2. Microscopía electrónica . . . . .	22
<b>4. Resultados</b>	<b>24</b>
4.1. Muestra Base . . . . .	24
4.1.1. Microscopía óptica . . . . .	24
4.1.2. Microscopía electrónica . . . . .	25
4.1.3. Dureza . . . . .	27
4.2. Muestra M1 . . . . .	28
4.2.1. Microscopía óptica . . . . .	28

4.2.2.	Microscopia electrónica . . . . .	29
4.2.3.	Dureza . . . . .	33
4.3.	Muestra M2 . . . . .	34
4.3.1.	Microscopia óptica . . . . .	34
4.3.2.	Microscopia electrónica . . . . .	35
4.3.3.	Dureza . . . . .	37
4.4.	Muestra M3 . . . . .	38
4.4.1.	Microscopia óptica . . . . .	38
4.4.2.	Microscopia electrónica . . . . .	39
4.4.3.	Dureza . . . . .	42
4.5.	Muestra M4 . . . . .	43
4.5.1.	Microscopia óptica . . . . .	43
4.5.2.	Microscopia electrónica . . . . .	44
4.5.3.	Dureza . . . . .	46
<b>5.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>48</b>
	<b>Conclusión</b>	<b>51</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>



# Índice de Tablas

2.1. Fases Cu-Al en porcentaje atómico. . . . .	8
2.2. Temperaturas de fusión y recristalización Al y Cu [11] . . . . .	9
2.3. Tipo de difusión entre Al y Cu. . . . .	11
3.1. Parámetros de proceso de manufactura Cold-Spray. . . . .	14
3.2. Tasa de deficiencia del proceso de manufactura. . . . .	14
3.3. Tamaño de muestras. . . . .	15
3.4. Condición de tratamiento térmico. . . . .	16
3.5. Dimensiones de muestras de aluminio. . . . .	17
3.6. Especificaciones técnicas en el proceso de desbaste y pulido para Muestra Base,M1,M2,M3,M4 . . . . .	19
4.1. Caracterización partículas de cobre sobre el recubrimiento . . . . .	25
4.2. Ensayo microdureza muestra base . . . . .	27
4.3. Ensayo microdureza M1 . . . . .	33
4.4. Ensayo microdureza M2 . . . . .	37
4.5. Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.18 (a). . . . .	40
4.6. Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.18 (b). . . . .	41
4.7. Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.19 (a). . . . .	41
4.8. Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.18 (b). . . . .	41
4.9. Ensayo microdureza M3 . . . . .	42
4.10. Ensayo microdureza M1 . . . . .	46

# Índice de Ilustraciones

2.1. Esquema proceso manufactura Cold Spray . . . . .	4
2.2. Inestabilidad de corte adiabático . . . . .	6
2.3. Diagrama de fase Cobre y Aluminio [9] . . . . .	7
3.1. Diagrama de parámetros de proceso de manufactura Cold-Spray . . . . .	14
3.2. polvos de recubrimiento Aluminio (a) y Cobre(b), ambas obtenidas por microscopía electrónica. . . . .	15
3.3. Instrumental de montaje . . . . .	18
3.4. Muestra de baquelita. . . . .	19
3.5. Microdurómetro STRUER DURAMIN 5 . . . . .	20
3.6. Microdurómetro STRUER DURAMIN 5. . . . .	21
3.7. SEM, FEI QUANTA 250. . . . .	22
4.1. Recubrimiento Al-Cu sin tratamiento térmico, Imagen general del recubrimiento(a);Imagen partículas de cobre en el recubrimiento(b) . . . . .	24
4.2. Recubrimiento Cu-Al sin Tratamiento térmico,(a) 500x y (b) 4000x ambas obtenidas por microscopía electrónica. . . . .	26
4.3. Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	26
4.4. EDS en una línea entre partícula de Cu y Al . . . . .	27
4.5. vista general del recubrimiento (a), difusión aluminio en cobre en borde de partícula de cobre (b) , ambas obtenidas por microscopía óptica. . . . .	28
4.6. Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	29
4.7. Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	30
4.8. Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	31
4.9. Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	32
4.10. EDS Partícula de cobre en recubrimiento Cu-Al . . . . .	33
4.11. vista general del recubrimiento (a), difusión aluminio en cobre en borde de partícula de cobre (b) , ambas obtenidas por microscopía óptica. . . . .	34
4.12. Recubrimiento sometido a 30 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	35
4.13. Recubrimiento sometido a 30 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	36
4.14. EDS Partícula de recubrimiento sometido a 30 minutos de Tratamiento térmico . . . . .	37
4.15. Partículas del recubrimiento sometidas a 1 hora de tratamiento térmico, ambas obtenidas por microscopía óptica. . . . .	38
4.16. Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico . . . . .	39
4.17. Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico . . . . .	40
4.18. Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico . . . . .	41

4.19. Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico . . . . .	42
4.20. difusión aluminio en cobre 80x aumento (a), difusión aluminio en cobre 50x aumento (b) , ambas obtenidas por microscopía óptica. . . . .	43
4.21. Recubrimiento sometido a 2 hora de Tratamiento térmico . . . . .	44
4.22. EDS Partícula de cobre en recubrimiento Cu-Al . . . . .	45
4.23. EDS Partícula de cobre en recubrimiento Cu-Al . . . . .	46
4.24. Recubrimiento sometido a 2 horas de Tratamiento térmico . . . . .	47

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Los sistemas cobre aluminio han sido investigados extensivamente debido a la importancia de estas aleaciones en la industria aeroespacial y transmisión eléctrica, principalmente destacando el bajo peso sumado con una cuota de conductividad.

El desarrollo de nuevos procesos de manufacura aditiva, como Cold Spray, permite un mejor control de la composición de las aleaciones debido a que las temperaturas de trabajo son menores a la temperatura de fusión. Esto reduce el cambio de fase indeseado, bajo estrés térmico y baja oxidacion, dando la posibilidad de generar recubrimientos o piezas que necesiten una alta resistencia a la corrosión y abración, generando de esta manera, un interés en seguir investigando sobre el potencial desarrollo de estos sistemas y procesos de manufactura referente a sus propiedades mecánicas.

En cuanto al estudio microestructural ha avanzado enormemente desde el año 1985 a la fecha debido al estudio realizado por Murray que generó uno de los primeros diagramas de fase de la aleación cobre aluminio en equilibrio, el cual daba a conocer cinco compuestos intermetálicos estables a temperatura ambiente y siete compuestos adicionales estables a elevadas temperaturas. Posterior a esto, varios investigadores has ido complementando estos estudios, como Liu, Riani y Saunders. sin embargo, aun quedan fases sin identificar totalmente su composición por lo cual el estudio de esta aleación tan importante para la industria sigue siendo un tema de investigación.

Sumar a esto el desafío de ver como afecta los diferentes procesos de manufactura en cuanto a las propiedades de esta aleación, abre las puertas a más posibilidades de aplicación a la industria, como tambien a más incognitas que deben seguir siendo investigadas.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Estudiar la evolución microestructural y la dureza del recubrimiento Cobre-Aluminio, producidos por Cold-Spray, sometidos a tratamiento térmico

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar recubrimiento recién depositado (composición y dureza)
- Estudiar el cambio y evolución microestructural del recubrimiento luego de 4 tratamientos térmicos a una misma temperatura durante distintos tiempos
- Estudiar el cambio y evolución de la dureza del recubrimiento luego de 4 tratamientos térmicos
- Estudio del crecimiento de intermetálicos posterior a los tratamientos térmicos

## 1.3. Alcances

En este trabajo de título, se trabajó en cinco muestras de sustrato de aluminio con recubrimiento Al-Cu realizado por Cold-Spray, muestras que fué provista por Cold Spray Laboratory en la universidad de Ottawa, Ontario, Canadá Se estudió la evolución microestructural y la dureza del recubrimiento Al-Cu realizado por Cold-Spray que posteriormente fue sometido a diferentes tratamientos térmicos.

Estos tratamientos térmicos se realizaron en las dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y se realizó un tratamiento distinto a cada muestra variando el tiempo de permanencia en el tratamiento térmico a temperatura constante. Por otro lado, el estudio microestructural se realizó en las dependencias del Departamento de Geología y Mecánica de la Universidad de Chile mediante microscopía electrónica y microscopía óptica correspondientemente.

Se finalizó el proyecto mediante un análisis que relaciona la microestructura del recubrimiento bajo las diferentes condiciones descritas previamente y la dureza de este mismo.

# Capítulo 2

## Antecedentes

A continuación, se presentan los antecedentes generales que contextualizan lo mencionado en este informe con el fin de lograr una mayor comprensión de este. Se describe el proceso de Cold Spray, como también los compuestos intermetálicos con énfasis en el compuesto en base a Cu-Al, posterior a esto, se hace referencia a los tratamientos térmicos y como la temperatura afecta a la difusión dentro de un material. Finalmente se incluyen antecedentes sobre la segunda ley de Fick que hace referencia al perfil de composición.

### 2.1. Cold Spray, proceso de aspersion térmica

Dentro de los procesos de Thermal Spray, se encuentra el proceso Cold-Spray, este proceso que consiste en proyectar pequeñas partículas (del orden de  $35\mu\text{m}$ ) sólidas contra una superficie (sustrato) con energía cinética suficiente para adherirse a esta y generar un revestimiento a temperaturas relativamente bajas.

Las partículas se deforman plásticamente al impactar sobre el sustrato, adhiriéndose al mismo, formando el recubrimiento, por lo que los materiales más ductiles son los más favorables. La deformación plástica de las partículas que llegan al sustrato va a depender, en términos generales, de su comportamiento a altas velocidades de deformación. Así, cuanto más duro sea el sustrato, más se deformarán las primeras partículas que llegan, produciéndose un mayor aplastamiento de la misma. La deformación de la segunda capa de deposición vendrá influenciada por el estado de las partículas depositadas en la primera capa y no por el sustrato, es decir, por sus propiedades mecánicas y la posibilidad de que hayan sufrido endurecimiento por deformación.[6]

Dado que la adherencia tiene lugar por deformación plástica, materiales ideales para obtención de recubrimientos mediante Cold Spray son aquellos metales con empaquetado de alta densidad y estructura cristalina cúbica centrada en las caras como es el caso de aluminio, cobre y níquel.[1]

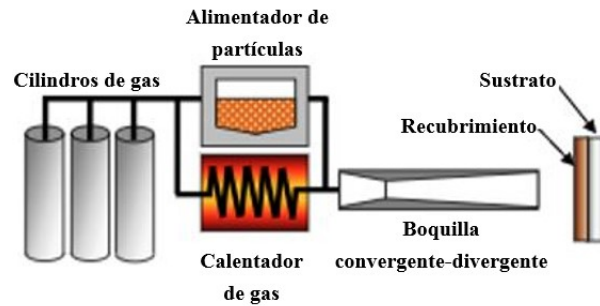


Figura 2.1: Esquema proceso manufactura Cold Spray

El proceso de Cold-Spray, esquematizado en la Figura 2.1, requiere del calentamiento de un gas portador presurizado, el cual típicamente es nitrógeno, helio o aire, este se expande a través de una boquilla convergente-divergente. En la sección divergente de la boquilla el gas llega a velocidades supersónicas a medida que el gas portador se expande hacia la salida de la boquilla. El material pulverizado se inyecta en el chorro de gas presurizado corriente arriba o corriente abajo de la boquilla convergente-divergente[3].

Este tipo de proceso de recubrimiento es beneficioso para sustratos que son compuestos por materiales sensibles al calor o que tienden a oxidarse, ya que al ser un proceso cuya deposición del material se realiza en estado sólido (a diferencia de otros procesos de Therma Spray) genera que no exista una zona afectada por el calor lo que ayuda a que no exista transformación de fases, exista bajo estrés térmico y la oxidación sea baja [12]

Para que exista deposición del material y se genere un contacto íntimo entre partículas, es necesario superar una velocidad crítica de partículas, ya que si no se supera esta, solo se generará erosión en el sustrato y no se generará el recubrimiento deseado. Esta velocidad crítica depende específicamente de los componentes del material/ aleación pulverizada y material/ aleación del sustrato [8].

Los parámetros que están involucrados en este proceso son los siguientes:

- Tipo de gas.
- Temperatura promedio del gas.
- Presión promedio del gas.
- Distancia de aspersión.
- Flujo másico de partículas pulverizadas.
- Tamaño de partículas pulverizadas.
- Tipo de partículas pulverizadas.
- Velocidad de chorro de partículas y gas.
- Material del sustrato.

- Espesor del recubrimiento.
- Características de la boquilla.
- Otros.

Existen varias teorías sobre que explican la adhesión de las partículas al sustrato. La teoría más aceptada es que cuando una partícula impacta en una superficie, uno o ambos materiales experimentan una alta deformación plástica, donde el ablandamiento térmico domina sobre el trabajo y se produce un aumento repentino y localizado de la temperatura, lo que resulta en una reducción del esfuerzo. Este fenómeno se define como inestabilidad de corte adiabático.[5].



### 2.1.1. Inestabilidad de corte adiabático

Para un material de endurecimiento de trabajo típico en condiciones no adiabáticas, la curva de tensión-deformación (indicada como isotérmica.<sup>en</sup> la Figura 2.2) muestra un aumento monótonico de la tensión de flujo con deformación plástica. Sin embargo, en condiciones adiabáticas, la energía de la deformación plástica se disipa en forma de calor, aumentando la temperatura en la zona deformada, este aumento de temperatura causa un ablandamiento del material.

En consecuencia, el endurecimiento por deformación disminuye y el esfuerzo de fluencia alcanza un valor máximo, después de lo cual se produce un descenso monótonico de este con la deformación plástica (la curva etiquetada como .<sup>A</sup>diabática.<sup>en</sup> la Figura 2.2). En un material ideal con distribuciones uniformes de tensión, deformación, temperatura y microestructura de los materiales, el ablandamiento puede continuar indefinidamente. Sin embargo, en materiales reales, las fluctuaciones en el esfuerzo, la deformación, la temperatura o la microestructura, y la inestabilidad inherente del ablandamiento de la deformación pueden dar lugar a la localización de cizallamiento.

En tales circunstancias, la cizalladura y el calentamiento (y, en consecuencia, el ablandamiento) se vuelven altamente localizados, mientras que el esfuerzo y el calentamiento en las regiones de material circundante prácticamente se detienen. Esto, a su vez, hace que la tensión caiga rápidamente (la curva denotada " Localización " en la Figura 2.2).[7].

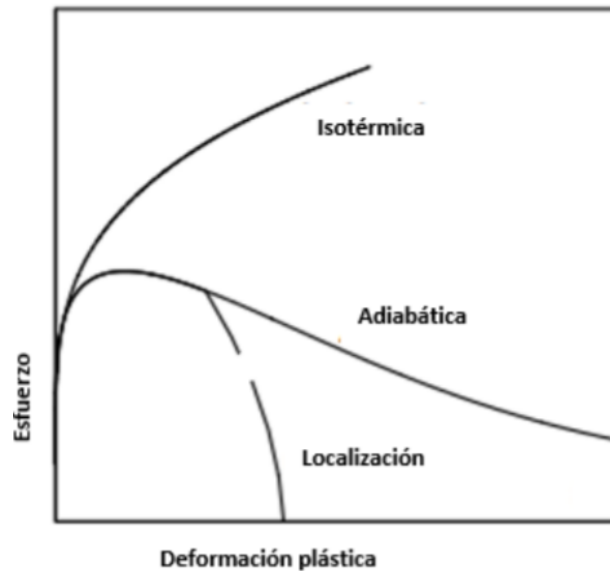


Figura 2.2: Inestabilidad de corte adiabático

## 2.2. Compuestos Intermetálicos

Un compuesto Intermetálicos es una aleación que resulta de mezclas homogéneas de dos o más metales fundidos. En el caso de una aleación binaria, por ejemplo, un compuesto Intermetálicos es una fase intermedia entre sus dos elementos constituyentes, y sus características son por tanto diferentes a la de estos.[9]

### 2.2.1. Diagrama de fases Cu-Al

El diagrama de fase de equilibrio como se muestra en la Figura 2.3, contiene 5 compuestos Intermetálicos estables a temperatura ambiente y 7 compuestos adicionales estables a temperatura elevada.

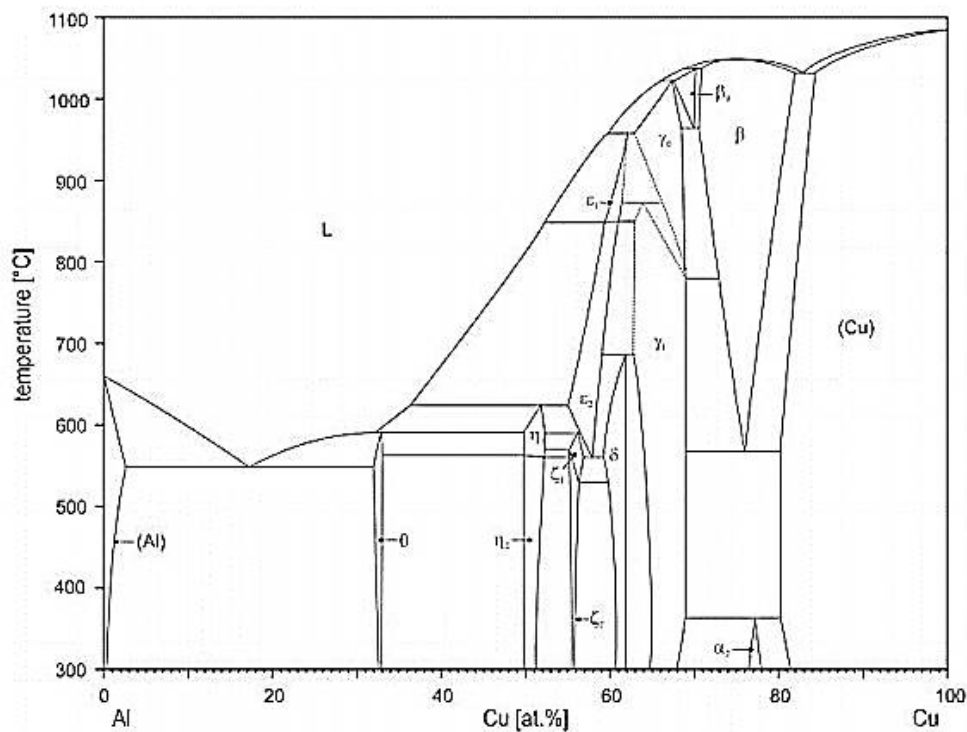


Figura 2.3: Diagrama de fase Cobre y Aluminio [9]

En la siguiente Tabla 2.1 se presentan las características principales de las fases presentes en el diagrama de fase

Tabla 2.1: Fases Cu-Al en porcentaje atómico.

Fase	Rango de composición	Símbolo Pearson	Tipo de estructura
$\Theta$	31.9-33.0	tI12	$Al_2Cu$
$\eta_1$	49.8-52.4	oP16 / oC16	Desconocida
$\eta_2$	49.8-52.3	mC20	AlCu
$\varsigma_1$	55.2-59.8	hP42	$Al_2Cu_4$
$\varsigma_2$	55.2-56.3	oI24-3.5	$Al_2Cu_{4-\delta}$
$\varepsilon_1$	59.4-62.1	cúbica	-
$\varepsilon_2$	55.0-61.1	hP4	NiAs
$\delta$	59.3-61.9	hR52	$Al_4Cu_9(r)$
$\delta_0$	59.8-69	-	$Cu_5Zn_8$
$\gamma_1$	52.5-59	cP52	$Al_4Cu_9$
$\beta_0$	67.6-70.2	Desconocida	-
$\beta$	70.6-82.0	cI2	-
$\alpha_2$	76.5-78	-	-

### 2.2.2. Tratamiento térmico

Es el conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento bajo condiciones controladas de:

- Temperatura: Magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica. Está relacionada directamente con la energía cinética, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que sea mayor la energía cinética de un sistema, su temperatura es mayor.
- Tiempo de permanencia: Tiempo en que la muestra u objeto permanece bajo tratamiento térmico.
- Presión: Magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie.
- Velocidad: Magnitud física de carácter vectorial que relaciona el cambio de posición (o desplazamiento) con respecto al tiempo.

Parámetros que se pueden variar para cambiar las propiedades mecánicas del material al cual se somete al tratamiento térmico debido a la modificación de la estructura cristalina de este. Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina, mediante procesos de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada. [2]

Dentro de las propiedades que se pueden modificar mediante un tratamiento térmico son Dureza, Tenacidad, Maquinabilidad y Resistencia al desgaste

Dentro de las etapas del tratamiento térmico, destacan las siguientes

- Recuperación: La recuperación comprende una serie de fenómenos que ocurren a tem-

peraturas más bien bajas, con respecto a la temperatura de fusión del material, entre los que se pueden destacar la Aniquilación de defectos puntuales, Poligonización y Caída de la resistividad eléctrica.

- Recristalinización: Si un metal previamente deformado en frío, es recocido a una temperatura suficientemente alta, (temperatura de recristalización), aparecen nuevos cristales en la microestructura, los que tienen idéntica composición y estructura reticular que los antiguos granos no deformados. Estos nuevos cristales surgen en zonas con alta densidad de dislocaciones
- Crecimiento granular: En un metal completamente recristalizado, la fuerza impulsora para el crecimiento de los granos corresponde a la energía de superficie de bordes de estos. El crecimiento de los nuevos granos se produce por movimiento de la interfase grano recristalizado-grano deformado

### Control del tratamiento térmico

- Temperatura de recristalinización: La temperatura de recristalización corresponde a la temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora.
- Temperatura de fusión: Se define como la temperatura a la que se produce la transición de fase del estado sólido al líquido a presión atmosférica normal
- Tiempo de permanencia: Periodo de tiempo en el cual el objeto se encuentra en tratamiento térmico.

Tabla 2.2: Temperaturas de fusión y recristalización Al y Cu [11]

Metal	Temperatura de fusión [C°]	Temperatura de Recristalinización [C°]
Aluminio	660	150
Cobre	1085	200

Dado que el movimiento de átomos en un tratamiento térmico ocurre principalmente por difusión, es necesario estudiar el mecanismo de este proceso, considerando la velocidad de este como también los factores que influyan en la difusión.

### 2.2.3. Difusión

La difusión es el movimiento de partículas dentro de un material, trasladándose de un punto normal de la red y ocupar una vacancia cercana o intersticio dependiendo de la diferencia de radio atómico que exista entre los componentes.

La capacidad de los átomos y de las imperfecciones para difundirse aumenta conforme se aumenta la temperatura, o los átomos incrementan su energía térmica. La razón de movimiento está relacionada con la energía térmica mediante la ecuación de Arrhenius.[11]

$$\text{Razón de movimiento} = C_0 * \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.1)$$

$C_0$  = Constante

$R$  = Constante de los gases( $1987[\frac{\text{calK}}{\text{mol}}]$ )

$T$  = Temperatura[K]

$Q$  = Energía de activación $[\frac{\text{cal}}{\text{mol}}]$

Existen varios tipos de mecanismos de difusión, siendo más relevante mencionar los siguientes.

### Mecanismo de difusión heterogénea por vacancia

Este tipo de difusión ocurre cuando difunden átomos de distinta naturaleza, pero cuyos radios atómicos son similares. El átomo abandona su sitio en la red para llenar una vacancia cercana. El número de vacancias incrementa al aumentar la temperatura, ayuda a determinar la extensión de los átomos sustitucionales.

El átomo originalmente está en una ubicación de baja energía y relativamente estable. A fin de pasar a una nueva posición, el átomo debe vencer una barrera energética llamada energía de activación  $Q$ .

### Mecanismo de difusión intersticial

Cuando en la estructura cristalina está presente un átomo intersticial, este átomo pasará de un intersticio a otro. Para este mecanismo no es necesario que existan vacancias. En parte porque el número de sitios intersticiales es mucho mayor que el de vacancias, por tanto, se espera que la difusión intersticial sea rápida. A medida que la temperatura es mayor, los átomos adquieren mayor energía cinética, vibran más, lo que facilita el movimiento de un intersticio a otro.

### Velocidad de difusión, Primera ley de Fickl

La velocidad a la cual se difunden los átomos en un material se puede medir mediante el flujo  $J$ , que se define como el número de átomos que pasa a través de un plano de superficie unitaria por unidad de tiempo. La primera ley de Fick determina el flujo neto de átomos.

En la ecuación 2.3 se expresa la ley mencionada anteriormente:

$$J = D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Donde:

J= flujo atómico

D= Difusividad

$\frac{\Delta c}{\Delta x}$  = Gradiente de concentración

La difusividad o coeficiente de difusión, es un valor que representa cuan fácil un soluto se puede mover en un disolvente determinado, este coeficiente depende el tamaño y forma del soluto, como también de la viscosidad del solvente y la temperatura en la cual ocurre este proceso.

En cuanto al flujo atómico, mide la cantidad de sustancia que fluye a través de una unidad de área durante un intervalo de una unidad de tiempo.

Por otro lado, el gradiente de concentración describe la dirección y en qué proporción se produce un cambio en la concentración de un soluto disuelto en una solución.

Tabla 2.3: Tipo de difusión entre Al y Cu.

Auto difusión por vacancias		
Par de difusión	Q [cal/mol]	D <sub>0</sub>
Al en Al CCC	32200	0,1
Cu en Cu CCC	49300	0,36
Difusión heterogénea por vacancias		
Par de difusión	Q [cal/mol]	D <sub>0</sub>
Al en Cu	39500	0,045

El coeficiente de difusión D está relacionado con la temperatura a través de la ecuación de Arrhenius de la siguiente manera.

$$D = D_0 * \exp \frac{-Q}{RT} \quad (2.3)$$

Donde:

D<sub>0</sub> = Constante de difusividad

R = Constante de los gases (1987 [ $\frac{cal}{mol \cdot K}$ ])

T = Temperatura [K]

Q = Energía de activación [ $\frac{cal}{mol}$ ]

Lo que implica que a medida que se incrementa la temperatura de un material, también se incrementa el coeficiente de difusión y el flujo de átomos. A temperaturas más altas, la energía térmica suministrada a los átomos en difusión permite que estos venzan la barrera de energía de activación y se muevan con mayor facilidad a nuevos sitios en la red.[2] Los

factores que afectan la difusión y la energía de activación de un material son la estructura cristalina, temperatura de fusión, tipo de enlace de los materiales, temperatura y tiempo de permanencia

## 2.3. Perfil de composición, segunda ley de Fick

La segunda ley de Fick describe el estado dinámico de la difusión de átomos la cual nos permite calcular la concentración de una de las especies en difusión cerca de la superficie del material en función del tiempo y distancia siempre y cuando el coeficiente de difusión  $D$  permanezca constante y las concentraciones de átomos en difusión en la superficie y dentro del material se mantengan sin modificación.[11]

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2.4)$$

Donde

$C_s$  = Concentración constante de los átomos a difundir en la superficie del material.

$C_0$  = Concentración inicial en el material de los átomos a difundir.

$C_x$  = Concentración del átomo en difusión en una posición  $x$  bajo la superficie después de un tiempo  $t$ .

# Capítulo 3

## Metodología

El estudio y exámen micrográfico Se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos para observar las características estructurales microscópicas.

Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido una muestra, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso. Como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas.

El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos, tratamientos térmicos y composición general[4].

La metodología de este trabajo consiste en elaborar recubrimientos de Al-Cu sobre sustrato de aluminio para estudiar la presencia y evolución de los intermetálicos formados después de someterlos a diversos tratamientos térmicos. El estudio microestructural se realizó mediante microscopía óptica y electrónica.

### 3.1. Elaboración de recubrimiento Al-Cu sobre sustrato de aluminio

Para el sustrato se utilizó una barra de 0,25 pulgadas de ancho de Aluminio 6061-T6.

Con respecto al proceso de manufactura para realizar el recubrimiento, se realizó mediante Cold Spray con el Equipo EP Series SST Low Pressure Cold Spray System (Centerline Ltd., Windsor, Ontario, Canada), se utilizó una boquilla de polímero tipo divergente de 120 mm de largo con una gargante de 2 mm de diámetro. Los parámetros para realizar el recubrimiento se detallan en la Tabla 3.1.



Tabla 3.1: Parámetros de proceso de manufactura Cold-Spray.

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia de separación	15	mm
Step size	1	mm
Number of step	60	pasos
Overlay passes	1	-
Velocidad Transversal	100	mm/s
Rueda de alimentación	Grande	-
tasa de gas del alimentador	30	SCFH
Gas	N2	-
Tipo de boquilla	Polímero	-
Temperatura de estancamiento	350	C
Presión de estancamiento	500	psi

En la siguiente figura 3.1, se detallan los parámetros del proceso Cold Spray

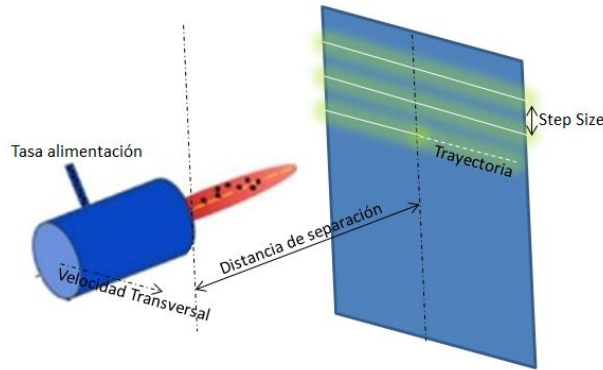


Figura 3.1: Diagrama de parámetros de proceso de manufactura Cold-Spray

Para el recubrimiento, se utilizaron polvos de aluminio (SST- A5001) (Centerline (Windsor) Ltd. Windsor, Ontario, Canada) con una composición de 99,5 % Al y polvos de Cobre (SST- A5003) (Centerline (Windsor) Ltd. Windsor, Ontario, Canada) con una composición de 99,7 % Cu. La mezcla de polvos para realizar el recubrimiento fue de 60 % Cu y 40 % Al en masa.

En cuanto a la eficiencia de la deposición de polvos se detalla lo siguiente (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Tasa de deficiencia del proceso de manufactura.

Tasa de alimentacion g/min	Eficiencia Deposición	Desv st
17.473	25.83	4.53

En la figura 3.2 se puede observar imágenes obtenidas por microscopía electrónica de los polvos de Al y Cu utilizados en el recubrimiento realizado.

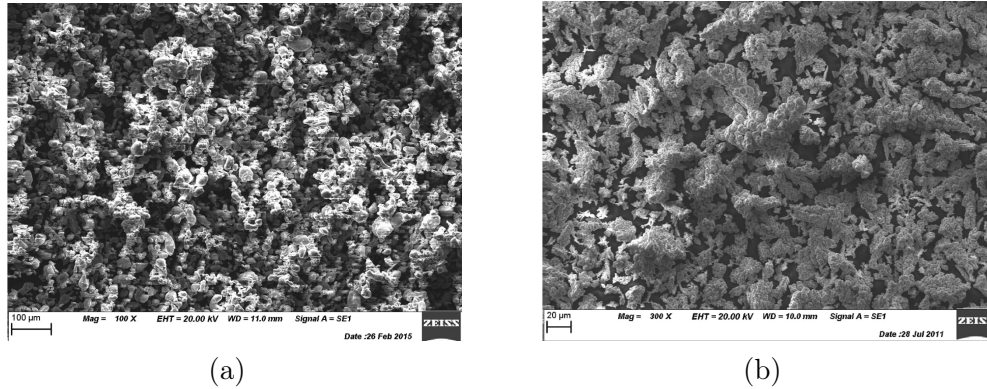


Figura 3.2: polvos de recubrimiento Aluminio (a) y Cobre(b), ambas obtenidas por microscopía electrónica.

## 3.2. Preparación de muestras para realizar tratamiento térmico

### 3.2.1. Corte transversal de las muestras

Una vez obtenida la muestra de aluminio con recubrimiento cobre-aluminio por cold spray, se procedió a realizar el corte de las muestras para someterlas a tratamiento térmico.

Se realizaron cortes transversales con un disco diamantado en la cortadora marca Mecatome modelo T201 A. Se utilizó una velocidad de corte de 700 rpm y una velocidad de avance de la mesa de 6 mm/min

Las dimensiones de las muestras se detallan en el siguiente recuadro.

Tabla 3.3: Tamaño de muestras.

Nombre muestra	Corte [cm]
M1,M2,M3,M4	1,5x1,5

### 3.2.2. Tratamiento térmico

Posterior a realizar los cortes previamente mencionados, se procedió a someter a las muestras M1, M2, M3, M4 a diferentes tratamientos térmicos, en el cual tanto la presión como la temperatura se mantenían constante, a 1 atm y 400°C respectivamente. Por otro lado, el tiempo de permanencia fue diferente para cada una de estas muestras.

Para realizar este tratamiento térmico se utilizó el Horno experimental de marca BRASIMET, una vez encendido el horno, se configuró la temperatura en 400°C. Una vez llegada esa temperatura se esperó que se estabilizara durante 5 minutos y después se procedió a introducir todas las muestras dentro de este horno.

Las muestras se fueron sacando del horno rápidamente según el tiempo de permanencia establecido en el proceso de investigación. Era de suma importancia realizar este proceso lo más rápido posible con el objetivo de no dañar el tratamiento térmico de las muestras restantes en el horno. Posterior a sacar las piezas del horno, se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

En la siguiente tabla se detallan los parámetros del tratamiento térmico realizado a cada muestra.

Tabla 3.4: Condición de tratamiento térmico.

Nombre muestra	Temperatura [C]	Tiempo de permanencia [min]	Presión
M1	400	15	Atmosférica
M2	400	30	Atmosférica
M3	400	60	Atmosférica
M4	400	120	Atmosférica

Dado que este estudio requiere que la temperatura de tratamiento térmico no supere la temperatura eutéctica de esta aleación, la cual bordea los 500°C, se utiliza una temperatura de 400°C, que es el 80% de la temperatura eutéctica. Todo esto con el objetivo de asegurar que no exista cambio de fase en el proceso.

### 3.3. Preparación de la superficie

El procedimiento de preparación de la superficie consistió en realizar cortes transversales a la muestra para posteriormente montarlas en baquelita. Luego de montarlas, se realizó desbaste y pulido con el objetivo de preparar la superficie para posterior análisis en microscopio electrónico y óptico.

### 3.3.1. Corte transversal de las muestras

Posterior al tratamiento térmico se realizó un segundo corte transversal a las muestras con el objetivo de montarlas posteriormente en baquelita.

Se realizaron cortes transversales con un disco diamantado en la cortadora marca Mecatome modelo T201 A. Se utilizó una velocidad de corte de 700 rpm y una velocidad de avance de la mesa de 6 mm/min.

Las dimensiones de las muestras se detallan en el siguiente recuadro

Tabla 3.5: Dimensiones de muestras de aluminio.

Nombre muestra	Corte [cm]
Muestra Base, M1.M2.M3.M4	0,7x1,5

### 3.3.2. Montaje

Debido al tamaño de las muestras, fue necesario montarlas para facilitar el pulido intermedio y final.

La resina termofijadora que se emplea para montar las muestras es la baquelita conductora para las muestras Muestra base, M3, M4 y no conductora para las muestras M1 y M2. Para realizar este montaje se necesita el siguiente instrumental

Figura 3.3: Instrumental de montaje

- Cilindros concéntricos de montaje
  - Cilindro macizo
  - Cilindro hueco
- Porta muestras macizo
- Calefactor
- Prensa
- Muestra a montar
- Baquelita



Primero la muestra se pone con la cara de la zona de corte apollada contra el porta muestra de metal, posteriormente se separan los cilindros concentricos, y el cilindro hueco se inserta sobre el porta muestra quedando esta dentro del cilindro de montaje, luego se procede a colocar la cantidad correcta de polvo de baquelita dentro del cilindro de montaje.

Se introduce el cilindro maciso dentro del cilindro hueco, dejando atrapada la muestra y la baquelita contra el cilindro hueco y el porta muestra.

Se procede a ubicar los cilindros con el porta muestras y la muestra en la prensa de montar. Luego se introduce el calefactor el cual tiene que como objetivo aumentar gradualmente la temperatura hasta los  $150^{\circ}\text{C}$  para que la baquelita cambie de estado y se adhiera a la muestra. Por otro lado es necesario simultaneamente tiempo realizar una compración de moldeo con la prensa hidraulica hasta los 4000 psi.

Una vez que la baquelita está adherida y curada se alcanza los  $150^{\circ}\text{C}$ , la base con la muestra se extrae del dado de moldeo mientras está caliente.

Despues se desmonta y se extrae la pieza de metal montada en la baquelita como se muestra en la figura

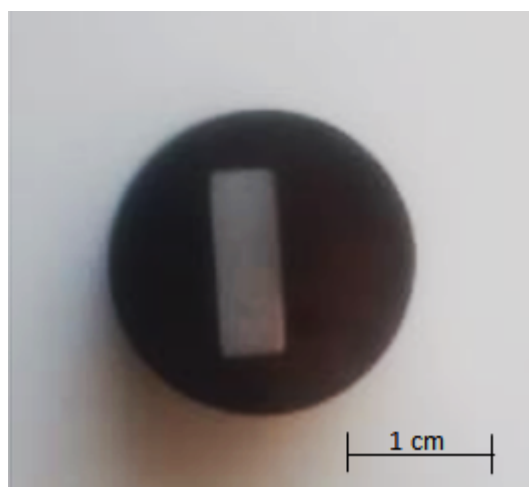


Figura 3.4: Muestra de baquelita.

### 3.3.3. Desbaste y pulido

El aluminio es un metal muy blando y dúctil que puede ser difícil de preparar mecánicamente. Es importante que las deformaciones desarrolladas durante el corte y rectificado se eliminen a través de los pasos de pulido. Además, hay un riesgo de granos incrustados, es por esta razón que el pulido de estas muestras, al ser de manera manual, la compresión contra el disco de desbaste y de pulido debe ser muy suave para disminuir el riesgo de incrustación de las partículas abrasivas. El Desbaste de cada muestra se realizó de igual manera en todas ellas, en donde se realizó como primera parte un desbaste general (DG), 5 desbastes finos (DF) y dos pulidos con paños humedecidos con solución de Alúmina de 1 y 0,05  $\mu\text{m}$  [4]. Como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Especificaciones técnicas en el proceso de desbaste y pulido para Muestra Base, M1, M2, M3, M4

Desbaste y pulido								
Desbaste / Pulido	DG	DF1	DF2	DF3	DF4	DF5	P1	P2
Disco / Paño	SiC Papel	SiC Papel	SiC Papel	SiC Papel	SiC Papel	SiC Papel	Paño tela	Paño tela
Tipo abrasivo	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	Alumina	Alumina
Tamaño de grano	P220	P320	P500	P800	P1000	P1200	1	0,05
Lubricante	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua destilada	Agua destilada
Rotación del disco (RPM)	300 /150	300 /150	300 /150	300 /150	300 /150	300 /150	150	150

### 3.4. Medición de la Microdureza

Se realiza medición de microdureza vickers a cada muestra en cinco puntos diferentes con el objetivo de obtener un promedio de estas.

La máquina que se utilizó para realizar este procedimiento se muestra en la siguiente figura



Figura 3.5: Microdurómetro STRUER DURAMIN 5

La que consta de los elementos detallados a continuación

- (1) Ocular
- (2) Base ocular
- (3) Botón de grabar
- (4) Botón base ocular 2
- (5) Objetivo 10 x e indentador
- (6) Base porta muestra
- (7) Perilla desplazamiento base
- (8) Botón para enfocar
- (9) Panel

El procedimiento de uso, consiste básicamente en encender el equipo, luego ubicar la muestra debajo del objetivo 10 x para enfocar, con ayuda del ocular, el punto que se desea medir. Luego presionar START en el panel y esperar 10 segundos.

Posteriormente se alinean los puntos en donde se desea medir, a continuación presionar ZERO SET en el panel. Una vez setiado el zero, se procede a pulsar el botón grabar y anotar el HV deseado, que en este caso es 0,2 HV.

Este procedimiento se repite 4 veces por muestra para obtener 4 valores de microdureza, y de esta forma calcular un promedio.

### 3.4.1. Microscopía óptica

Se realizó microscopía óptica en cada pieza con el objetivo de ver el cambio estructural que esta obtuvo tras ser sometida al tratamiento térmico. Para realizar esto se utilizó el microscopio OPTIKA MICROSCOPE ITALY IM-5-MET

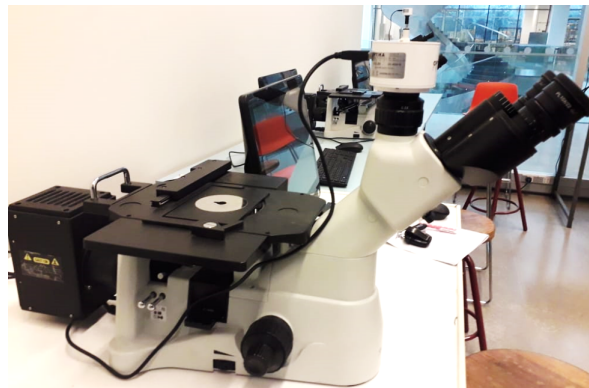


Figura 3.6: Microdurómetro STRUER DURAMIN 5.

El procedimiento de uso consiste en primer lugar encender el microscopio, ajustar la luz, luego poner la muestra, previamente pulida a espejo, boca abajo en el porta muestras y comenzar a enfocar con un aumento inicial de 10 x.

Posterior a enfocar en cada aumentos disponibles en el microscopio ( 10 x; 20 x; 50 x; 80 x), se tomarán 10 fotografías por cada muestra en cada aumento.



### 3.4.2. Microscopía electrónica

Con el objetivo de obtener una imagen menos contaminada superficialmente, como también la posibilidad de obtener mayor información sobre componentes en cada punto para realizar una identificación de las fases, se procedió a realizar microscopía electrónica con el microscopio de barrido (SEM, FEI Quanta 250) mostrado en la figura 3.7



Figura 3.7: SEM, FEI QUANTA 250.

En el caso de la Muestra Base y Muestra 2, sin tratamiento térmico y con un tratamiento de 1 hora respectivamente, al ser montadas en baquelita conductora, se procedió a poner en la parte inferior de estas un sticker de carbono con el objetivo de conducir los electrones y de esta manera poder obtener una imagen desde el microscopio. En cambio las muestras 1,3,4 las cuales se encuentran montadas en baquelita no conductora, fue necesario realizar un recubrimiento de oro y en la parte anterior poner un sticker de cobre conductor con el fin de obtener la imagen del microscopio.

Posterior a esto las muestras fueron introducidas en la cámara del microscopio y generación de vacío, se procedió a la calibración para posteriormente obtener las imágenes deseadas.

La imagen se obtiene rastreando la superficie de la muestra con un haz de electrones. Este haz de electrones incide sobre la muestra e interactúa con los átomos de dicha muestra, generando electrones secundarios o retrodispersados del haz inicial. Típicamente las imágenes se consiguen con los electrones secundarios.

El microscopio electrónico está formado básicamente por tres partes: Primero la fuente de electrones que ilumina la muestra (objeto). El haz de electrones que incide sobre la muestra es generado por un Filamento de tungsteno. Segundo, las lentes electromagnéticas (convergentes) que dirigen el haz de electrones hacia la muestra. Las lentes electromagnéticas son

las encargadas de enfocar el haz de electrones, las cuales se componen esencialmente de un conjunto de placas mantenidas a un diferente potencial, esta diferencia, acelera el haz de electrones. Estas placas tienen un orificio en el centro por donde pasan los electrones y la curvatura del campo eléctrico que se genera permite el enfoque de la imagen. Y por último el sistema que capta e interpreta la imagen. Depende de la muestra y del tipo de análisis que se quiera realizar.

Los detectores del microscopio electrónico son:

- Detector de electrones secundarios (SEI: Secondary Electron Image), este se utiliza para obtener imágenes de alta resolución.
- Detector de electrones retrodispersados (BEI : Backscattered Electron Image), este detector permite obtener imágenes de composición y topografía de la superficie.
- Detector de energía dispersiva (EDS: Energy Dispersive Spectrometer), este detector captura los rayos X generados por la muestra, lo que permite obtener mediante un software la composición elemental de la muestra.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Muestra Base

En la siguiente sección se mostrarán los resultados de microscopía óptica, electrónica y ensayos de dureza realizados a la Muestra Base.

#### 4.1.1. Microscopia óptica

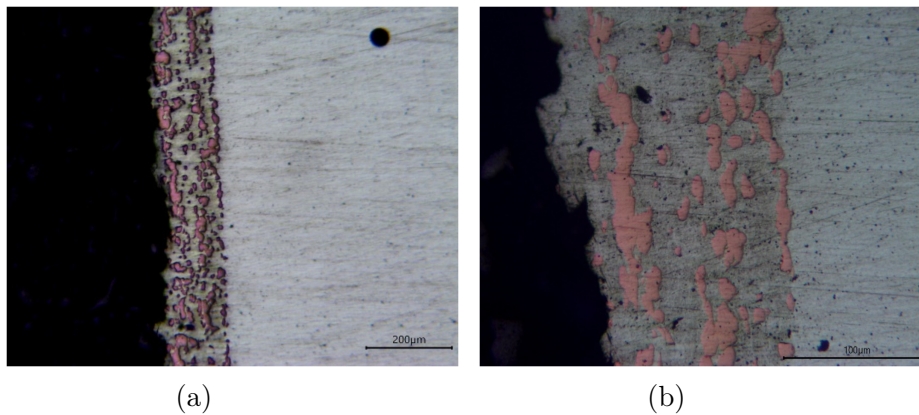


Figura 4.1: Recubrimiento Al-Cu sin tratamiento térmico, Imagen general del recubrimiento(a); Imagen partículas de cobre en el recubrimiento(b)

En la figura 4.1 se puede observar el recubrimiento Al Cu, en donde se pueden distinguir dos clases de partículas, unas de color rojizo, las cuales se presume que sean de cobre y otras de color gris, parecido al color del sustrato de aluminio, por lo cual se presume que es aluminio.

Considerando ciertas las presunciones previamente dichas, se tiene como resultado lo siguiente:

- Porcentaje volumen efectivo de cobre en el recubrimiento:33 %
- Ancho promedio recubrimiento:144,46  $\mu m$
- Numero de pártuculas de cobre:104
- Area promedio total particulas de cobre:24022,87  $\mu m^2$

En cuanto a la morfología de las partículas de cobre se tiene lo siguiente:

Tabla 4.1: Caracterización partículas de cobre sobre el recubrimiento  
Caracterización de las partículas de cobre del recubrimiento.

	Largo [ $\mu m$ ]	Ancho [ $\mu m$ ]	Diámetro [ $\mu m$ ]	Area [ $\mu m^2$ ]
Máximo	131,87	34,50	12,05	4562,70
Mínimo	14,14	5,80	4,76	17,78
Promedio	25,43	10,35	7,70	121,68

#### 4.1.2. Microscopia electrónica

De la figura 4.2 se puede observar que la distribución de las partículas de cobre en el recubrimiento realizado por Cold Spray es homogénea.

El diámetro de las partículas varía desde 4,76 micrómetros hasta los 12 micrómetros, obteniendo un promedio de 7,7 micrómetros.

Por otro lado se puede destacar en la Figura 4.2 que los bordes de estas partículas son curvos pero no siguen ningún patrón de forma establecido.

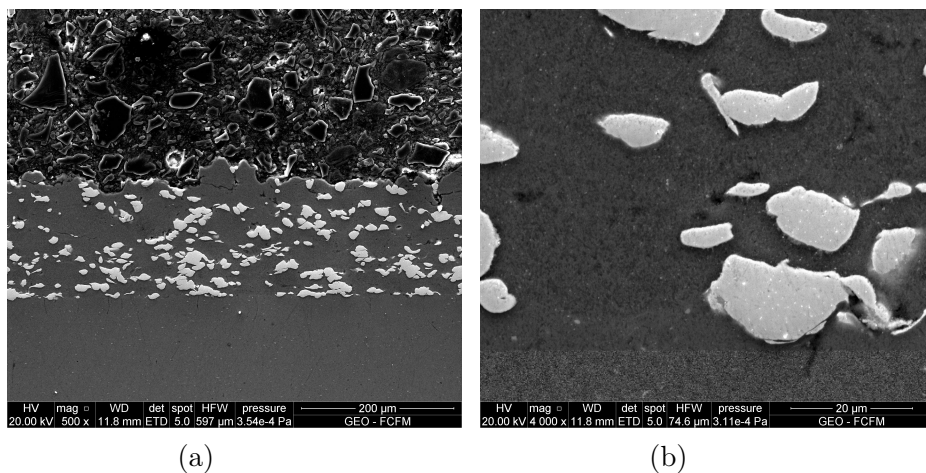


Figura 4.2: Recubrimiento Cu-Al sin Tratamiento térmico, (a) 500x y (b) 4000x ambas obtenidas por microscopía electrónica.

Al realizar un EDS en la partícula de cobre como en la partícula de aluminio, se obtuvieron los siguientes resultados

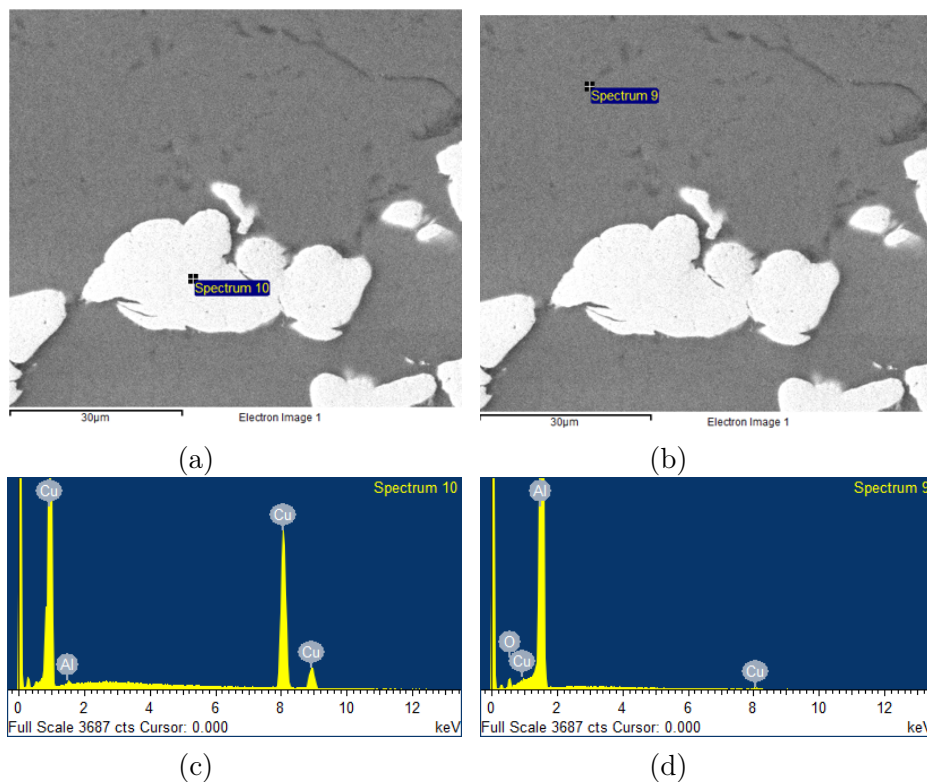


Figura 4.3: Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico

Se puede observar en la figura 4.3 (a) y (c) la composición en ese punto perteneciente a la partícula de cobre tiene un su porcentaje en peso es de 99,3% Cu y 0,7% Al.

y un porcentaje atómico de 98,37% y 1,63% respectivamente.

Por otro lado, si realizamos un análisis de composición en una línea horizontal que abarque la partícula de cobre y las de aluminio, se obtiene el siguiente gráfico de composición

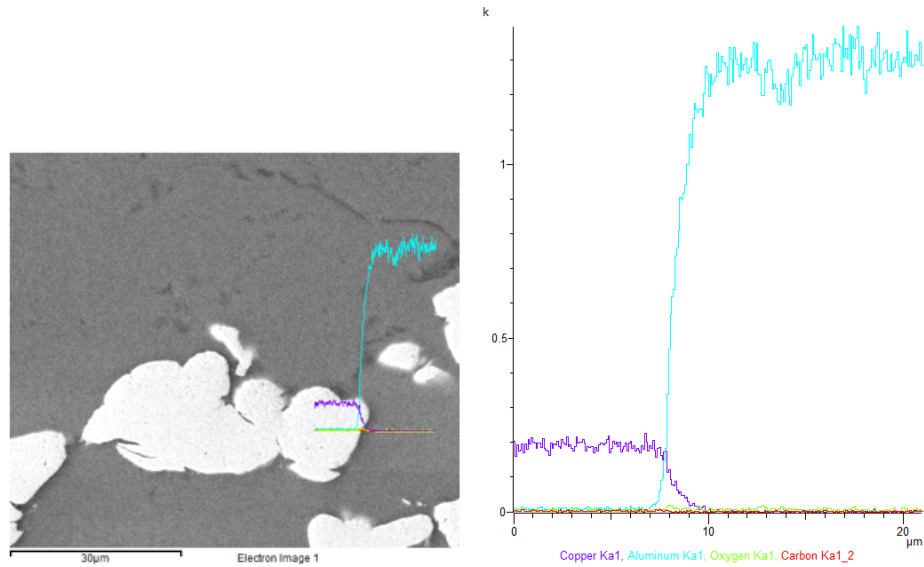


Figura 4.4: EDS en una línea entre partícula de Cu y Al

En la Figura 4.4 se puede observar que existe un punto de quiebre cerca del borde de la partícula de cobre, cuando en donde la composición de al y cobre es igual, posterior a este punto de quiebre la pendiente de aluminio sube bruscamente y la del cobre baja de la misma manera hasta llegar aun valor cercano a cero, y en el caso del aluminio, llega a un valor cercano al 100 %

### 4.1.3. Dureza

Los resultados del ensayo de microdureza con 0,2 HV es el siguiente

Ensayo microdureza				
Muestra	Ensayo 1 [HV]	Ensayo 2 [HV]	Ensayo 3 [HV]	Ensayo 4 [HV]
Base	86,8	81,8	82,2	81,6

Tabla 4.2: Ensayo microdureza muestra base

Genera un promedio de: 83,1 [HV]

## 4.2. Muestra M1

### 4.2.1. Microscopía óptica

La muestra M1 fue sometida a 15 minutos bajo el tratamiento térmico previamente mencionado. En la figura se observa la presencia de nuevas fases identificadas por un cambio de color en donde la opacidad del gris disminuye conforme avanza hacia el centro de color rojizo (cobre), siendo un color gris más claro y brillante.

El ancho del intermetálico mostrado en la figura 4.5 (a) es de  $2\mu m$  aproximadamente, sin

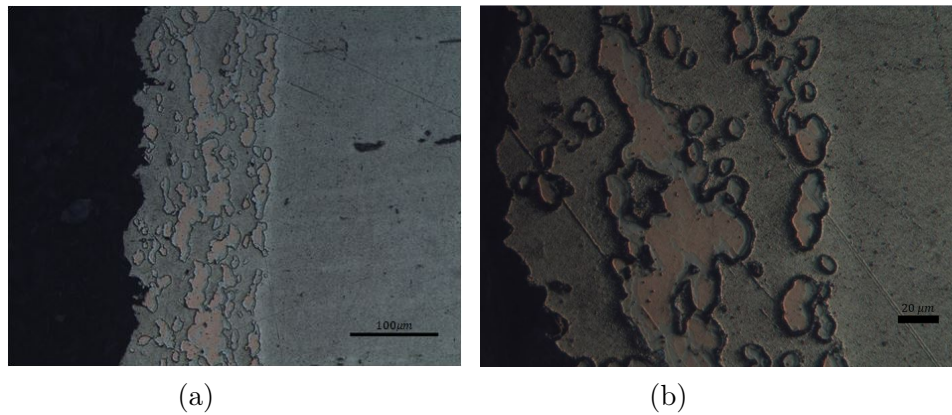


Figura 4.5: vista general del recubrimiento (a), difusión aluminio en cobre en borde de partícula de cobre (b) , ambas obtenidas por microscopía óptica.

embargo, como se muestra en la imagen, el crecimiento del intermetálico no es homogéneo en todos los puntos.

## 4.2.2. Microscopia electrónica

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos tras microscopía electrónica SEM, en donde se puede obtener mayor información en cuanto a la composición de las fases identificadas.

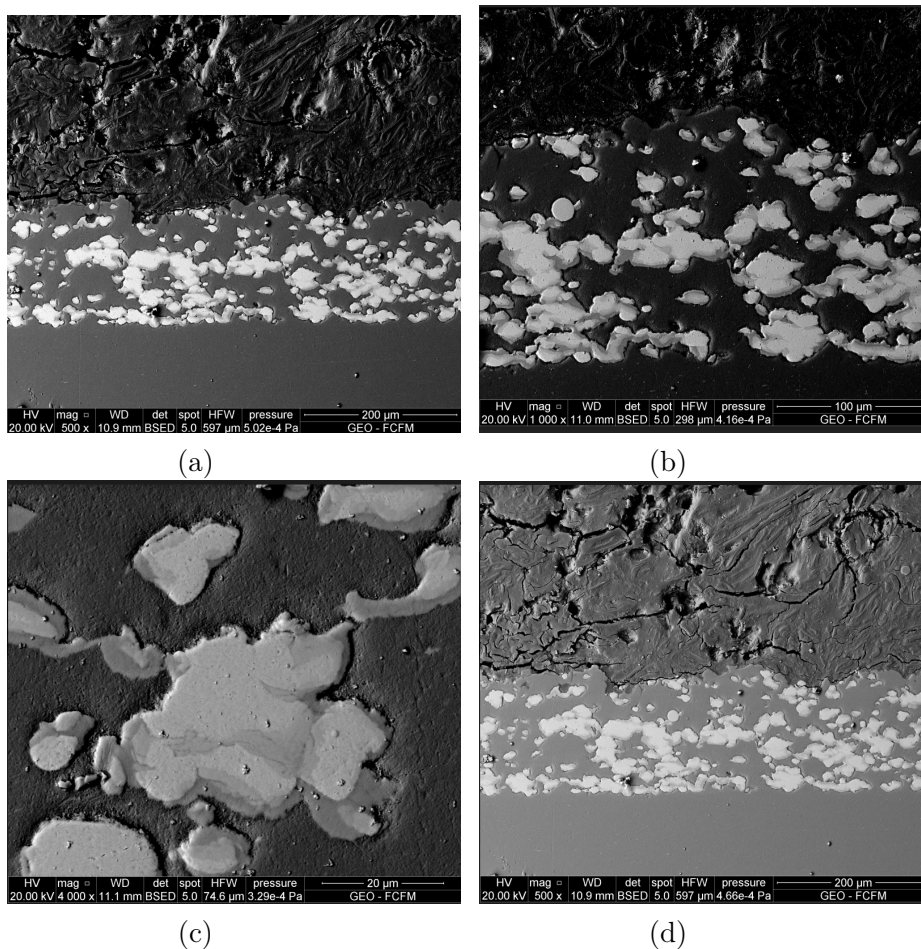


Figura 4.6: Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico

En la Figura 4.6 (a) (b) y (d), se puede ver que el recubrimiento de aluminio puro baja en porcentaje, debido a que se puede apreciar que la tonalidad gris es menor que en la Figura 4.4. Por otro lado, en la Figura 4.6 (c) resalta un cambio de tonalidad gris claro en el centro y en los bordes un gris más oscuro.

Realizando un EDS en un punto en la partícula mostrada en la figura 4.7 (c) se obtienen los siguientes resultados.



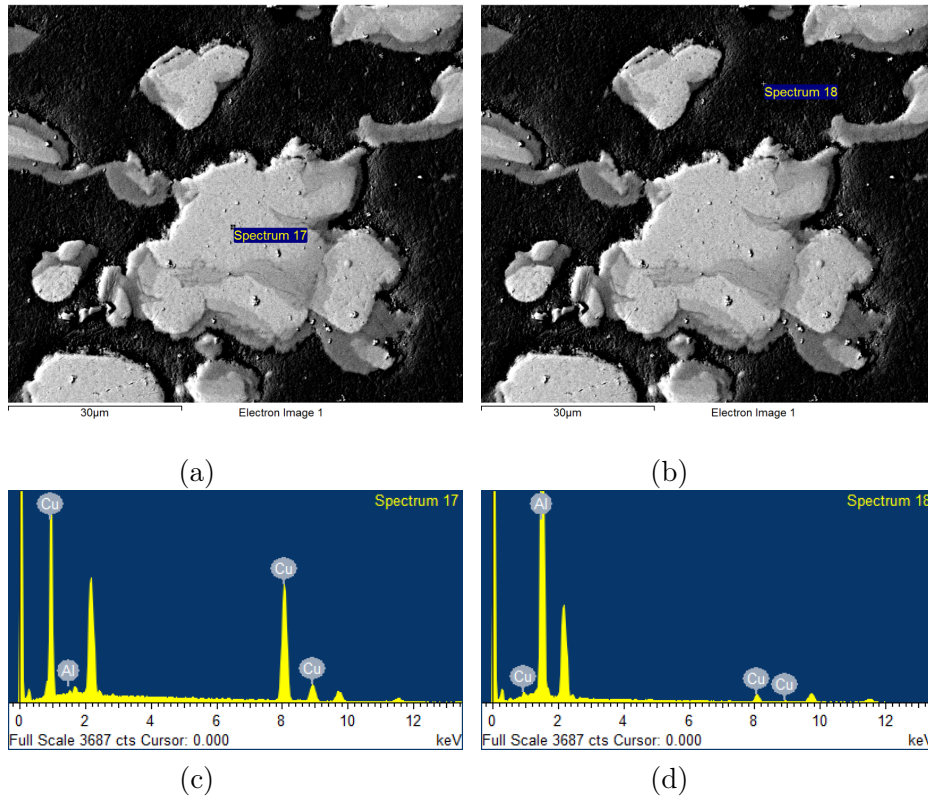


Figura 4.7: Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico

En el centro de la partícula mostrada en la Figura 4.7 (a) se obtuvo que presenta un porcentaje en peso de 98,89% Cu y un 1,11% Al y un porcentaje atómico de 97,93% y 2,57% de Cu y Al respectivamente. Después se realizó el mismo procedimiento fuera de esta partícula 4.7 (b), en donde los porcentajes de peso son 91,00% y 9% de Al y Cu respectivamente. En cuanto a los porcentajes atómicos son de 95,97% y 4,03% de Al y Cu respectivamente.

Realizando un EDS lineal entre las interfases de las partículas del sustrato se obtiene los siguientes resultados

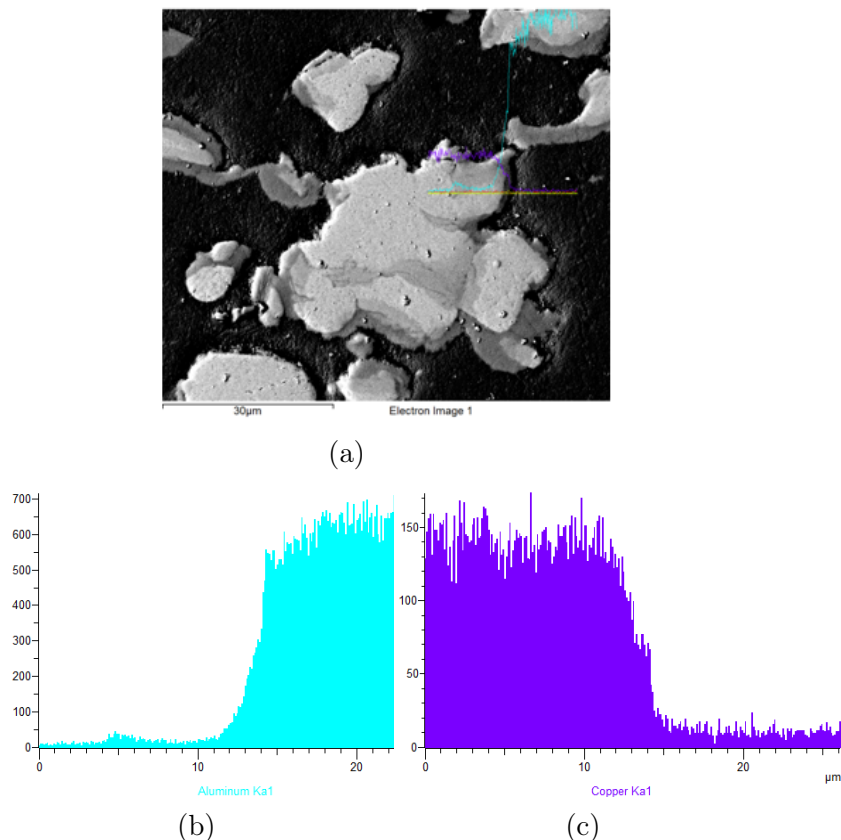
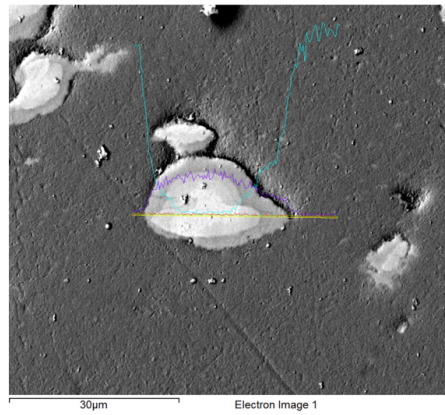


Figura 4.8: Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico

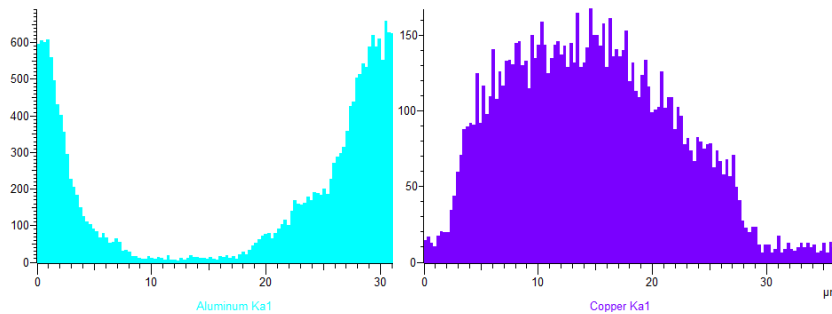
En la Figura 4.8 se puede apreciar como cambia la composición de cobre y aluminio en una línea del recubrimiento, en donde el porcentaje de aluminio sube a medida que el color de la partícula se va oscureciendo hasta llegar un cercano al 100% cuando las partículas son muy oscuras.

Se realizó otro EDS con una partícula más pequeña en donde se ven a simple vista la presencia de distintas fases y los resultados se detallan a continuación

En la Figura 4.8 Y 4.9 se puede ver como cambia la composición en una línea de extremo a extremo de la partícula, aumentando el porcentaje de cobre en el centro hasta llegar a



(a)



(b)

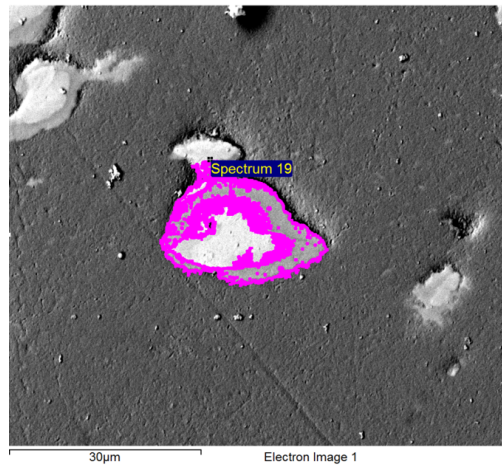
(c)

Figura 4.9: Recubrimiento sometido a 15 minutos de Tratamiento térmico

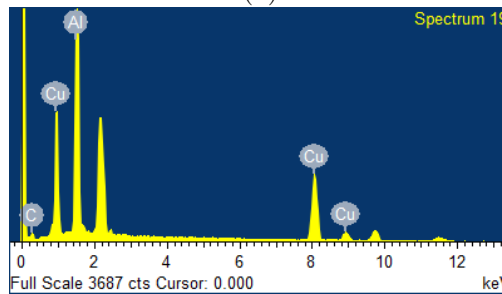
un valor cercano al 100 % y disminuyendo en sus extremos hasta llegar aproximadamente al 0 % .

Si realizamos un estudio de composición en una de las fases presentes en esta partícula mediante EDS, obtenemos los siguientes resultados

En la Figura 4.10, se puede observar que la composición en el área seleccionada en fucia,entre cobre y aluminio, es más homogénea, llegando a un porcentaje en peso de 49,91 % de Cu y 38,79 % de Al y con respecto al porcentaje atómico se tiene un 24,83 % y 45,43 % de Cu y Al respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.10: EDS Partícula de cobre en recubrimiento Cu-Al

### 4.2.3. Dureza

El resultado del ensayo de microdureza con 0,2 HUV es el siguiente

Ensayo microdureza				
Muestra	Ensayo 1 [HUV]	Ensayo 2 [HUV]	Ensayo 3 [HUV]	Ensayo 4 [HUV]
M1	91,4	117,2	94,4	108,1

Tabla 4.3: Ensayo microdureza M1

Genera un promedio de: 102,8 [HUV]

## 4.3. Muestra M2

### 4.3.1. Microscopia óptica

La muestra M2 fue sometida a 30 minutos bajo el tratamiento térmico previamente mencionado. En la figura se observa la presencia de nuevas fases identificadas por un cambio de color en donde la opacidad del gris disminuye conforme avanza hacia el centro de color rojizo (cobre), siendo un color gris más claro y brillante.

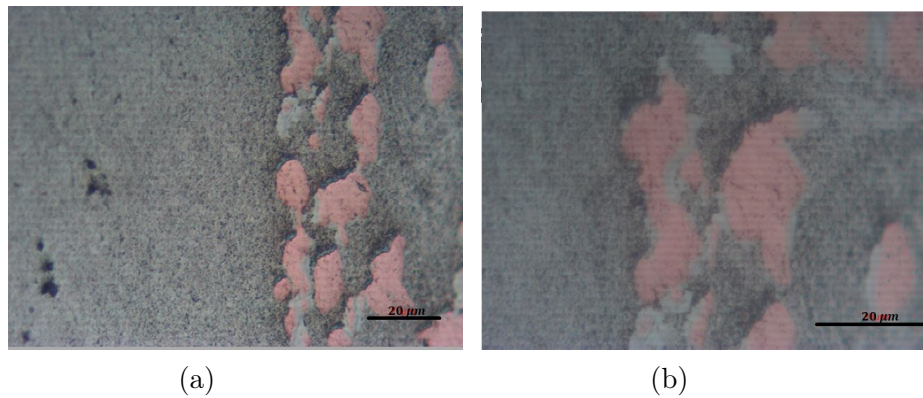


Figura 4.11: vista general del recubrimiento (a), difusión aluminio en cobre en borde de partícula de cobre (b) , ambas obtenidas por microscopía óptica.

En la figura 4.11 se puede observar el crecimiento del tamaño de los intermetálicos en algunas zonas de los bordes de las partículas de cobre. El ancho de la zona de intermetálicos es variable que van de los  $1,3 \mu\text{m}$  a  $8,4 \mu\text{m}$ .

### 4.3.2. Microscopia electrónica

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos tras microscopía electrónica SEM, en donde se puede obtener mayor información en cuanto a la composición de las fases identificadas.

En la Figura 4.12 (a) se puede apreciar el recubrimiento Al-Cu en donde las partículas

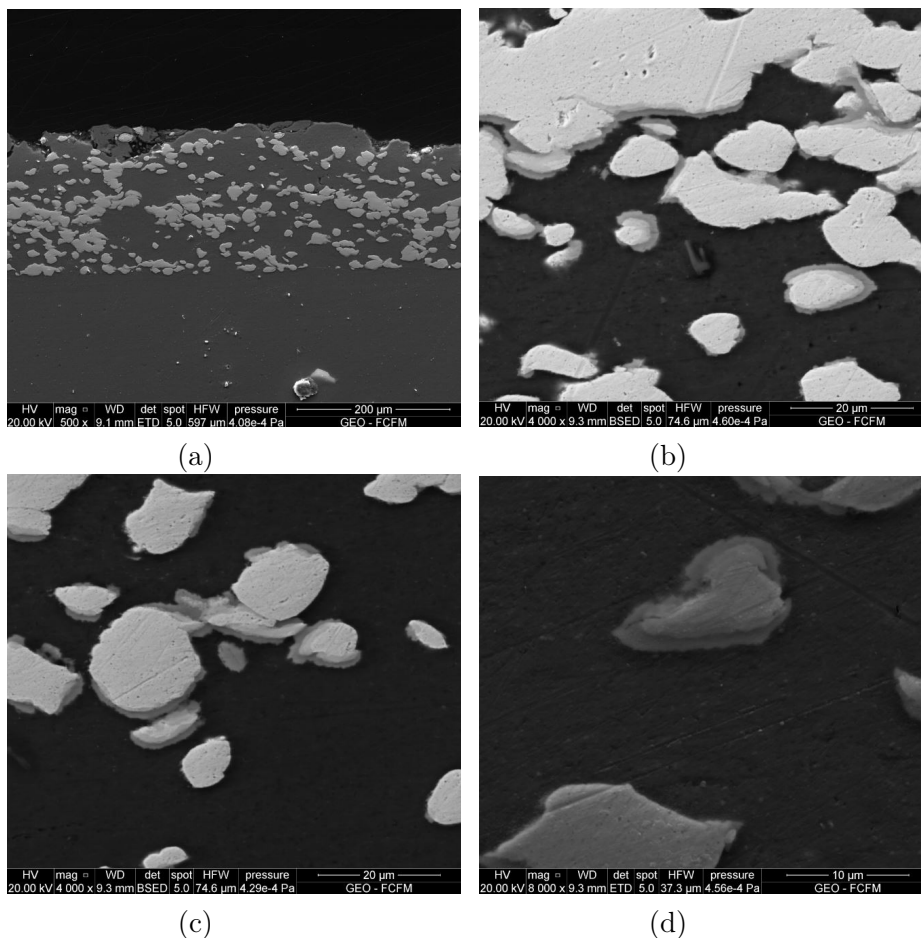


Figura 4.12: Recubrimiento sometido a 30 minutos de Tratamiento térmico

de mayor concentración de cobre, al tener un mayor peso atómico, reflejan más la luz y las partículas se ven de color gris brillante. En las figuras 4.12 (b) y (c), se pueden ver en los bordes de las partículas una tonalidad de gris más opaco, lo cual se atribuye a la presencia de intermetálicos. En la figura 4.12 (d) se puede apreciar una partícula rodeada totalmente de intermetálicos con un grosor de aproximadamente  $1,6 \mu\text{m}$ .

Realizando un EDS en un punto en la partícula mostrada en la figura 4.12 (d) se obtienen los siguientes resultados.

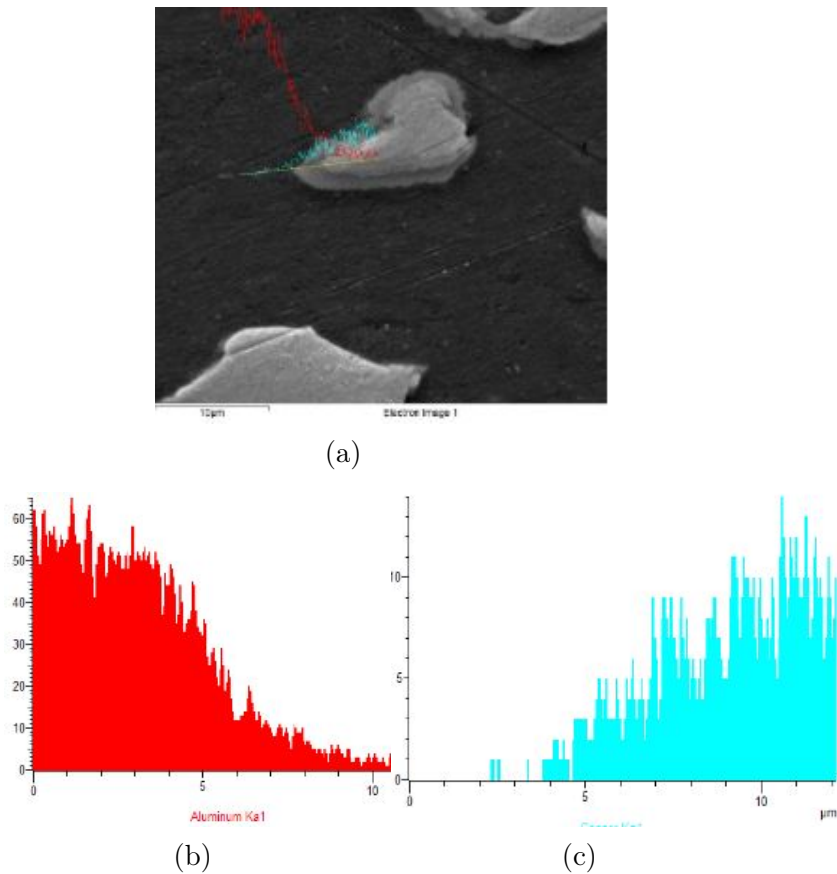


Figura 4.13: Recubrimiento sometido a 30 minutos de Tratamiento térmico

En la Figura 4.13 se puede apreciar como cambia la composición de cobre y aluminio en una línea del recubrimiento, en donde el porcentaje de aluminio sube a medida que el color de la partícula se va oscureciendo hasta llegar un cercano al 100 % cuando las partículas son muy oscuras.

Por otro lado, se puede destacar que la pendiente es menos pronunciada que en la muestra base y en la muestra M1, lo que implica que el ancho de los intermetálicos va aumentando.

Se realizó otro EDS con una partícula más pequeña en donde se ven a simple vista la presencia de distintas fases y los resultados se detallan a continuación

En la Figura 4.14 (a) y 4.14 (b). Se pueden observar dos formas por las cuales se realizó EDS. En la primera se busca seleccionar un área que tenga tonalidades parecidas lo cual implicaría que corresponde a una composición de intermetálico en particular (Figura 4.14 (a)). Los resultados de este procedimiento corresponden a un 71.22 % atómico de Al y un 21.78 % . En la Figura 4.14 (b) se realizó EDS a un área circular, los resultados de este procedimiento corresponden a un 8,84 % atómico de Al y un 91,16 % atómico de Cu.

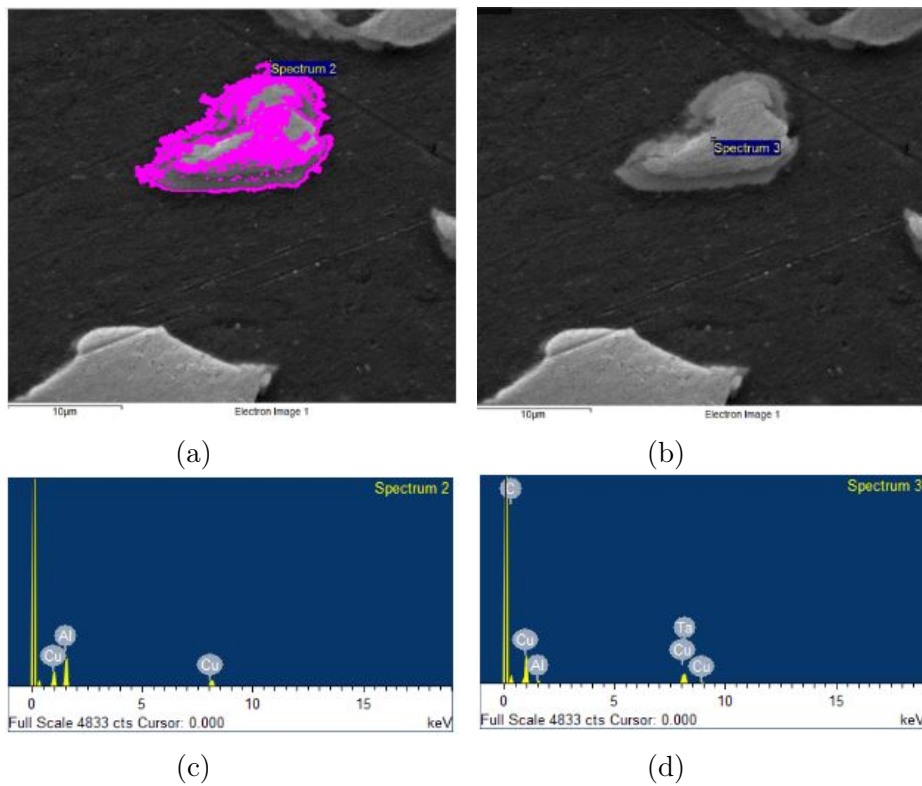


Figura 4.14: EDS Particula de recubrimiento sometido a 30 minutos de Tratamiento térmico

### 4.3.3. Dureza

El resultado del ensayo de microdureza con 0,2 HUV es el siguiente

Ensayo microdureza				
Muestra	Ensayo 1 [HV]	Ensayo 2 [HV]	Ensayo 3 [HV]	Ensayo 4 [HV]
M2	105.4	108.5	109.7	98.2

Tabla 4.4: Ensayo microdureza M2

Genera un promedio de: 105.45 [HV]



## 4.4. Muestra M3

### 4.4.1. Microscopía óptica

La muestra M3 fue sometida a 1 hora bajo el tratamiento térmico previamente mencionado. En la figura se observa un aumento del grosor de las nuevas fases. Por otro lado se puede observar que estas fases crecen de manera homogénea al rededor de la partícula de cobre.

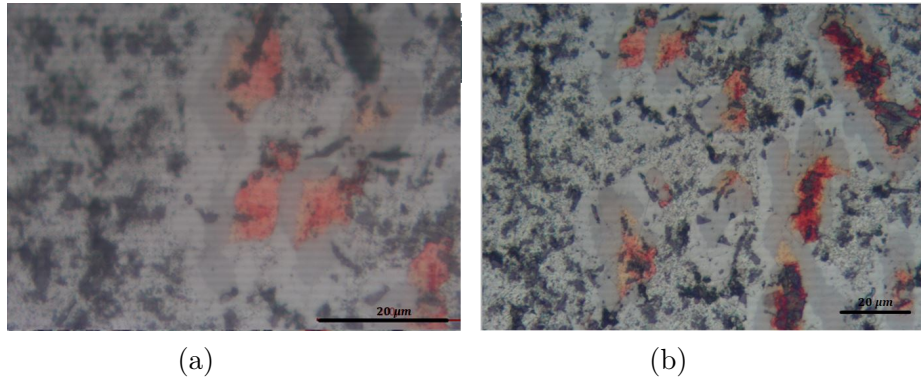


Figura 4.15: Partículas del recubrimiento sometidas a 1 hora de tratamiento térmico, ambas obtenidas por microscopía óptica.

#### 4.4.2. Microscopia electrónica

La muestra M3 fue sometida a 1 hora bajo el tratamiento térmico previamente mencionado. En la Figura 4.16 se observa la presencia de distintas fases, por otro lado se puede observar que el grosor de estas fases de intermetálicos ha ido aumentando de manera homogénea en todos los bordes de la partícula de cobre

En la Figura 4.16 se puede ver el efecto del tratamiento térmico en el crecimiento de las fases

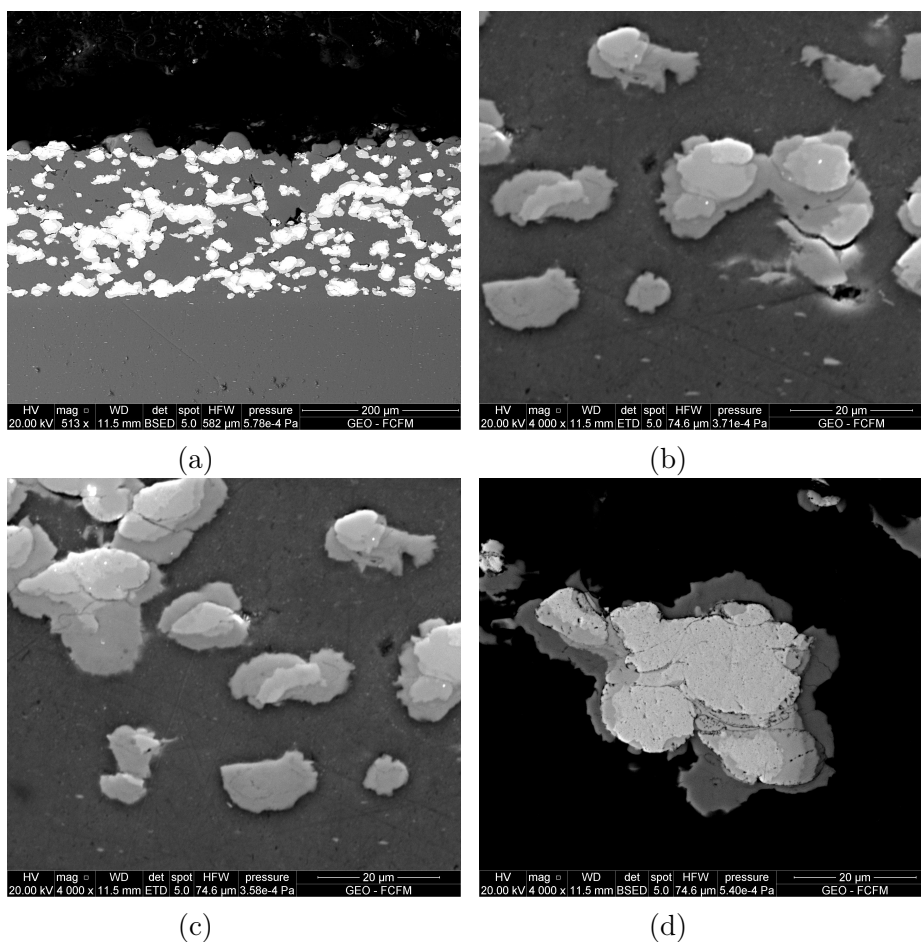


Figura 4.16: Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico

intermedias, en donde se puede apreciar una disminución del gris claro que corresponde a la sección con mayor porcentaje de peso y atómico de cobre, y un aumento de distintas secciones de grises mas oscuros a lo que correstonde un porcentaje de peso y atomico intermedio entre aluminio y cobre.

Se realizó un EDS en la particula mostrada en la Figura 4.16 (d) y los resultados obtenidos se detallan en la figuras 4.17 y 4.18.

En la figura 4.17 se puede ver la composición en los puntos señalados en 4.17(a) y 4.17(b), en donde muestra que la parte gris más clara corresponde a un mayor porcentaje de peso y atomico de cobre(figura 4.17(b)) y la parte mas oscura tiene un porcentaje mayor de aluminio

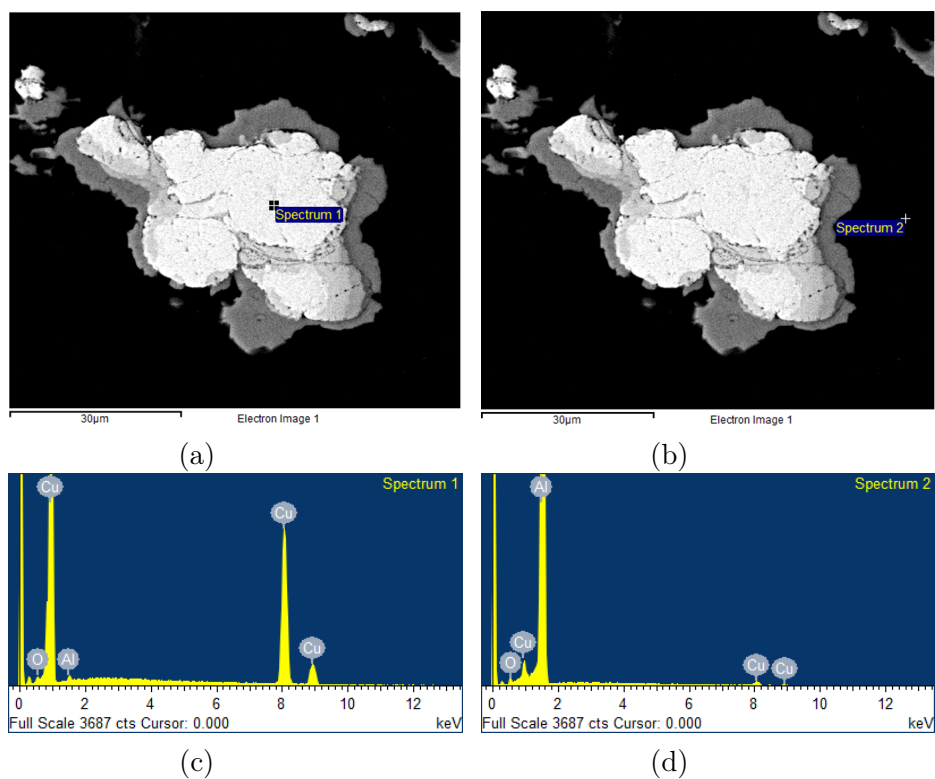


Figura 4.17: Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico

(figura 4.17(b))

Al realizar un estudio de composición en la figura 4.16(d) poniendo énfasis en las distintas fases identificadas por las diferentes tonalidades de grises, se obtuvieron los siguientes resultados detallados en la figura 4.18 y en las tablas 4.5 y 4.6

En la Figura 4.18 (a) se puede observar su composición en 4.18 (c) en donde se obtienen los siguientes resultados en la tabla 4,5

Tabla 4.5: Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.18 (a).

Elemento	Porcentaje en peso %	Porcentaje atómico %
O	2,00	4,5
Al	50,52	68,23
Cu	47,48	27,23

En cuanto a la Figura 4.18 (b) se puede observar su composición en 4.18 (d) en donde se obtienen los siguientes resultados

Realizando EDS en otras partículas de la misma muestra en donde aparentemente se muestra solo una fase (figura 4.19), obtenemos los siguientes resultados El estudio de composición de

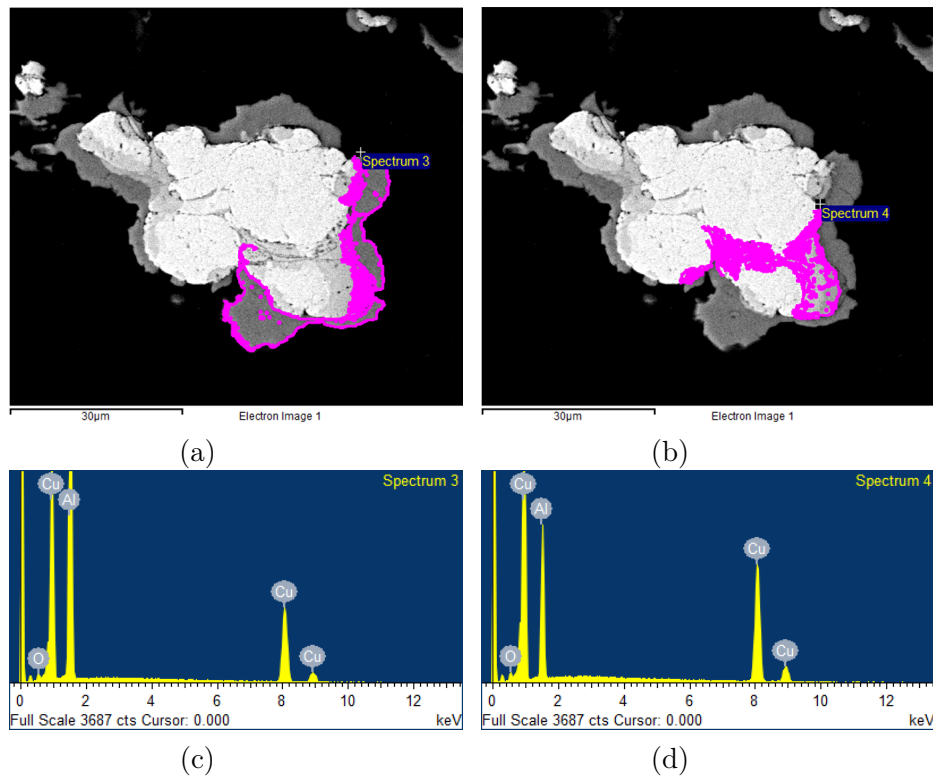


Figura 4.18: Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico

Tabla 4.6: Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.18 (b).

Elemento	Porcentaje en peso %	Porcentaje atómico %
O	2,17	6,24
Al	23,32	39,78
Cu	74,52	53,99

la partícula de la figura 4.19 (a) y (c) arroja los siguientes resultados en composición en la tabla 4,7

Tabla 4.7: Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.19 (a).

Elemento	Porcentaje en peso %	Porcentaje atómico %
Al	48,28	68,73
Cu	51,72	31,27

En cuanto a la figura 4.19(b) y (d), los resultados se detallan en tabla 4.8.

Tabla 4.8: Resultados EDS 1 hora tratamiento térmico figura 4.18 (b).

Elemento	Porcentaje en peso %	Porcentaje atómico %
Al	21,19	38,78
Cu	78,81	61,23

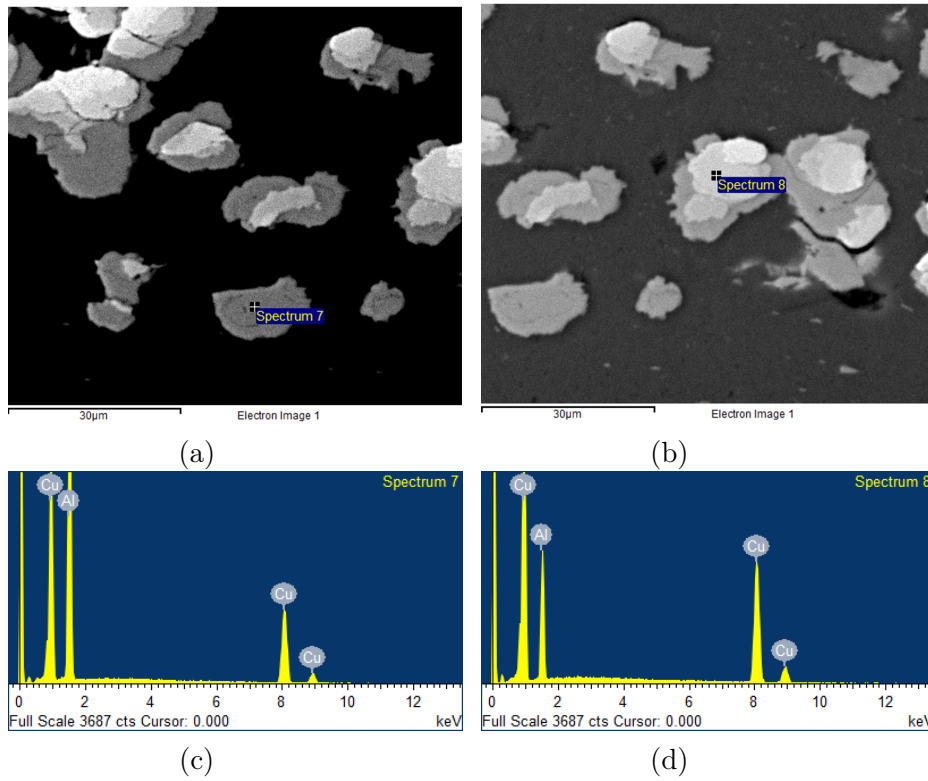


Figura 4.19: Recubrimiento sometido a 1 hora de Tratamiento térmico

### 4.4.3. Dureza

El resultado del ensayo de microdureza con 0,2 HUV es el siguiente Genera un promedio

Ensayo microdureza				
Muestra	Ensayo 1 [HV]	Ensayo 2 [HV]	Ensayo 3 [HV]	Ensayo 4 [HV]
M3	109,0	149,2	159,1	130,5

Tabla 4.9: Ensayo microdureza M3

de: 136,95 [HV]

## 4.5. Muestra M4

### 4.5.1. Microscopia óptica

La muestra M4 fue sometida a 2 horas bajo el tratamiento térmico previamente mencionado. En la figura 4,15 se observa la presencia de nuevas fases identificadas por un cambio de color en donde la opacidad del gris disminuye con forme avanza hacia el centro de color rojizo (cobre), siendo un color gris más brillante.

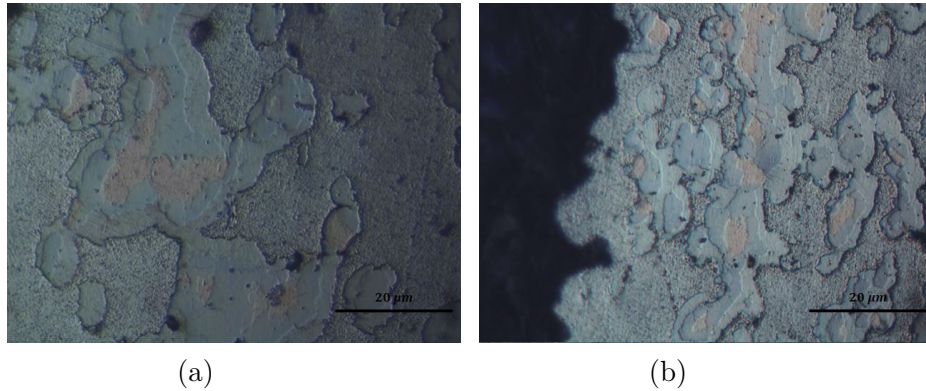


Figura 4.20: difusión aluminio en cobre 80x aumento (a), difusión aluminio en cobre 50x aumento (b) , ambas obtenidas por microscopía óptica.

## 4.5.2. Microscopia electrónica

La muestra M4 fue sometida a 2 hora bajo el tratamiento térmico previamente mencionado. En la figura 4,16 (c) y (d) se observa la presencia de distintas fases como también se puede ver el efecto del tratamiento térmico en el crecimiento de las fases intermedias, en donde se puede apreciar una disminución del gris claro que corresponde a la sección con mayor porcentaje de peso y atómico de cobre, y un aumento de distintas secciones de grises mas oscuros a lo que correponde un porcentaje de peso y atomico intermedio entre aluminio y cobre.

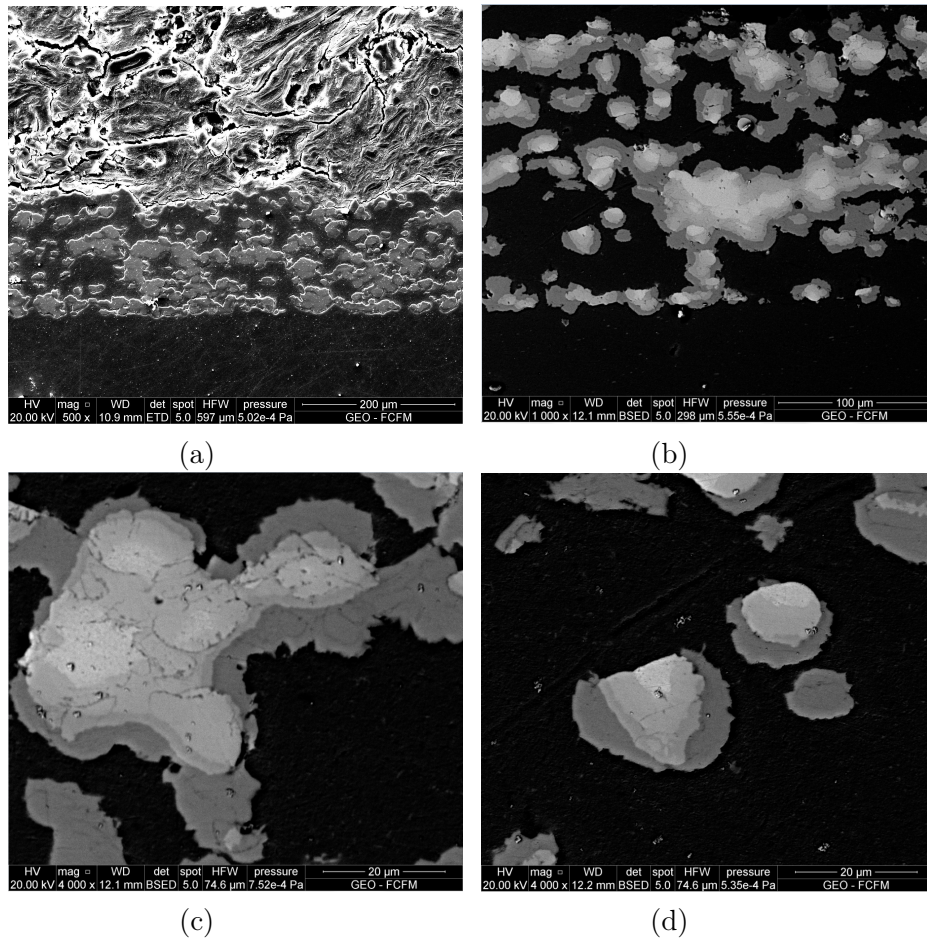
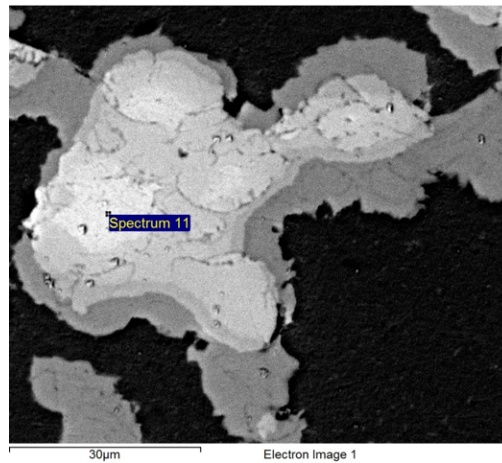


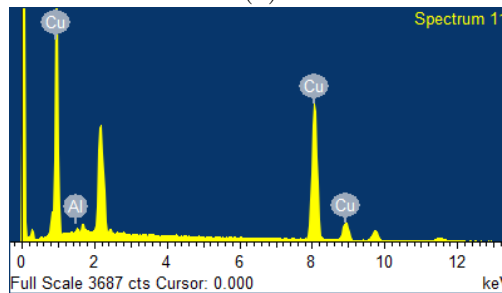
Figura 4.21: Recubrimiento sometido a 2 hora de Tratamiento térmico

Se realizó un EDS en la partícula mostrada en la figura 4.16 (c) y los resultados obtenidos son los siguientes )figura 4.17)

En donde el porcentaje de cobre en masa arroja y 98,87 % y un 1,13 % de Aluminio. En la misma partícula se generaron distintas tomas de espectro para saber la composición en las diferentes zonas donde muestra tonalidades de grises diferentes, la siguiente zona es ilustrada por la figura 4,18. En la figura 4,18 muestra una composición en masa de cobre de 47,48 % y de 52,52 % de aluminio.



(a)



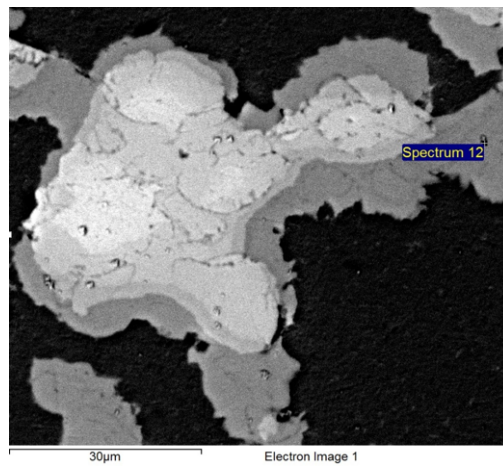
(b)

Figura 4.22: EDS Partícula de cobre en recubrimiento Cu-Al

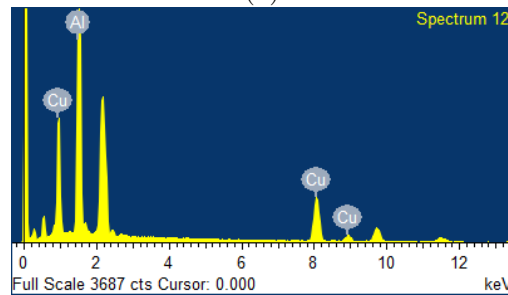
Realizando un estudio lineal de composición se obtienen los siguientes resultados ilustrados en la figura 4,19

El la figura 4,19 se puede observar que la composición de cobre va disminuyendo a medida que se acerca al borde de la partícula estudiada, donde su frontera es con partículas de aluminio.





(a)



(b)

Figura 4.23: EDS Partícula de cobre en recubrimiento Cu-Al

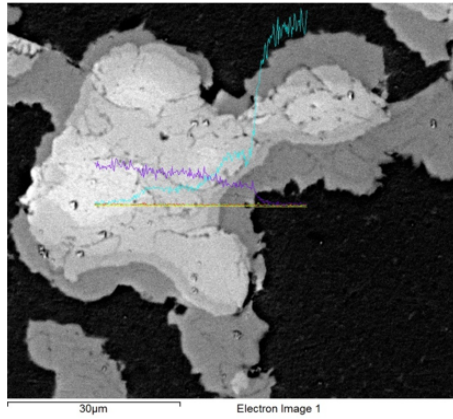
### 4.5.3. Dureza

El resultado del ensayo de microdureza con 0,2 HUV es el siguiente Genera un promedio

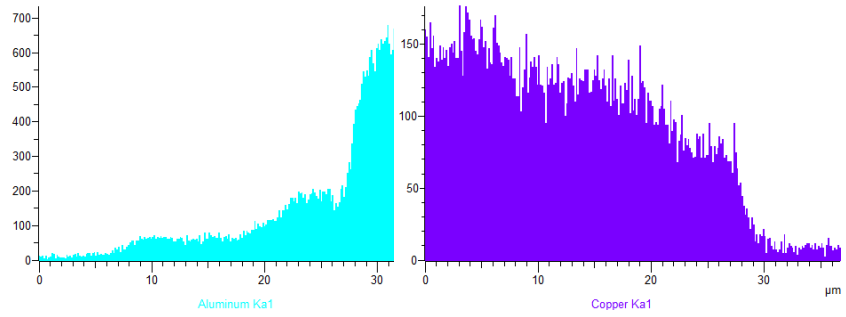
Ensayo microdureza				
Muestra	Ensayo 1 [HUV]	Ensayo 2 [HUV]	Ensayo 3 [HUV]	Ensayo 4 [HUV]
M4	176,0	145,2	122,3	211,0

Tabla 4.10: Ensayo microdureza M1

de: 163,625 [HV]



(a)



(b)

(c)

Figura 4.24: Recubrimiento sometido a 2 horas de Tratamiento térmico

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

Con respecto a la muestra base, la cual no fue sometida a ningún tratamiento térmico, se puede observar lo siguiente:

La adherencia de cobre como recubrimiento al sustrato fue alta, llegando a ser parte del 52 % en masa del recubrimiento total, con una eficiencia de recubrimiento del 25,83 %. Esto tiene su explicación en que al impactar la partícula de cobre en aluminio, existe una deformación plástica y actúa el principio de inestabilidad de corte adiabático, en donde la superficie contaminada con óxido disminuye y con esto aumenta la posibilidad de generar los enlaces iónicos entre estos metales y con esto una mejor adhesión. Por otro lado, al ser un proceso de trabajo en frío, no existe deformación térmica, lo que genera que la dureza del material no se ve afectada por el calor, debido a que el trabajo en frío actúa a temperaturas muy por debajo de la temperatura eutéctica indicada en el diagrama de fases del Al-Cu.

Esto se puede comparar al observar como varían los valores de ensayo de microdureza en procesos de manufactura en caliente y compararlos con los datos obtenidos en este trabajo, siendo un 53,7 % menor en trabajos en caliente que por el método de manufactura Cold-Spray. [10] La porosidad del recubrimiento realizado por coldspray está en el rango aceptado en comparación con otros estudios y se puede ver en las imágenes de microscopía óptica realizadas que existen poros pero aislados. Según los estudios, la porosidad genera que las propiedades y el comportamiento de la pieza varíen en cuanto a resistencia a la tracción, ductilidad, resistencia dinámica (impacto y fatiga) y la dureza en general la porosidad produce degradación de las propiedades mecánicas ya que reduce el área efectiva de la sección transversal de las piezas, produciéndose un incremento del valor medio transferido a través de los puentes del material entre poros, para óptimas propiedades mecánicas es preferible la presencia de poros aislados que interconectados porque es menor la reducción del área efectiva.

Con respecto al borde de partícula Cu-Al mostrado en la figura EDS lineal entre aluminio y cobre, se puede ver que en el borde entre estas partículas, la concentración de cobre cae drásticamente, pero su pendiente no es 1, esto puede deberse a dos razones, la primera es que como solo vemos una cara de la superficie y no la profundidad de la partícula, puede que bajo de la cara que vemos exista un área mayor de cobre y por eso la pendiente no cae

rotundamente. Pero cabe destacar que trabajos previos realizados por yamauchi and shinya miyaji, muestran que aun sin tratamiento térmico, el proceso de adhesión mediante coldspray genera una capa muy fina de componente intermetálicos, lo cual explicaria posteriormente la difusión pareja que se ha mostrado en los experimentos posteriores al realizar tratamiento térmico a las muestras.

En cuanto a la muestra M1, se puede observar que después del tratamiento de térmico de 15 minutos a 400 grados celcius se produce difusión entre aluminio y cobre, esto se debe a que se cumplieron dos condiciones fundamentales para permitir la movilidad atómica, la primera es que existiera un lugar vecino vacío y la segunda es que mediante el tratamiento térmico, se le proporcionó a los atomos de cobre y aluminio la energía suficiente para romper enlaces con los atomos vecin y distorcionar la red durante su desplazamiento [11]

En las Figuras 4.5 y 4.6 se puede ver la aparicion de nuevas fases, que tomando como referencia el diagrama de fases de la figura 2.3, deben ser la fase  $\theta_1$ , considerando el tiempo de permanencia en el tratamiento térmico y el grado de difución del aluminio y cobre. Al realizar el EDS, efectivamente se mostro que el porcentaje en peso de Cu 49,91 % y Al 38,79 en esa zona donde se identifica este compuesto corresponde a lo sugerido por el diagrama de fases como fase  $\theta_1$ .

Por otro lado como se puede obserbar solo existe difusion en el borde de la particula, y de manera bastante homogenia, lo cual podria tener su explicacion en lo dicho anteriormente y avalado por el estudio de yamauchi and shinya miyaji, que dado que existe un grado minimo de difusión en el proceso de cold spray, la difusión posterior tiende a ser mas homogenea. Con respecto a la dureza del recubrimiento post tratamiento térmico, esta se redujo ya que el tratamiento térmico disminuye los esfuerzos residuales en la pieza, generando que la pieza se ablande y arroje resultados mas bajos en los ensayos de dureza.

Referente a la muestra M2, mediante microscopía electrónica se logra obtener información sobre la composición química de las diferentes fases presentes, sin embargo los resultados no muestran información concluyente para identificarlas mediante el diagrama de fases, ya que la composición atómica no coincide con este, esto se debe pricipalmente a que el área en donde se toma la muestra mediante EDS es muy grande, por lo que abarca otras áreas de la muestra. Por otro lado en la microscopía óptica se ve un aumento de grosor de las fases presente y se distinguen dos tonalidades diferentes por lo que se presume que corresponde a dos fases distintas.

Con respecto a la muestra M3 se ve un mayor grado de difusión debido a que el tiempo de permanencia de la pieza en el tratamiento térmico fue mayor. Aquí se logran observar diferentes tonalidades de grises lo que implican la presencia de distintas fases. Si consideramos el diagrama de fases para identificarlas, estas deben ser la fase  $\theta_1$  de 31,9-33,0 % de cobre en peso , eta 2 de 49,8-52,3 % de cobre en peso y  $\theta_2$  de 55,0-62,1 % de cobre en peso , realizando el EDS se logra ver que la composicion de cobre y aluminio es mas homogenea en ciertas regiones, pero no entregan los valores de composiciones esperados al compararlos con el diagrama de fases,son embargo entrega un valor de composición de

47,48 %, de cobre en peso, cercano a la fase  $\eta_2$ . Esto se debe a que el rango de muestra del microscopio es muy grande y no se logra seleccionar la parte deseada, lo cual contamina la muestra generando un resultado diferente al valor esperado.

Lo que si se puede obtener del EDS es que la composición química de las diferentes tonalidades es distinta por lo cual sugiere que las fases presentes son distintas

Con respecto a la muestra M4 se puede observar un alto grado de difusión siendo completa en algunos puntos. En los puntos en donde la difusión no fue completa se debe mayormente en que la partícula de cobre depositada era muy grande lo que genera que se necesite mas tiempo para difundir ya que las concentraciones de cobre son mayores (ley de Fick).

En esta muestra se pueden ver otras tonalidades de grises como tambien las tonalidades de grises mostradas en M3 aumentan su espesor lo cual se explica nuevamente por la segunda ley de Fick en donde el tiempo de permanencia de la muestra en el tratamiento térmico aumenta el grado de difusión.

En cuanto al ensayo de dureza, el promedio de las magnitudes van aumentando a medida que avanza el tratamiento térmico, sin embargo las medidas no son homogéneas en toda la muestra, esto se puede explicar en que los valores más altos son tomados en fases más duras y frágiles, como  $Al_2Cu$ , y los valores más bajos son tomados en otras fases o en cobre.

Segun el diagrama de fases, las fases presente en la muestra deben ser la fase  $\theta_1$  de 31,9-33,0 % de cobre en peso,  $\eta_2$  de 49,8-52,3 % de cobre en peso,  $\sigma_2$  de 55,0-62,1 % de cobre en peso y  $\delta$  de 59,3-61,9 % de cobre en peso, sin embargo no se pudieron detectar con los porcentajes de composición correspondiente debido a que la zona en donde se tomaron las muestras con el microscopio eran zonas muy irregulares lo cual imposibilitó tomar una muestra pura para obtener la composición, pero el una toma lineal se ve que el porcentaje de cobre puro disminuye linealmente con una pendiente menor que en los casos anteriores, lo cual indica la presencia de diferentes fases aunque no se pueda saber experimentalmente su composición específica para identificarlas con claridad.

En cuanto a la determinación de la dureza, como es de esperar esta disminuye con respecto a las muestras anteriores y se atribuye esta disminución a que los esfuerzos residuales disminuyeron aun mas con el tratamiento térmico ya que la exposición a este fue mas prolongado con respecto a los anteriores.

# Conclusión

Dado que las piezas fueron recubiertas por el proceso de manufactura de coldspray, que es considerado un proceso de manufactura en frío debido a que la temperatura de trabajo es mucho menor a la temperatura eutéctica de los componentes, tiene la ventaja de disminuir los efectos residuales debido al aumento de temperatura de los procesos de manufactura en caliente. Una propiedad que se ve altamente alterada en un proceso de manufactura en caliente es la dureza del material. El proceso de manufactura coldspray al ser en frío y provocar la adhesión de las partículas mediante deformación plástica, genera un aumento en la dureza en comparación a procesos de manufactura en caliente. Por otro lado cabe destacar que la porosidad en el proceso es baja y además los poros están aislados lo que no afecta mayormente en las propiedades mecánicas del material.

La alta adhesión de cobre al sustrato se puede explicar que en el proceso de manufactura, al impactar las partículas de cobre estas se expanden generando un área limpia de contacto con ausencia de óxido lo que implica que los enlaces metálicos pueden llevarse a cabo y generar buena adherencia.

Con respecto a los tratamientos térmicos se pudo identificar las distintas fases y como estas aumentan tanto en número de fases presentes como en el espesor de estas a medida que aumentaba el tiempo de permanencia en el tratamiento térmico. Cabe destacar que aunque no se identificó en su totalidad las fases mediante su composición debido a dificultades en la toma del rango de muestra a evaluar, si se pudo identificar que la composición varía de forma lineal desde el centro puro de cobre hasta las partículas puras de aluminio. A diferencia que en la muestra sin tratamiento térmico en donde la composición de cobre disminuía drásticamente en el borde por otro lado cabe destacar que la formación de intermetálico es bastante homogénea, debido a que existe una muy leve difusión en el proceso de manufactura, lo que ayuda a que la difusión sea más pareja.

Ahora bien, con respecto a la dureza de las diferentes muestras, esta va aumentando a medida que el tiempo de permanencia del tratamiento térmico aumenta. Esto se debe a que a medida que se prolonga el tratamiento térmico, aumenta el grosor de  $Al_2Cu$ , que tiene como característica ser una de las fases más frágiles del diagrama de fases del sistema AlCu. Ahora bien, este aumento de dureza es local, lo que implica que en zonas en donde no se encuentre esta fase la medida de dureza es menor. Esto se puede apreciar en la diferencia de magnitudes tomados en una misma muestra.



# Bibliografía

- [1] S.V Klinkow A.P Alkhimov A.N Papyrin, V.F Kosarev. *International Thermal Spray Conference*. DVS-Verlag, Dusseldorf, Alemania, 2002.
- [2] Wendelin J. Wriqth Donald R. Askeland, Pradeep D. Fulay. *Ciencia e ingeniería de los Materiales*. Cengage Learning, México, 6th edition, 2012.
- [3] Julio Villa fuerte. *Considering Cold Spray for Additive Manufacturing*. Advanced Materials and Processes, 2014.
- [4] Kay Geels. *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing*. Number MNL46. ASTM International, U.S.A, 2006.
- [5] P.H. Shipway H.hussain, D.G. MacCartney. *Bonding between aluminium and copper in cold spraying story of asymmetry*. Materials Science and Technology. Taylor and Francis Group, 2012.
- [6] J.M Guilemany J. Bedoya, C. Cinca. *Recubrimientos micro/nanoestructurados de aleaciones ligeras mediante proyección fría para la protección y reparación de componentes de elevado valor añadido*. Revista Metalurgia, Madrid, 2013.
- [7] W.S DeRosset D.Helfritsch M grujicic, C.L. Zhao. *Adiabatic Share instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process*. Materials and design 25. 2004.
- [8] Masahiro Mashiko Kazunori Sato Motohiro Yamada Eiji Yamaguchi Masahiro Fukumoto, Hioroki Terada. *Deposition of copper Fine Particle by Cold Spray Process*. Materials Transactions. The Japan Instituted of Metals, vol 50 n°6 edition, 2009.
- [9] Klaus W. Richter Norbert Ponweiser, Christian L. Lengauer. *Re-Investigation of phase equilibria in the system Al-Cu and structural analysis of the high temperature phase en n-AlCu*. El Sevier, 2011.
- [10] Narsipalli Bhargava Rama MohanRaoc Siddabathula Madhusudana, Mohammed Moulana Mohiuddin Sarcarb. *Mechanical properties of Aluminum-Copper(p) composite metallic materials*. Journal of Applied Research and Technology, Anantapur, India, 2016.
- [11] Javad Hashemi William F. Smith. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*.



McGraw-Hill Interamericana, México, 4th edition, 2006.

- [12] Shinya Miyaki Yuchiro Yamahuci. *Interfacial state and characteristics of cold-sprayed copper coating on aluminum substrate*. Materials Science and Engineering 61. IOP, 2014.