



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

CREEP DE ALEACIONES COBRE MOLIBDENO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

LUIS ROBINSON MARABOLI CONTARDO

PROFESOR GUÍA:  
RODRIGO PALMA HILLERNS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODRIGO ESPINOZA GONZÁLEZ  
ALI AKBARI FAKHRABADI

SANTIAGO DE CHILE  
2015

Resumen memoria para optar al título  
de Ingeniero Civil Mecánico

POR: Luis Robinson Maraboli  
Contardo

FECHA: 19 de enero 2015

PROFESOR GUÍA: Rodrigo Palma  
Hillerns

## CREEP DE ALEACIONES COBRE MOLIBDENO

Esta memoria consiste en una investigación en la cual se busca mejorar las propiedades mecánicas del cobre, incorporando una dispersión nanométrica de cerámicos in-situ, mediante molienda reactiva, los cuales dificultan el movimiento de dislocaciones y límites de grano.

Este trabajo tiene por objetivo fabricar aleaciones con dispersión de carburos de molibdeno (específicamente Cu - 0%v Mo<sub>2</sub>C, Cu - 2,5%v Mo<sub>2</sub>C y Cu - 5%v Mo<sub>2</sub>C) y determinar cómo afecta esta composición en la compresión en caliente y creep.

Se realizaron moliendas reactivas de 100 y 150 horas, a partir de polvos elementales de Cu y Mo. Proceso realizado en un molino atritor con bolas de acero y hexano como liquido de molienda. Luego se consolidan los polvos en caliente, a una temperatura de 750°C. Para cada una de las aleaciones se realizó ensayos de compresión en frio, a una velocidad de 0,5 mm/min, ensayos de compresión en caliente a 500 °C y 700 °C, por ultimo ensayos de creep a 50%, 65% y 80% del límite de fluencia.

La caracterización de las aleaciones y polvos fue a través de difracción de rayos x, análisis químico de polvos y microscopia electrónica.

Se estableció que efectivamente a un mayor porcentaje de Mo, el material mejora sus propiedades mecánicas, dando como resultados mayores límites de fluencia y menores velocidades de deformación en caliente, lo cual valida la tesis de la formación de precipitados.

A mis Padres, por su apoyo incondicional, todo se lo debo a ustedes.

## Agradecimientos

Antes que todo, me gustaría agradecer al Profesor Rodrigo Palma y al Profesor Rodrigo Espinoza, por haberme dado la oportunidad de trabajar con ellos y cerrar esta ciclo, ha sido un gran apoyo siempre y estoy muy contento por lo que se ha logrado, sin duda, de no haber sido por su constante buena voluntad y paciencia, esto no habría sido posible.

Agradecimientos a mi familia que siempre estuvo, están y estarán en los momentos difíciles, sobre todo mis padres, los cuales con su apoyo incondicional y por animarme siempre a seguir han hecho todo esto posible. Muchas gracias por confiar en mí y darme todo lo necesario para lograr terminar esta etapa de mi vida. A mis hermanas, hermano y en especial a mis sobrinos que llenan mi vida de alegría.

A los amigos de la vida y de la carrera, nada hubiese sido igual sin ustedes, muchas gracias por compartir el camino.

Agradecer también a todo el Taller de Molina, en especial Juan Carlos Salgado y Hugo Barrera. Fueron la experiencia y la voluntad para realizar todo esto, infinitas gracias, son grandes personas.

## Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Objetivo general.....	2
1.2	Objetivos Específicos .....	2
2	ANTECEDENTES.....	3
2.1	Aleación Mecánica .....	3
2.1.1	Molienda Reactiva.....	3
2.1.2	Molino Atritor .....	4
2.1.3	Etapas aleado mecánico.....	4
2.2	Mecanismos de endurecimiento.....	5
2.2.1	Endurecimiento por dispersión.....	5
2.3	Termofluencia (Creep).....	6
2.3.1	Creep por dislocaciones.....	6
2.3.2	Creep por difusión .....	7
2.4	Difracción de rayos X .....	7
2.5	Resultados anteriores .....	8
2.5.1	Comportamiento mecánico a alta temperatura de aleaciones Cu-Ti-C, Cu-Al y Cu-Ti-Al-C, obtenidas mediante molienda reactiva .....	8
2.5.2	Comportamiento en fluencia en caliente de aleaciones Cu-Ti-Al endurecidas por dispersoides obtenidas por molienda reactiva.....	9

2.5.3	Fluencia lenta de aleaciones en base cobre endurecidas por dispersión, obtenidas por molienda reactiva.....	9
3	METODOLOGÍA .....	11
4	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	12
4.1	Equipos .....	12
4.2	Molienda .....	12
4.3	Compactación y encapsulamiento de los polvos .....	14
4.4	Extrusión del material.....	15
4.5	Ensayos de compresión a temperatura ambiente .....	15
4.6	Ensayos de compresión en caliente .....	16
4.7	Ensayos de creep.....	16
4.8	Difracción de rayos X.....	16
4.9	Análisis químico .....	16
5	RESULTADOS.....	17
5.1	Análisis químico de polvos.....	17
5.2	Análisis DRX de muestras extruidas .....	19
5.3	Ensayos de compresión en frío .....	20
5.3.1	Cu 0%v Mo <sub>2</sub> C.....	21
5.3.2	Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda .....	21
5.3.3	Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda .....	22
5.3.4	Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda .....	22

5.3.5	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda .....	23
5.4	Ensayos de compresión en caliente .....	24
5.4.1	Cu 0% v Mo <sub>2</sub> C 30 horas de molienda 500°C .....	24
5.4.2	Cu 2,5% v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda 500°C .....	25
5.4.3	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda 500°C .....	25
5.4.4	Cu 0% v Mo <sub>2</sub> C 30 horas de molienda 700°C .....	26
5.4.5	Cu 2,5% v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda 700°C .....	26
5.4.6	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda 700°C .....	27
5.4.7	Cu 2,5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda 500°C .....	27
5.4.8	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda 500°C .....	28
5.4.9	Cu 2,5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda 700°C .....	28
5.4.10	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda 700°C .....	29
5.5	Creep.....	30
5.6	Micrografía SEM y análisis EDS.....	32
5.6.1	Cu 2,5% v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda .....	33
5.6.2	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 100 horas de molienda.....	34
5.6.3	Cu 2,5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda .....	35
5.6.4	Cu 5% v Mo <sub>2</sub> C 150 horas de molienda .....	36
5.6.5	Cu 0% v Mo <sub>2</sub> C 30 horas de molienda .....	37
6	Análisis y discusión.....	38
6.1	Análisis químico de polvos.....	38

6.2	Análisis DRX muestras extruidas .....	39
6.3	Micrografía SEM y análisis EDS.....	41
6.4	Ensayos de compresión en frío .....	42
6.5	Ensayos de compresión en caliente .....	43
6.6	Creep.....	43
6.6.1	Creep a 700 °C.....	43
6.6.2	Creep a 500°.....	46
6.6.3	Exponente de esfuerzo aparente .....	48
7	CONCLUSIONES .....	49
8	BIBLIOGRAFÍA.....	50
9	ANEXOS.....	51



# 1 INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de cobre con dispersión de materiales cerámicos son cada día mas estudiadas, debido a que poseen una buena conductividad térmica y eléctrica junto con una adecuada resistencia mecánica a altas temperaturas. Dentro de las aplicaciones actuales para estos materiales se encuentran los electrodos de soldadura por resistencia eléctrica, interruptores de alto rendimiento, intercambiadores de calor, cables y alambres magnéticos [1].

El cobre es uno de los materiales que cumplen con el requisito necesario para las anteriores aplicaciones, dado su bajo modulo elástico el cual minimiza los esfuerzos térmicos en estructuras refrigeradas activamente [2]. No obstante, es necesario mejorar la resistencia mecánica a altas temperaturas ya que los métodos de endurecimiento convencionales pierden efectividad a temperaturas altas por la recristalización de los granos de cobre y la disolución del precipitado. Para esto, la inclusión de partículas cerámicas, como óxidos y carburos manométricos, en una matriz de cobre aumenta la resistencia mecánica de ésta en desmedro de la capacidad de conducción eléctrica y térmica.

Se han realizado estudios sobre el cobre y sus propiedades a altas temperaturas, sin embargo, existe un interés en ver cómo se comportan las aleaciones en base cobre con distintos aleantes, en este caso se trata de Cu-Mo-C.

## **1.1 Objetivo general**

En base a lo expuesto, el presente estudio tiene por objetivo principal estudiar el efecto del %Mo<sub>2</sub>C en el comportamiento en fluencia lenta de aleación Cu-Mo, obtenidas por molienda reactiva, a temperaturas de 500°C y 700°C.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Se consideran como objetivos específicos:

- Estudiar la relación entre microestructura y comportamiento en fluencia lenta de aleaciones Cu-Mo.
- Estudiar la influencia del tiempo de molienda sobre propiedades mecánicas.
- Caracterizar el producto final obtenido en cuanto a composición, microestructura, y propiedades mecánicas.

## **2 ANTECEDENTES**

A continuación se presentan los antecedentes consultados para el desarrollo de este proyecto.

### **2.1 Aleación Mecánica**

La aleación mecánica [3] es el proceso consistente en mezclar polvos en cierta proporción, colocar la mezcla dentro de un molino junto con un medio de atrición y comenzar esta atrición por un periodo de tiempo determinado. El comportamiento dúctil inicial de los polvos provoca que el impacto a alta energía de las bolas los deforme plásticamente compactando y endureciéndolos, aumentando su tamaño y superficie, a través de microsoldaduras en frío. En esta etapa se forman compuestos de forma laminar que favorecen la difusión. Luego, dado su endurecimiento, se fragilizan y fracturan por los impactos y la fatiga, fragmentándose y reduciendo nuevamente su tamaño. De este proceso se obtienen soluciones sólidas, fases amorfas o compuestos intermetálicos [4].

El constante impacto continuo de las bolas refina el tamaño de grano, el espaciamiento entre capas disminuye y el número de capas que componen la partícula aumenta. Después de un cierto número de horas de molienda se alcanza un estado de equilibrio entre la soldadura y la fractura, obteniéndose una distribución angosta de tamaño de partículas micrométricas y un tamaño de grano manométrico.

#### **2.1.1 Molienda Reactiva**

La molienda reactiva es un proceso utilizado para producir la dispersión de partículas en una matriz metálica [5], que se lleva a cabo atricionando polvos elementales en un molino de alta energía en presencia de un medio de aporte (O, C ó N) para producir la precipitación de cerámicos in situ.

Este proceso produce un refinamiento microestructural y aumenta la densidad de dislocaciones.

Con una adecuada dispersión de partículas nanométricas que anclen dislocaciones, subgranos y granos, se puede generar una demora o eliminación de los fenómenos de recuperación y recristianización.

### 2.1.2 Molino Atritor

El molino atritor consiste en una cubeta, como muestra la figura 2-1, la cual está atravesada axialmente por un eje, el cual consta de paletas, las que hacen girar las bolas al interior, a altas revoluciones, provocando gran deformación plástica en polvos próximos a las bolas y al líquido de molienda, que en este caso corresponde a Hexano.

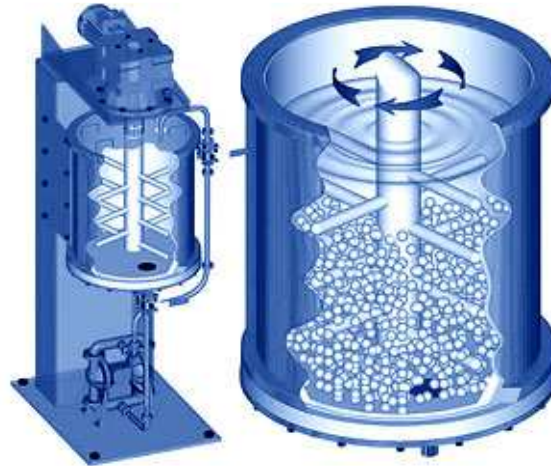


Figura 2-1 Molino Atritor [6]

### 2.1.3 Etapas aleado mecánico

Durante el aleado mecánico, tienen lugar distintos procesos que afectan la microestructura y el tamaño de los componentes aleados. Una síntesis de estos procesos es la que se describe a continuación:

- a) Aplanamiento de las partículas: Esto se debe a la gran cantidad de deformación plástica producida en los polvos, lo que produce que las partículas se aplanen y reduzcan su tamaño a la vez.
- b) Soldadura: Debido a la gran cantidad de energía de las partículas, producto del aumento en la densidad de dislocaciones al interior de los polvos, se producen fenómenos de microsoldadura o sinterización en las partículas, aumentando el tamaño medio de los dispersoides finales.
- c) Formación de partículas equiaxiales: En esta etapa, las partículas continuamente fracturadas y soldadas forman partículas equiaxiales de mayor tamaño.
- d) Soldadura y fractura: En esta etapa, las partículas son soldadas en orientación aleatoria, manteniendo el tamaño de las partículas casi invariante. Esta etapa se produce después de un determinado tiempo de molienda y se mantiene durante el resto del proceso de aleado.

## 2.2 Mecanismos de endurecimiento

La deformación plástica en metales cristalinos se produce principalmente por el movimiento de dislocaciones. Cualquier mecanismo que contribuya a entorpecer este movimiento produce un aumento del límite de fluencia, es decir, un reforzamiento del metal.

Los principales métodos de reforzamiento son los siguientes [7]:

- Refinamiento del tamaño de grano
- Formación de Subestructura o Subgrano:
- Endurecimiento por Solución sólida
- Dispersión de una Segunda fase.
- Endurecimiento por Deformación en frío.

Para efecto de la experiencia que se realiza, se hace una descripción detallada del que tiene una mayor relevancia para esta investigación, que corresponde a:

### 2.2.1 *Endurecimiento por dispersión*

Existen muchos mecanismos mediante los cuales se puede endurecer un metal [7], sin embargo la mayoría de los materiales pierde dicho endurecimiento a altas temperaturas. Resulta entonces importante destacar que el endurecimiento por dispersión, que es el método más efectivo para lograr buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas, esto se logra mediante la dispersión homogénea de una pequeña cantidad en porcentaje del volumen de partículas termodinámicamente estables y muy finas en la matriz del metal a reforzar.

Para materiales endurecidos por dispersión, las partículas no tienen ninguna relación de tipo químico con la matriz, por lo que si se aumenta la temperatura, la partícula no se disolverá en la matriz.

Uno de los efectos que provocan las partículas es detener el crecimiento de grano. Como las partículas no se disuelven a altas temperaturas, el crecimiento de grano también es detenido a temperaturas elevadas.

Otro efecto importante es el de multiplicar las dislocaciones, esto se manifiesta en que al pasar una dislocación por una partícula, esta deja un anillo alrededor de esta, esto genera una necesidad de esfuerzo adicional, el cual se denomina, esfuerzo de Orowan.

## 2.3 Termofluencia (Creep)

El fenómeno de termofluencia o fluencia lenta es la deformación plástica de un material, sometido a una carga constante, menor al límite de fluencia, en el tiempo y a altas temperaturas, mayores a 0,3 veces la temperatura de fusión. Por lo tanto la deformación deja de ser dependiente solo del esfuerzo y pasa a ser una función dependiente del esfuerzo, tiempo y temperatura [8]. La curva de creep cuenta con tres zonas de evolución:

- Zona primaria: zona poco relevante. Aquí la deformación puede suponerse elástica.
- Zona secundaria: zona de mayor importancia debido a que se mantiene por largo tiempo.
- Zona terciaria: zona donde se producen cavidades en los bordes de grano, que terminan causando la fractura.

La zona secundaria de la curva del creep es la mas interesante de estudiar. Durante el estado estacionario la curva puede ser descrita por la ecuación 2.1:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \quad (2.1)$$

Donde  $\dot{\epsilon}$  es la tasa de deformacion, B es una constante,  $\sigma$  es el esfuerzo y n es el exponente del esfuerzo.

A continuación se detallaran los principales mecanismos de creep: por dislocaciones y por difusión.

### 2.3.1 Creep por dislocaciones

El creep por dislocaciones ocurre por la difusión de átomos de los planos superiores (o inferiores) al plano de deslizamiento, que al moverse permiten el ascenso de la dislocación. Cuando el átomo difunde, la dislocación puede ascender debido al esfuerzo de reacción que le ejerce el precipitado. Si una dislocación es bloqueada por un precipitado es muy poco probable que la dislocación lo impacte en la mitad (lo que balancearía la fuerza de corte con la reacción del precipitado), por lo que existe una componente de la reacción que empuja la dislocación fuera del plano de deslizamiento. Al aumentar la temperatura aumenta la cantidad de vacancias, que permiten que los átomos difundan, y se generan los espacios necesarios para el ascenso de dislocaciones. La dependencia con el esfuerzo se explica por su relación con la componente de la reacción del precipitado que fuerza el ascenso de la dislocación. Es decir, si la fuerza es grande, entonces aumenta la velocidad de las dislocaciones para sobrepasar los precipitados.

### 2.3.2 Creep por difusión

Al reducirse el esfuerzo, el creep por dislocaciones decrece rápidamente (disminuye el valor de  $n$ ) y un nuevo mecanismo comienza a operar, el creep por difusión. Cuando el grano se deforma por un esfuerzo aplicado, se produce una difusión atómica dentro del cristal hacia las caras traccionadas [9].

## 2.4 Difracción de rayos X

La difracción de rayos x (DRX) es uno de los principales y más antiguos mecanismos para el estudio detallado de la estructura de materiales cristalinos. El procedimiento consiste en irradiar rayos x sobre la muestra en un rango angular de incidencia y recolectando la información de la radiación refractada por la muestra se logra determinar características del material.

La ecuación que explica este fenómeno es la llamada Ley de Bragg, que indica a que ángulo la estructura cristalina creará interferencia constructiva en la señal recibida. Esto ocurrirá cuando la onda emitida por los átomos de una red cristalina esté en fase, creando interferencia constructiva y generando un peak en la señal. La Ley de Bragg indica cuando ocurre este peak en la señal.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (2.1)$$

En donde  $n$  es un entero positivo,  $\lambda$  es la longitud de onda es la distancia interplanar y  $\theta$  es el ángulo incidente de la radiación.

Los perfiles de difracción presentan forma de peaks ubicados en los ángulos que predice la Ley de Bragg (por la geometría del experimento, los resultados se muestran en función del ángulo  $2\theta$ ), los cuales varían en posición, intensidad y ancho dependiendo de la muestra analizada.

Un desplazamiento del centro de los peaks en el ángulo  $\theta$  indica que las distancias interplanares se han modificado. En el caso de este estudio, dicho fenómeno se atribuirá principalmente a la inserción de partículas en solución sólida en la matriz de cobre, lo que generaría una distorsión en la red cristalina.

El ancho de los peaks entrega la mayoría de la información acerca de la estructura cristalina de la muestra, ya que se ve afectado tanto por el tamaño de cristalina promedio,  $L$ , como la microdeformación de las distancias interplanares,  $e \approx \Delta d/d$  [10]. El ancho de los peaks se mide (en radianes y en a escala  $2\theta$ ) como el ancho equivalente de un triángulo isósceles a media altura, cuyo centro corresponde al centro del peak y cuya área sea igual a la integral

de éste. Esta medida se conoce como el ancho integral y es la que predice de mejor forma la contribución de los distintos anchos de los perfiles.

Antes de analizar la contribución de ambos factores al ancho del peak, es muy importante notar que el ancho medido directamente de los resultados está afectado por un error experimental, ya que inevitablemente el equipo tiene errores de medición.

Existen tres tipos de distribuciones asumidas comúnmente para describir estos perfiles, cada uno de los cuáles se han derivado de la manera en que distintos fenómenos afectan el ensanchamiento, como el ensanchamiento por efecto Doppler y por colisión, entre otros.

## **2.5 Resultados anteriores**

Se han recopilado antecedentes de experiencias anteriores realizadas con prestaciones similares a las que se buscan en este proyecto:

### ***2.5.1 Comportamiento mecánico a alta temperatura de aleaciones Cu-Ti-C, Cu-Al y Cu-Ti-Al-C, obtenidas mediante molienda reactiva***

Se estudia el comportamiento mecánico entre 673 y 1123°K de Cu-5%v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu-5%v TiC y Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (composición nominal), preparados mediante molienda reactiva y extrusión a 1023°K.

Tanto la resistencia al ablandamiento por recocido como la resistencia a la compresión a temperaturas elevadas crece de acuerdo al siguiente orden; Cu-5%v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu-5%v TiC y Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esto se explica dado que la adición de Al-Ti-C en Cu produce un mayor nivel de endurecimiento, en comparación con la adición de Al o TiC por separado.

En las aleaciones de Cu-Al y Cu-Ti-C, los dispersoides finos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y TiC se forman respectivamente. Mientras que en el caso de Cu-Al-Ti-C, ambos dispersoides se forman, aumentando el nivel de endurecimiento para una misma fracción en volumen de dispersoides.

En términos de los exponentes de fluencia en caliente, se obtuvo que el set completo de estos resulta ser mayor que los esperados de los modelos convencionales de creep, sin embargo, están cercanos a los valores entregados por aleaciones endurecidas mediante dispersoides.



### ***2.5.2 Comportamiento en fluencia en caliente de aleaciones Cu-Ti-Al endurecidas por dispersoides obtenidas por molienda reactiva***

En esta experiencia se presentan los resultados de creep y ajustes a los modelos actuales de fluencia en caliente para una aleación endurecida por dispersoides de composición nominal Cu-2,5%v Ti-2,5%v Al. La aleación es preparada mediante molienda reactiva. Los test de creep son realizados a 773, 973 y 1123°K, bajo cargas cuasi estáticas entre  $9 \times 10^{-7}$  y  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

Se consideran dos modelos de creep:

- Creep por dislocación: La velocidad de deformación depende principalmente de la interacción partícula-dislocación.
- Creep difusional: Esta gobernada por la interacción entre bordes de grano, dislocación y partículas.

En todos los casos los exponentes de creep obtenidos son altos, como se esperaba de aleaciones endurecidas por dispersoides.

Finalmente se logra determinar los rangos de temperatura, entre los cuales un modelo de creep gobierna, entre 773 y 1123°K predomina interacción partícula dislocación, que ocurre principalmente en la matriz y los bordes de grano respectivamente, mientras que a 973°K, temperatura intermedia, la interacción dislocación partícula ocurre tanto en la matriz como en los bordes de grano.

Para todas las temperaturas se obtienen factores de relajación entre 0,75 y 0,80, los que corresponden a una alta resistencia al desprendimiento de dislocaciones de las partículas.

### ***2.5.3 Fluencia lenta de aleaciones en base cobre endurecidas por dispersión, obtenidas por molienda reactiva***

En este caso se trabaja con molienda reactiva tanto de molino planetario como de molino atritor.

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar el efecto del tipo de molienda y de composición en aleaciones en base cobre sobre la fluencia lenta (Cu-10%v TiC, Cu-5%v VC) y sobre la resistencia al ablandamiento por recocido (Cu-10%v TiC, Cu-10%v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu-5%v TiC-5%v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu-5%v VC).

Se determina resistencia al ablandamiento de las cuatro aleaciones empleando dureza Vickers (100g), a temperatura ambiente. Una de las probetas no está recocida y las otras si, durante 1 hora a 400, 650, 750 y 900°C. También se realizan ensayos de compresión en

caliente, a una velocidad de  $0,83 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , para determinar los rangos de trabajo en los ensayos de fluencia lenta (creep).

Las aleaciones obtenidas en el molino planetario presentaran propiedades inferiores en relación a otros trabajos similares (utilizando tanto el mismo tipo de molino como spex). La aleación obtenida en el molino atritor también tiene propiedades mecánicas inferiores que otras aleaciones obtenidas en el mismo tipo de molino.

La aleación Cu-10%v TiC presenta mejor resistencia al creep que la Cu-5%v VC. La primera de ellas, a  $500^{\circ}\text{C}$  indicó difusión a través del borde de grano y a  $700^{\circ}\text{C}$ , autodifusión en la red. La segunda aleación indica que el mecanismo de creep, actúa para ambas temperaturas por ascenso de dislocaciones en el interior del grano.

### 3 METODOLOGÍA

Se realizó moliendas de alta energía de 100 h y 150 h en el molino atritor con los polvos de cobre respectivos y una relación de bolas de 10:1. Se utilizó polvos de cobre obtenidos de la cámara de guantes, donde se preservan en una atmósfera inerte. Estos polvos se obtuvieron en la relación necesaria para obtener la proporción específica de Cu 2,5 %v Mo – 5 %v Mo y se homogenizaron. Para la formación de carburo de molibdeno ( $\text{Mo}_2\text{C}$ ) se realizó la molienda con hexano, aportando, éste último, la cantidad de carbono necesaria.

Los polvos secos de la aleación fueron compactados de forma uniaxial (en frío), al interior de capsulas que alimentaron la etapa de extrusión en caliente para la conformación de las probetas, además se les realizó difracción de rayos X a los polvos obtenidos. La aleación fue finalmente consolidada a través de ésta extrusión, la cual se realizará a 1023 K (750°C).

Luego de evaluar las propiedades mecánicas y microestructurales de las diferentes probetas, se realizaron ensayos de creep y compresión en caliente. Las temperaturas y las cargas variaron registrando las diferentes curvas de creep.

## 4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el siguiente capítulo se describe el procedimiento seguido para realizar el trabajo.

- Mediante un molino atritor se obtienen las cuatro aleaciones utilizadas para el estudio.
- Se obtendrán muestras de polvos luego de la molienda, las cuales son estudiadas mediante difracción de rayos x.
- Los polvos obtenidos mediante molienda, fueron compactados y se les realizó un vaciado de los gases interiores.
- Posteriormente, se realiza extrusión en caliente
- Se fabrican probetas para ensayo de compresión en frío y en caliente.
- Se realizan ensayos de compresión en frío y caliente.
- Se realizan ensayos de creep.

### 4.1 Equipos

Los principales equipos utilizados para la experiencia son los siguientes:

- Cámara de guantes (Laboratorio de cerámicos avanzados del Departamento de Ciencia de los Materiales).
- Molino atritor basado en el modelo Szegvari Atritor Grinding Mill (Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica).
- Foco de luz halógena (Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica).
- Prensa hidráulica manual de capacidad para 3000psi (Laboratorio metalurgia del departamento de ingeniería mecánica).
- Bomba de vacío Edwards RV3, capacidad hasta  $10^{-3}$  mbar (Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica).
- Hornos Mufla Eléctricos (Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica).
- Prensa (Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica).
- Máquina universal Instron para ensayos de compresión y creep (Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica).

### 4.2 Molienda

La molienda reactiva se realiza en un molino atritor, cuyo contenedor es de acero inoxidable. Antes del llenado del molino con los polvos y la molienda definitiva, se realiza el proceso de limpieza del contenedor y las bolas de molienda. Esto tiene como fin retirar el óxido, suciedad y restos de impurezas que se puedan encontrar de la molienda anterior. Para esto se llena el contenedor con un litro de alcohol metílico y la totalidad de las bolas de molienda y se hace funcionar el molino por una hora a velocidad constante.

Luego se monta el eje dentro del contenedor y se ensambla al motor regulando la altura variable calculando que el eje y las aspas estén levemente por sobre el fondo del contenedor para no dejar espacios sin moler. Se aprietan los pernos cuidando que el contenedor quede bien sellado. Utilizando la apertura de la tapa del contenedor, se llena con las bolas, se agrega el líquido de molienda y luego la totalidad de los polvos homogeneizados. Se regula el caudal del gas inerte de argón dentro del contenedor a 0,5 l/min, para que se produzca una sobrepresión y no ingrese aire, que puede contaminar los polvos. Finalmente se acciona el sistema de refrigeración que consiste en un circuito de agua externo a la molienda.

Al finalizar la molienda se retira el contenedor y se procede a vaciar el contenido en un colador para separar las bolas del polvo molido. El proceso se realiza con el mismo líquido de molienda hasta que las bolas estén visiblemente limpias. Luego se secan los polvos evaporando el líquido bajo una luz alógena por una hora.

De cada aleación se prepararon 100g, para los que se deben calcular la cantidad en gramos de cada aleante, para el cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$M_{Cu}[g] = C_T[g] \left\{ \frac{\rho_{Cu}(1 - \alpha)}{\rho_{Cu}(1 - \alpha) + \rho_{TiC}} \right\} \quad (4.1)$$

$$M_{Ti}[g] = C_T[g] \left\{ \frac{\rho_{Ti}\alpha \cdot P \cdot A_{Ti}}{\rho_{Cu}(1 - \alpha) + \rho_{TiC}\alpha(P \cdot A_{Ti} + P \cdot A_C)} \right\} \quad (4.2)$$

Donde:

$M$ : Masa en gramos del polvo elemental.

$C_T$ : Carga total en gramos de la mezcla a moler. Para la experiencia son 100 g.

$\rho$ : Densidad en g/ml del elemento y/o compuesto.  $\rho_{Cu}$ : 8,96 g/ml y  $\rho_{Mo_2C}$ : g/ml

$P \cdot A$ : Peso atómico del elemento.  $P \cdot A_{Mo_2C}$ : 203,91 g/mol y  $P \cdot A_C$ : 12,011 g/mol.

$\alpha$ : Fracción volumétrica del dispersoide, para el proyecto se utilizaron: 0 (0%), 0,025 (2,5%) y 0,05 (5%).

Los resultados en porcentaje en peso para cada aleación se detallan en la tabla 4-1:

Tabla 4-1 Porcentajes en peso para cada aleación

Elemento	Cu-2,5%v Mo <sub>2</sub> C	Cu-5%v Mo <sub>2</sub> C
	[%p]	[%p]
<b>Cu</b>	97,516	95,031
<b>Mo<sub>2</sub>C</b>	2,480	4,968
<b>Mo</b>	2,337	4,675
<b>C</b>	0,146	0,292

### 4.3 Compactación y encapsulamiento de los polvos

Luego del secado de los polvos viene el turno de compactación. Para realizarla se deben seguir los siguientes pasos.

- Lo primero que se debe hacer es fabricar las capsulas donde se depositan los polvos. Estas consisten de una cañería de 3/4", a la cual se le suelda una tapa de cobre, del mismo espesor que la cañería de cobre.
- La capsula vacía se sitúa en una matriz de extrusión modificada, la que permite introducir polvos sobrepasando la altura de la capsula, de tal forma que al compactar estos polvos queden situados en su totalidad dentro de la capsula.
- La compactación se realiza en una prensa hidráulica, alcanzando 8000 psi para todas las aleaciones.
- Posterior a la compactación, se suelda una tapa, también de cobre y del mismo espesor que la cañería. Además a la tapa, se le suelda un tubo de 1/4" de diámetro, el que en su extremo no soldado, tiene un cono y una tuerca.
- Finalmente, utilizando una bomba de vacío conectada al extremo de la capsula, se procede a vaciar el interior, eliminando la presencia de gases contaminantes para el material. Las presiones alcanzadas con la bomba resultaron menores a  $10^{-1}$  mbar.

Todo lo anterior se desarrolla en el Laboratorio de Metalurgia del Departamento de Ingeniería Mecánica.

#### **4.4 Extrusión del material**

El procedimiento de extrusión es desarrollado en su totalidad en el Taller del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

Dentro de los parámetros que se consideran para su realización, se tienen:

- Velocidad del pistón: 5mm/s aproximadamente.
- Presión del pistón 2000 psi.
- Temperatura Guía principal, Guía secundaria, punzón: 150°C.
- Temperatura Matriz: 700°C.
- Temperatura Cápsula: 750°C.

Para desarrollar la extrusión se toman en consideración los siguientes requerimientos:

- Tanto la matriz, como las guías y el punzón se dejan en el horno a la temperatura correspondiente durante una hora.
- La cápsula se introduce en el horno en los últimos 20 minutos de la hora cronometrada para la matriz, guías y punzón.

Luego de obtener la barra de material extruido se procede a maquinar las probetas que serán destinadas a los respectivos ensayos de compresión a temperatura ambiente. Las dimensiones de las probetas son 6 mm de diámetro y 10 mm de largo.

Se disminuye el diámetro original de la barra al maquinarla para eliminar el material correspondiente a la cañería de cobre.

#### **4.5 Ensayos de compresión a temperatura ambiente**

El ensayo de compresión corresponde a un método para determinar el comportamiento de materiales bajo cargas aplastantes. La probeta se comprime y se registra la deformación con distintas cargas. El esfuerzo y la deformación de compresión se calculan y se trazan como un diagrama carga-deformación, con el fin de obtener el límite de fluencia del material se realizan ensayos de compresión a temperatura ambiente a una velocidad de 0,5 mm/min.

Estos ensayos se realizan en la máquina Instron, la cual está conectada a una computadora la cual tiene un registro en tiempo real del ensayo y permite almacenar todos los datos obtenidos de manera ordenada.

En este caso la temperatura a la cual se desarrollan los ensayos es de aproximadamente 18°C.

Con los resultados obtenidos se obtienen el gráfico esfuerzo v/s deformación, del que se pueden extraer tanto el rango elástico del material, como el rango de deformación plástica del mismo.

#### **4.6 Ensayos de compresión en caliente**

Los ensayos de compresión en caliente se realizan para determinar el esfuerzo máximo a aplicar en los posteriores ensayos de creep. Se fabrican las probetas a ensayar procurando tornearse cada una, extrayendo los bordes que son esencialmente parte de las capsulas de cobre puro. Luego se coloca dentro de la maquina Instron, la cual ha sido calentada previamente a la temperatura necesaria y se procede a bajar el punzón.

Al bajar el punzón debe estar configurada la velocidad de descenso de este y el grafico de esfuerzo vs deformación entregara los valores de esfuerzos máximos. El criterio utilizado para determinar el esfuerzo máximo es el del 0,2 % de la deformación.

#### **4.7 Ensayos de creep**

Los ensayos de creep se realizaron para el rango de temperaturas y velocidades definidos. La probeta se prepara al igual que el ensayo de compresión, pero esta vez la velocidad se deja variable y los esfuerzos se configuran como 0.5, 0.65 y 0.8 veces el esfuerzo máximo determinado anteriormente en el ensayo de compresión. Se procede a comprimir para obtener el grafico de deformación versus tiempo, el cual entregará la pendiente de la curva y la velocidad de deformación media, para el posterior análisis.

#### **4.8 Difracción de rayos X**

Todos los análisis de difracción son realizados con el Bruker D8 perteneciente al Departamento de Física de la Universidad de Chile. Para analizar los espectros de difracción obtenidos, se utiliza el método de Rietveld.

#### **4.9 Análisis químico**

Se mandó una muestra de polvos a realizar un análisis químico a MOLYMET, en busca de la cantidad de C, O y N, con el fin de obtener cuánto Carbono hay después de la molienda, verificando si efectivamente el hexano aportó como se esperaba, si el molibdeno efectivamente está presente y cuanta contaminación se adquirió.



## 5 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

### 5.1 Análisis químico de polvos

Se mandó a realizar un análisis químico a MOLYMET, en busca de la cantidad de C, O y Cr, con el fin de obtener cuánto Carbono hay después de la molienda, verificando si efectivamente el hexano aportó como se esperaba, si el molibdeno efectivamente está presente y cuanta contaminación se adquirió.

Los resultados de éste análisis se muestran de la tabla 5-1 a 5-5:

Tabla 5-1 Análisis químico de Cu - 0%v Mo<sub>2</sub>C

Cu-0%v Mo <sub>2</sub> C		
Análisis	Resultado	Unidad
Cobre	99,5	%p
Carbono	0,2367	%p
Oxígeno	0,2128	%p
Molibdeno	0,0775	%p
Hierro	0,0373	%p
Cromo	0,0044	%p

Tabla 5-2 Análisis químico de Cu – 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

Cu-2,5%v Mo <sub>2</sub> C		
Análisis	Resultado	Unidad
Cobre	96,9	%p
Carbono	0,5467	%p
Oxígeno	0,225	%p
Molibdeno	2,3436	%p
Hierro	0,0306	%p
Cromo	0,005	%p

**Tabla 5-3 Análisis químico de Cu – 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda**

<b>Cu-2.5%v Mo<sub>2</sub>C</b>		
<b>análisis</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
<b>Cobre</b>	95,642	%p
<b>Carbono</b>	0,6447	%p
<b>Oxigeno</b>	0,5166	%p
<b>Molibdeno</b>	2,2081	%p
<b>Hierro</b>	0,1578	%p
<b>Cromo</b>	0,0104	%p

**Tabla 5-4 Análisis químico de Cu - 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda**

<b>Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C</b>		
<b>Análisis</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
<b>Cobre</b>	94,2	%p
<b>Carbono</b>	0,6647	%p
<b>Oxigeno</b>	0,3715	%p
<b>Molibdeno</b>	4,5516	%p
<b>Hierro</b>	0,0413	%p
<b>Cromo</b>	0,006	%p

**Tabla 5-5 Análisis químico de Cu - 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda**

<b>Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C</b>		
<b>Análisis</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
<b>Cobre</b>	95,3	%p
<b>Carbono</b>	0,649	%p
<b>Oxigeno</b>	0,456	%p
<b>Molibdeno</b>	3,518	%p
<b>Hierro</b>	0,096	%p
<b>Cromo</b>	0,016	%p

En la tabla 5-6 se muestra un resumen de las composiciones obtenidas por análisis químico.

**Tabla 5-6 Resumen composiciones obtenidas por el análisis químico realizado a los polvos**

	0%v Mo <sub>2</sub> C	100 horas molienda		150 horas molienda	
		2,5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C	2,5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C
<b>Análisis</b>	<b>%p</b>	<b>%p</b>	<b>%p</b>	<b>%p</b>	<b>%p</b>
<b>Cobre</b>	99,5	96,9	94,2	95,6	95,3
<b>Carbono</b>	<b>0,2367</b>	<b>0,5467</b>	<b>0,6647</b>	<b>0,6447</b>	<b>0,6497</b>
<b>Oxigeno</b>	0,2128	0,225	0,3715	0,5166	0,4569
<b>Molibdeno</b>	<b>0,0775</b>	<b>2,3436</b>	<b>4,5516</b>	<b>2,2081</b>	<b>3,5181</b>
<b>Hierro</b>	0,0373	0,0306	0,0413	0,1578	0,096
<b>Cromo</b>	0,0044	0,005	0,006	0,0104	0,0163

## 5.2 Análisis DRX de muestras extruidas

En la tabla 5-7 se presentan los resultados de la difracción de rayos-X para la muestras Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C.

**Tabla 5-7 Resultados de DRX para polvos de Cu-2,5%v Mo<sub>2</sub>C**

<b>Tiempo de molienda [hr]</b>	<b>d<sub>Cu</sub>[nm]</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>	<b>e<sub>o</sub></b>
<b>100</b>	65,7	99.584	0.416	0,07202
<b>150</b>	22,3	98.570	1.430	0,02681

En la Tabla 5-8 se presentan los resultados de la difracción de rayos-X para la muestras Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C.

**Tabla 5-8 Resultados de DRX para polvos de Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C**

<b>Tiempo de molienda [hr]</b>	<b>d<sub>Cu</sub>[nm]</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>	<b>e<sub>o</sub></b>
<b>100</b>	51,2	98.669	1.331	0,12028
<b>150</b>	34,4	98.827	1.173	0,08953

En la Tabla 5-9 se presentan los resultados de la difracción de rayos-X para la muestra Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C.

**Tabla 5-9 Resultados de DRX para polvos de Cu-0%v Mo<sub>2</sub>C**

<b>Tiempo de molienda [hr]</b>	<b>e<sub>o</sub></b>	<b>d<sub>Cu</sub> [nm]</b>
<b>30</b>	0,04592	69,1

### **5.3 Ensayos de compresión en frío**

Se realizaron ensayos de compresión a las 5 aleaciones estudiadas, que corresponden a Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C, 2.5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas, 2.5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas, 5% Mo<sub>2</sub>C 100 horas y 5% Mo<sub>2</sub>C 150 horas.

### 5.3.1 Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-1, el límite de fluencia para este caso corresponde a 410 [MPa].

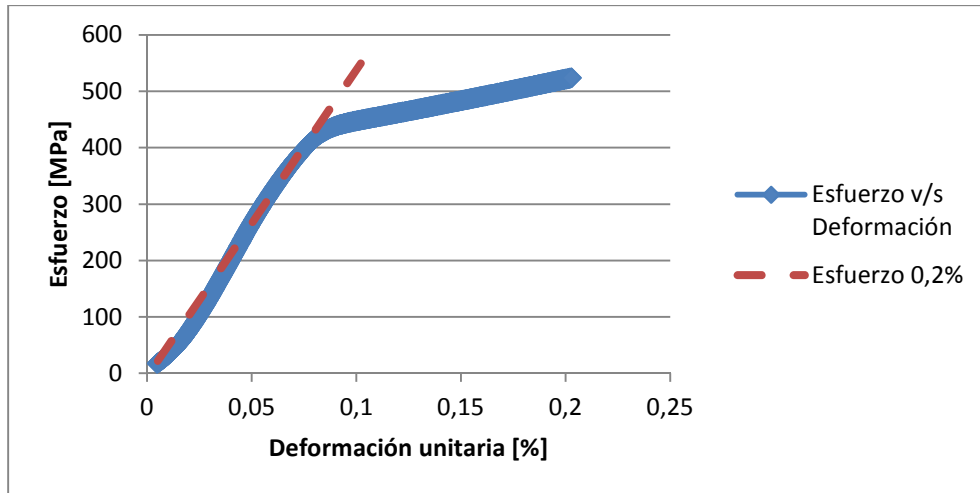


Gráfico 5-1 Ensayo de compresión Cu-0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda

### 5.3.2 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

Como se puede apreciar en el gráfico 5-2, el límite de fluencia para este caso corresponde a 485 [MPa].

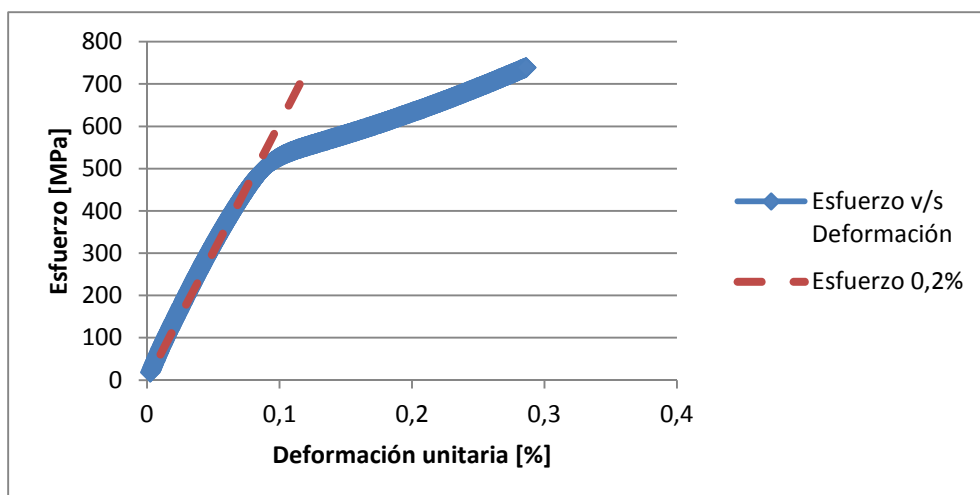


Gráfico 5-2 Ensayo de compresión Cu-2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

### 5.3.3 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

Como se puede apreciar en el gráfico 5-3, el límite de fluencia para este caso corresponde a 440 [MPa].

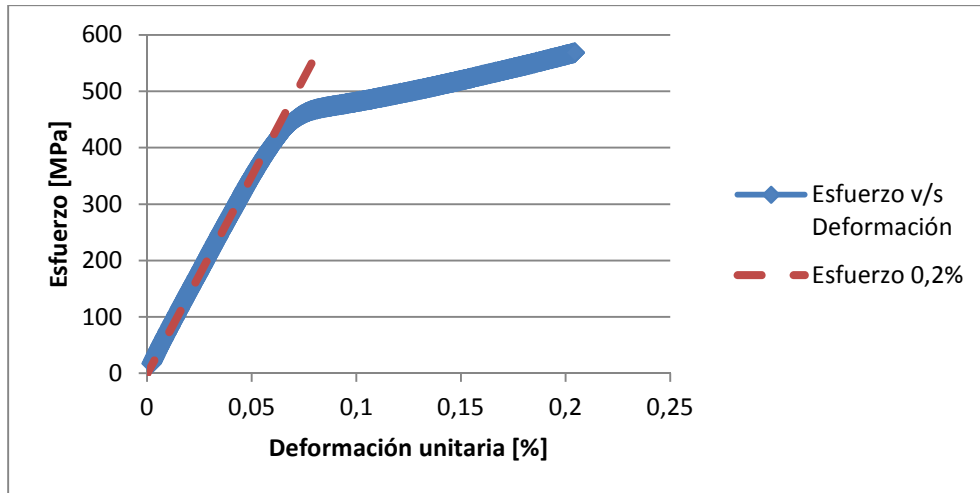


Gráfico 5-3 Ensayo de compresión Cu-2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

### 5.3.4 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

Como se puede apreciar en el gráfico 5-4, el límite de fluencia para este caso corresponde a 680 [MPa].

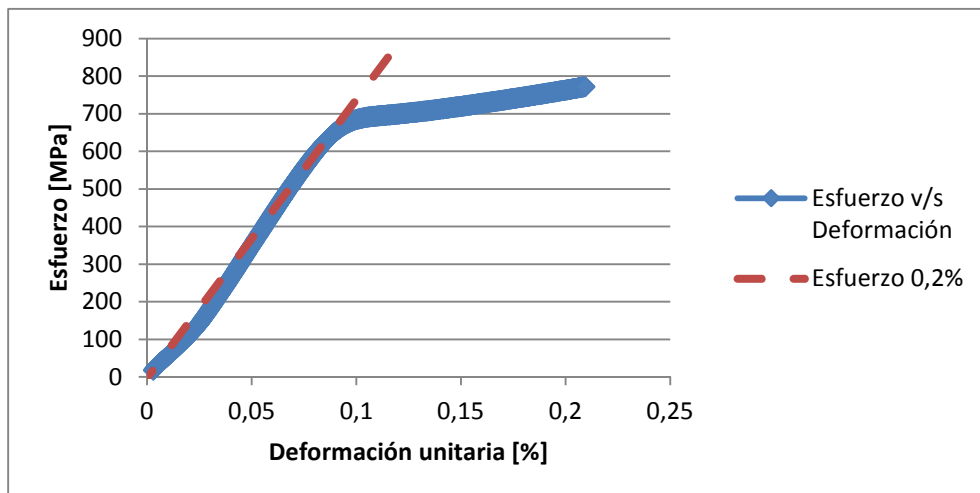


Gráfico 5-4 Ensayo de compresión Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

### 5.3.5 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

Como se puede apreciar en el gráfico 5-5, el límite de fluencia para este caso corresponde a 500 [MPa].

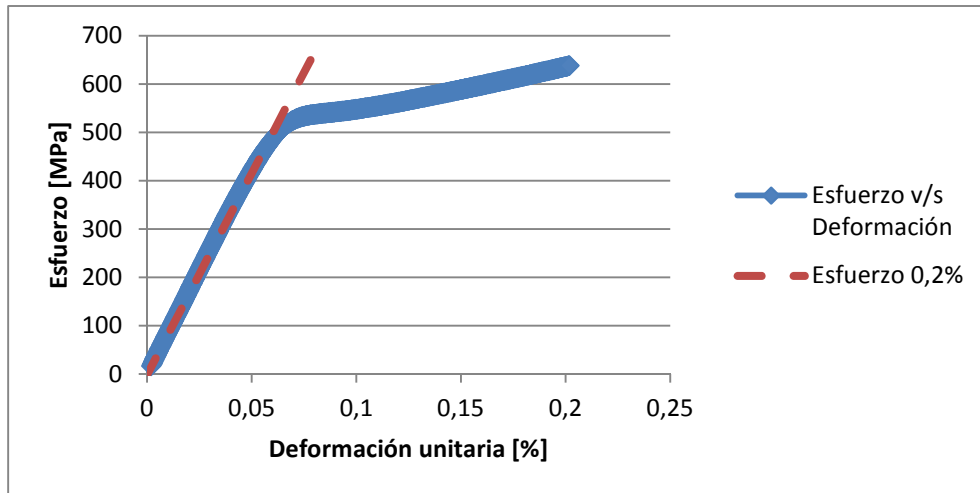


Gráfico 5-5 Ensayo de compresión Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

A continuación, en la tabla 5-10, se presenta un resumen con los límites de fluencia.

Tabla 5-10 Resumen límites de fluencia

Aleación	Límite Fluencia [MPa]
Cu 0%v Mo <sub>2</sub> C 30 horas	410
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	485
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	680
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	440
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	500

## 5.4 Ensayos de compresión en caliente

La compresión en caliente se realizó para poder determinar el esfuerzo de fluencia a diferentes temperaturas de cada aleación en un posterior ensayo de creep. El esfuerzo de fluencia se determina en el punto en el cual cambia de pendiente de la curva y es el máximo esfuerzo permitido para el posterior ensayo de creep. Se debe considerar un esfuerzo menor al de fluencia para que el material no entre en el estado plástico.

### 5.4.1 Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda 500°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-6, el límite de fluencia, a 500°C, para la aleación Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C es 20 [MPa].

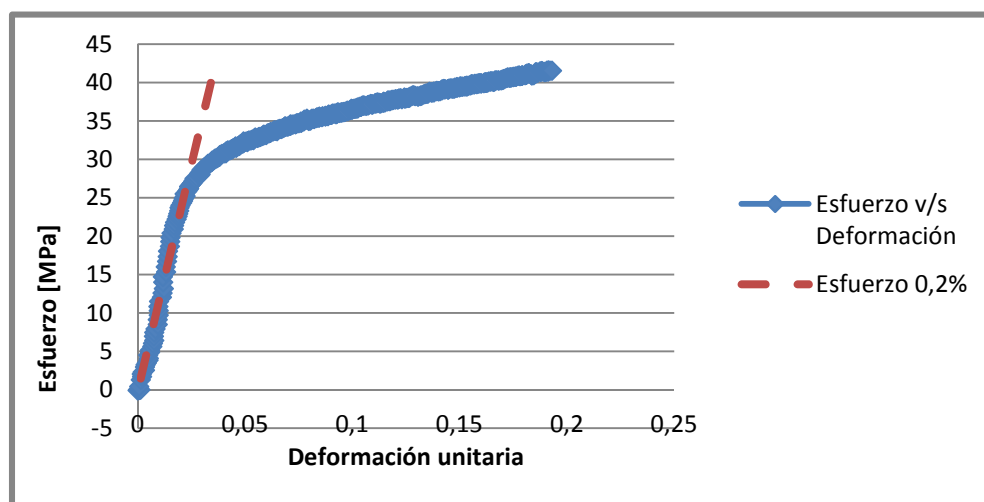


Gráfico 5-6 Ensayo de compresión Cu-0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda a 500°C



#### 5.4.2 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda 500°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-7, el límite de fluencia, a 500°C, para la aleación Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C, 100 horas de molienda es 50 [MPa].

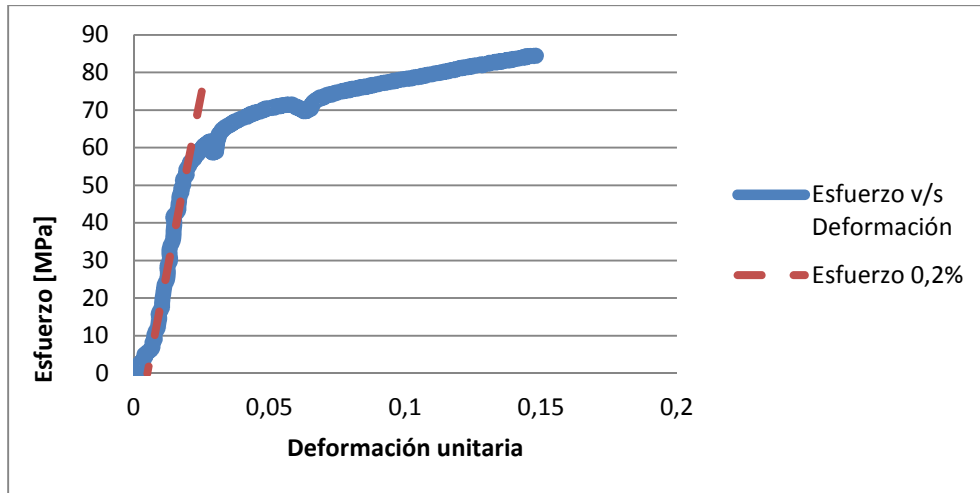


Gráfico 5-7 Ensayo de compresión a 500°C Cu-2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

#### 5.4.3 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda 500°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-8, el límite de fluencia, a 500°C, para la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, 100 horas de molienda es 80 [MPa].

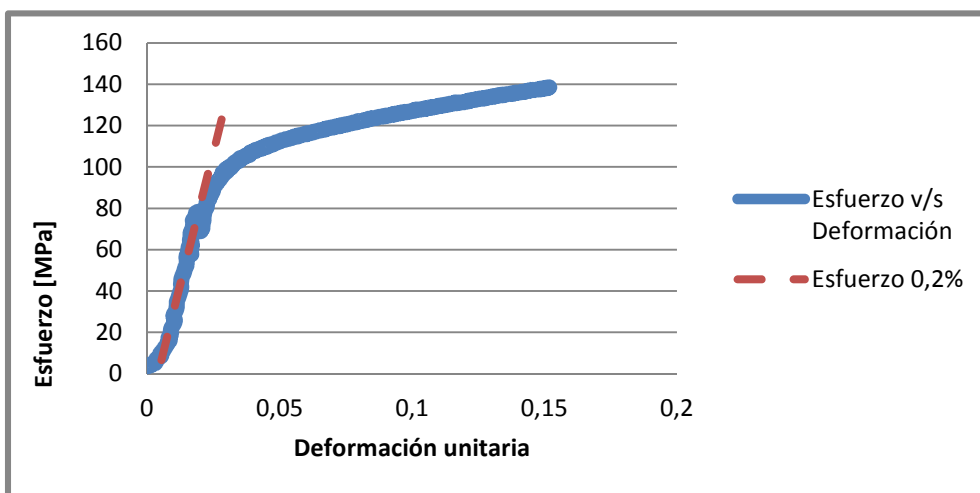


Gráfico 5-8 Ensayo de compresión a 500°C Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

#### 5.4.4 Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda 700°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-9, el límite de fluencia, a 700°C, para la aleación Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C, 30 horas de molienda es 10 [MPa].

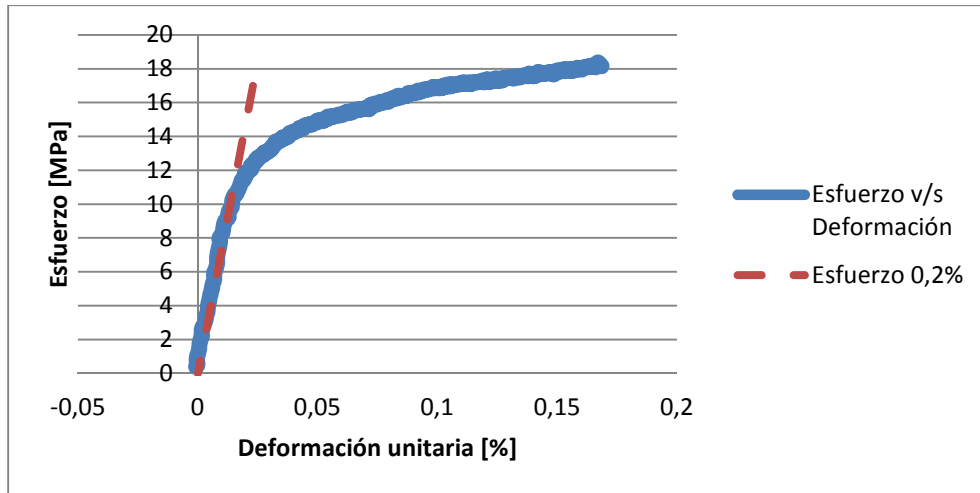


Gráfico 5-9 Ensayo de compresión Cu-0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda a 700°C

#### 5.4.5 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda 700°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-10, el límite de fluencia, a 700°C, para la aleación Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C, 100 horas de molienda es 27 [MPa].

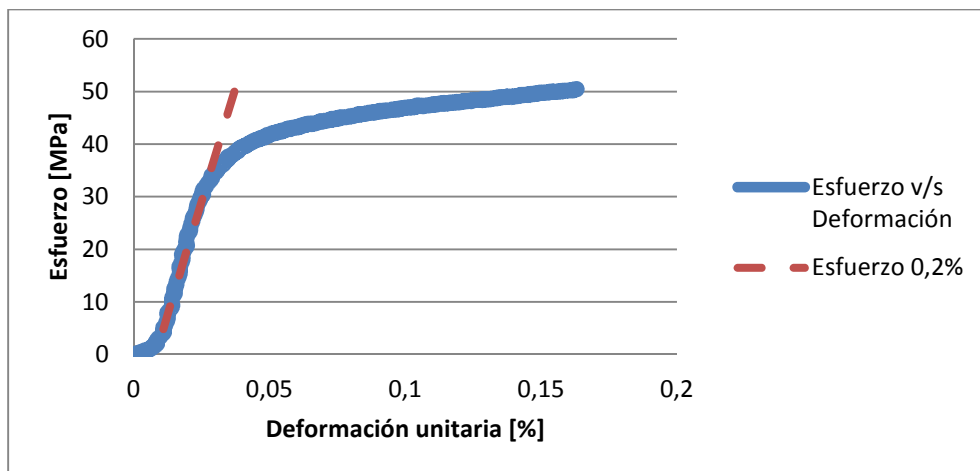


Gráfico 5-10 Ensayo de compresión Cu-2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda a 700°C

#### 5.4.6 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda 700°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-11, el límite de fluencia, a 700°C, para la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, 100 horas de molienda es 32 [MPa].

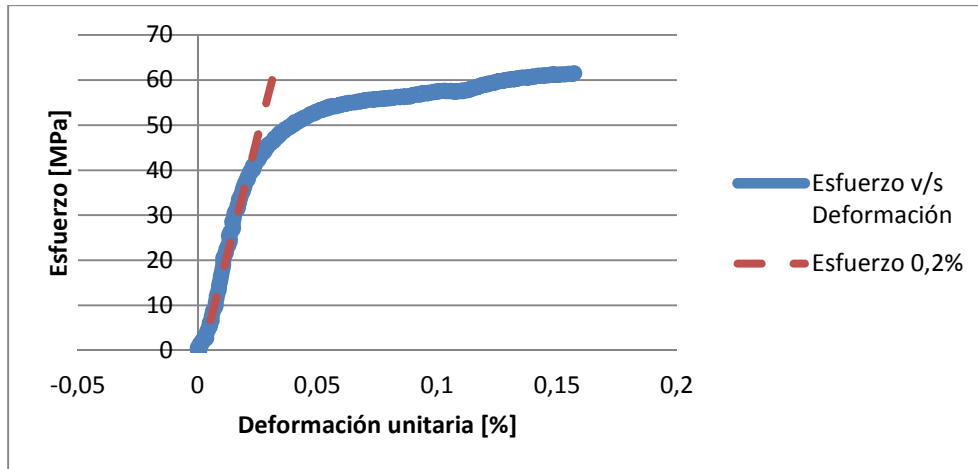


Gráfico 5-11 Ensayo de compresión Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda a 700°C

#### 5.4.7 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda 500°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-12, el límite de fluencia, a 500°C, para la aleación Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C, 150 horas de molienda es 80 [MPa].

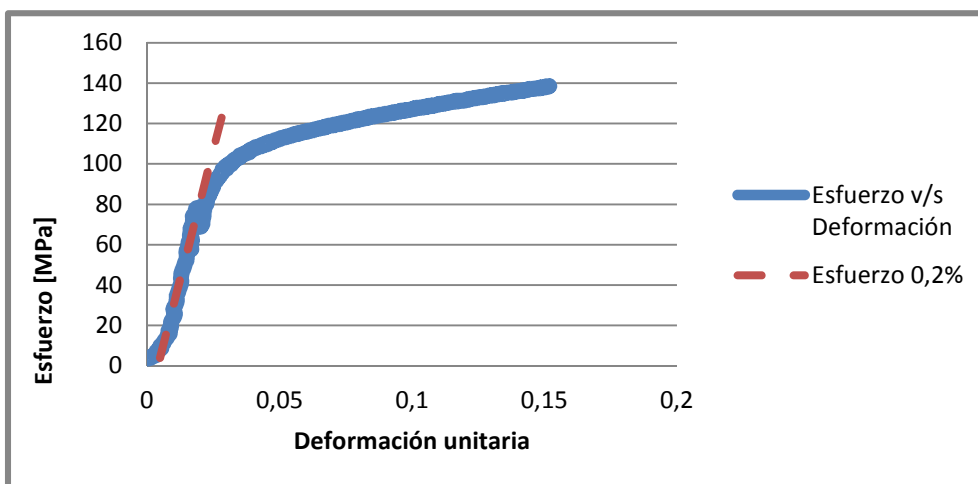


Gráfico 5-12 Ensayo de compresión Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda a 700°C

#### 5.4.8 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda 500°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-13, el límite de fluencia, a 500°C, para la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, 150 horas de molienda es 95 [MPa].

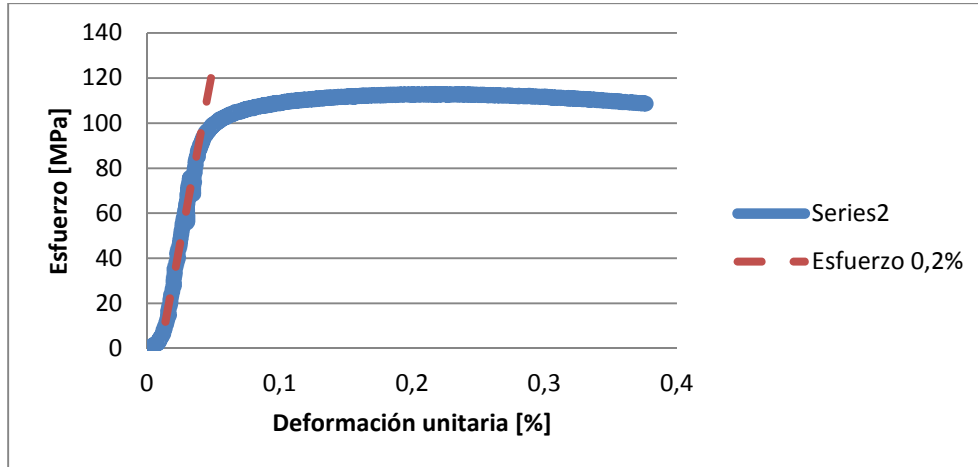


Gráfico 5-13 Ensayo de compresión Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda a 500°C

#### 5.4.9 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda 700°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-14, el límite de fluencia, a 700°C, para la aleación Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C, 150 horas de molienda es 40 [MPa].

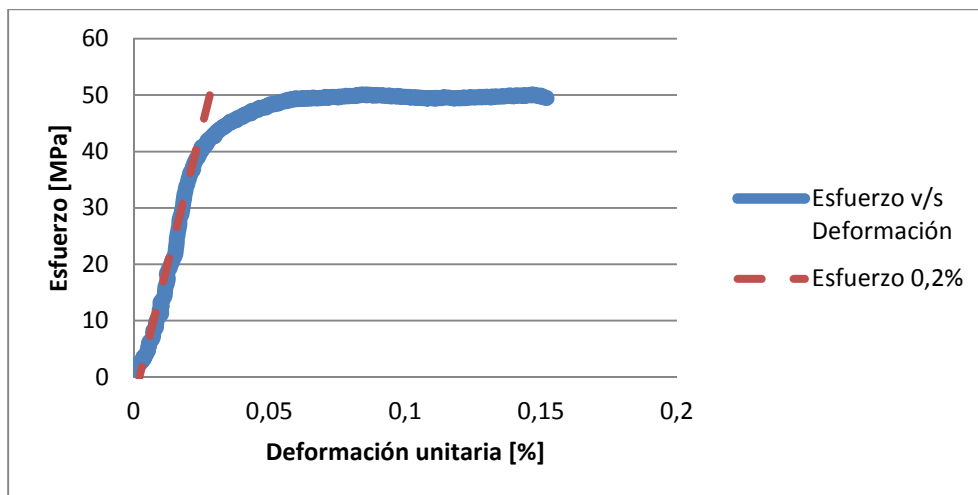


Gráfico 5-14 Ensayo de compresión Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda a 700°C

#### 5.4.10 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda 700°C

Como se puede apreciar en el gráfico 5-15, el límite de fluencia, a 700°C, para la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, 150 horas de molienda es 52 [MPa].

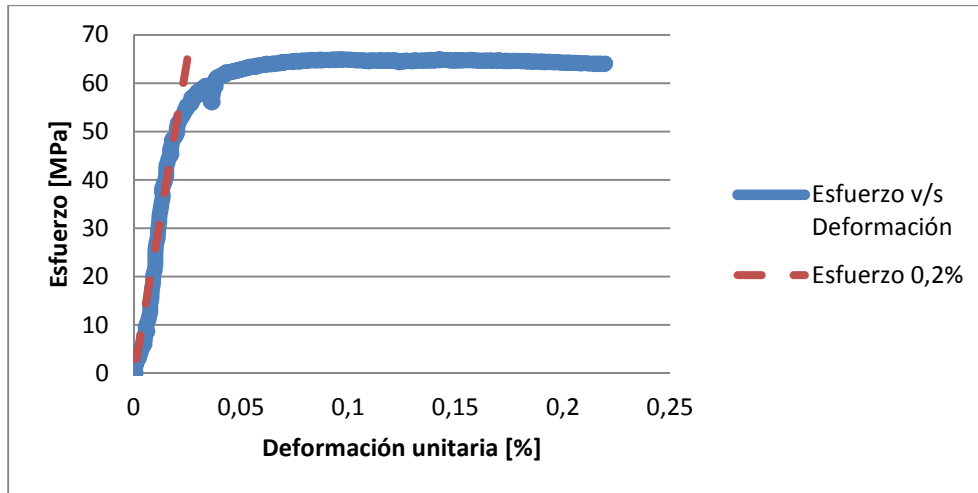


Gráfico 5-15 Ensayo de compresión Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda a 700°C

A continuación se presenta la tabla 5-11 con un resumen de los límites de fluencia de las diferentes aleaciones:

Tabla 5-11 Resumen límite de fluencia a 500°C y 700°C

Aleación	Límite Fluencia a 500°C [MPa]	Límite Fluencia a 700°C [MPa]
<b>Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas</b>	20	8
<b>Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas</b>	50	30
<b>Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas</b>	80	40
<b>Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas</b>	80	40
<b>Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas</b>	95	52

## 5.5 Creep

Luego de determinar los límites de fluencia a 500°C y 700°C, se procedió a determinar los esfuerzos a los cuales se hizo el creep. Dichos esfuerzos corresponden a 50%, 65% y 80% del límite de fluencia. En la tabla 5-12 se observan los esfuerzos obtenidos a 500°C y en la tabla 5-13 los esfuerzos obtenidos a 700°C.

Tabla 5-12 Esfuerzos creep a 500°C

Aleación	Límite fluencia a 500°C [MPa]	Creep 1 [MPa]	Creep 2 [MPa]	Creep 3 [MPa]
<b>Cu-0%v Mo 30 horas</b>	20	17	14	11
<b>Cu-2,5%v Mo 100 horas</b>	50	40	33	26
<b>Cu-5%v Mo 100 horas</b>	80	65	55	45
<b>Cu-2,5%v Mo 150 horas</b>	80	65	55	45
<b>Cu-5%v Mo 150 horas</b>	95	76	62	48

Tabla 5-13 Esfuerzos creep a 700°C

Aleación	Límite fluencia a 700°C [MPa]	Creep 1 [MPa]	Creep 2 [MPa]	Creep 3 [MPa]
<b>Cu-0%v Mo 30 horas</b>	10	8	7	6
<b>Cu-2,5%v Mo 100 horas</b>	27	22	18	14
<b>Cu-5%v Mo 100 horas</b>	32	25	20	15
<b>Cu-2,5%v Mo 150 horas</b>	40	32	26	20
<b>Cu-5%v Mo 150 horas</b>	52	42	34	26

Finalmente se realizaron los ensayos de creep a los esfuerzos y temperaturas ya mencionados, dando como resultado las velocidades de deformación, expuestas en la tabla 5-14.

Tabla 5-14 velocidades de deformación

Aleación	Ensayo	Esfuerzo [MPa]	Velocidad [ $s^{-1}$ ]
Cu 0%v Mo <sub>2</sub> C 30 horas	Creep 500 °C	11	$1,11 \times 10^{-06}$
		14	$4,10 \times 10^{-07}$
		17	$9,32 \times 10^{-07}$
	Creep 700 °C	6	$2,26 \times 10^{-06}$
		7	$1,80 \times 10^{-06}$
		8	$1,48 \times 10^{-06}$
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	Creep 500 °C	26	$3,40 \times 10^{-08}$
		33	$5,54 \times 10^{-08}$
		40	$6,38 \times 10^{-08}$
	Creep 700 °C	14	$7,64 \times 10^{-07}$
		18	$9,86 \times 10^{-07}$
		22	$3,08 \times 10^{-06}$
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	Creep 500 °C	45	$2,08 \times 10^{-08}$
		55	$5,78 \times 10^{-08}$
		65	$5,68 \times 10^{-08}$
	Creep 700 °C	20	$3,74 \times 10^{-07}$
		26	$5,00 \times 10^{-06}$
		32	$2,83 \times 10^{-05}$
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	Creep 500 °C	45	$2,66 \times 10^{-10}$
		55	$2,36 \times 10^{-09}$
		65	$4,52 \times 10^{-08}$
	Creep 700 °C	16	$2,76 \times 10^{-07}$
		20	$4,02 \times 10^{-07}$
		25	$8,70 \times 10^{-07}$
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	Creep 500 °C	48	$5,84 \times 10^{-09}$
		62	$2,04 \times 10^{-08}$
		76	$9,10 \times 10^{-08}$
	Creep 700 °C	26	$2,32 \times 10^{-06}$
		34	$5,70 \times 10^{-06}$
		42	$2,14 \times 10^{-05}$

## 5.6 Micrografía SEM y análisis EDS

De la figura 5-1 a 5-4 se presentan las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de todas las aleaciones estudiadas.

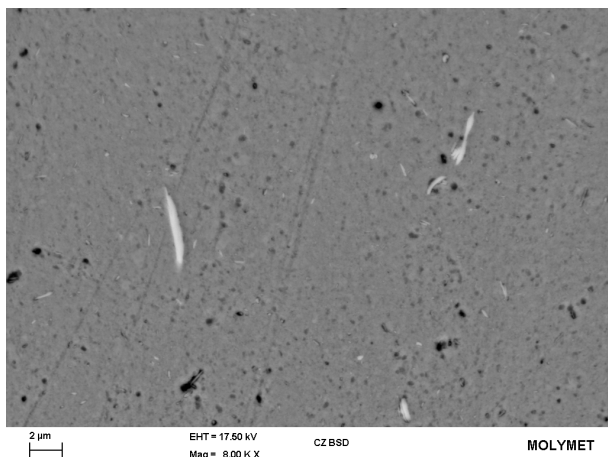


Figura 5-1 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

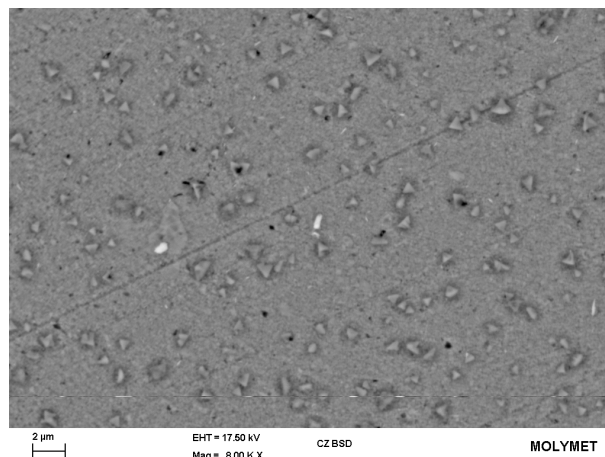


Figura 5-2 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

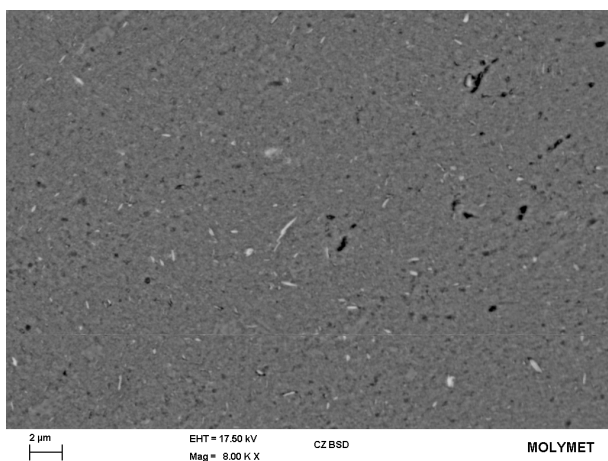


Figura 5-3 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

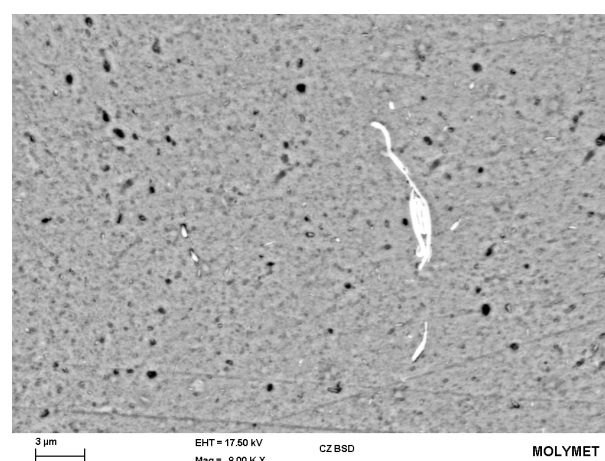


Figura 5-4 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

Es posible distinguir en las imágenes los elementos presentes, en donde los elementos más ligeros (como el caso del carbono) son más oscuros y los elementos más pesados (como el caso del molibdeno) son más claros.



### 5.6.1 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

En la figura 5-5 es posible observar la muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C con 100 horas de molienda.

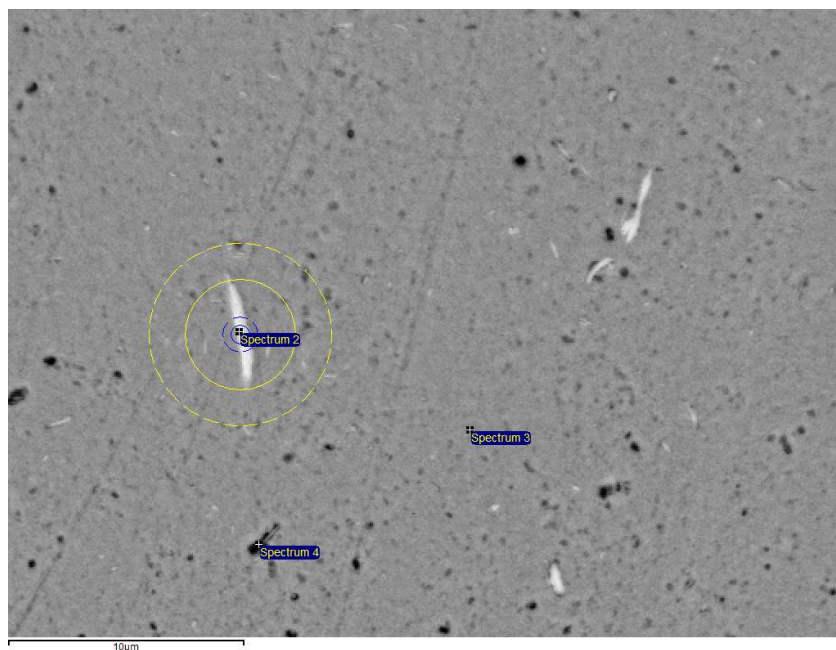


Figura 5-5 SEM para muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

En la tabla 5-15 se observa el análisis EDS para la muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C con 100 horas de molienda en donde sum spectrum, es el porcentaje en peso de cada elemento encontrado en el total del espectro, los spectrum 2, 3 y 4 son lo encontrado en espectros específicas, señalados en la imagen 5-1.

Tabla 5-15 Análisis EDS para muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

<b>Espectro</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>	<b>C [%p]</b>	<b>O [%p]</b>
Sum Spectrum	90.27	3.08	4.83	1.45
Spectrum 2	14.19	75.54	8.76	1.45
Spectrum 3	92.64	0.66	4.53	1.56
Spectrum 4	65.30	10.56	22.81	1.18

### 5.6.2 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

En la figura 5-6 es posible observar la muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C con 100 horas de molienda

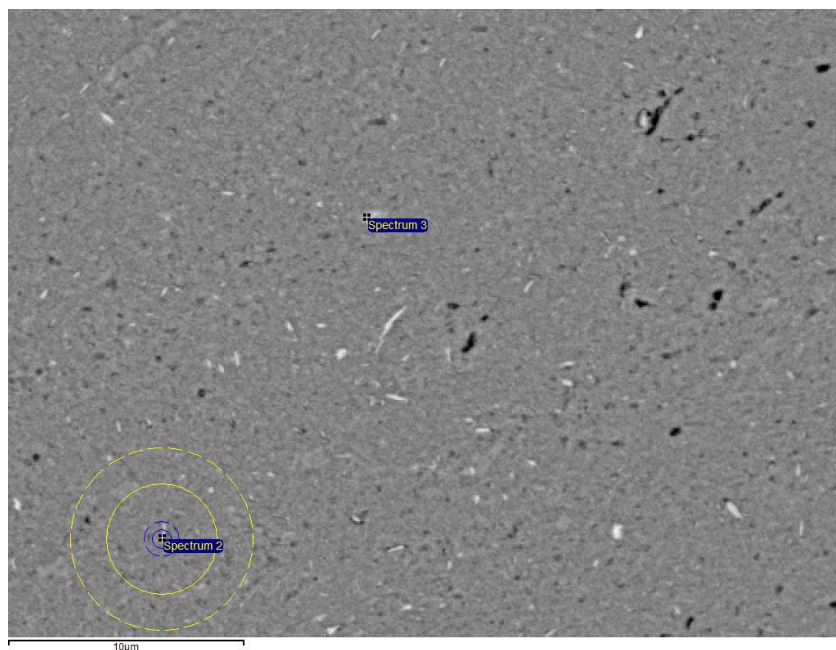


Figura 5-6 SEM para muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

En la tabla 5-16 se observa el análisis EDS para la muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C con 100 horas de molienda.

Tabla 5-16 Análisis EDS para muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas de molienda

<b>Espectro</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>	<b>C [%p]</b>	<b>O [%p]</b>
Sum Spectrum	85.41	6.08	6.55	1.68
Spectrum 2	71.63	12.70	14.09	1.44
Spectrum 3	71.40	17.94	9.12	1.39

### 5.6.3 Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

En la figura 5-7 es posible observar la muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C con 150 horas de molienda

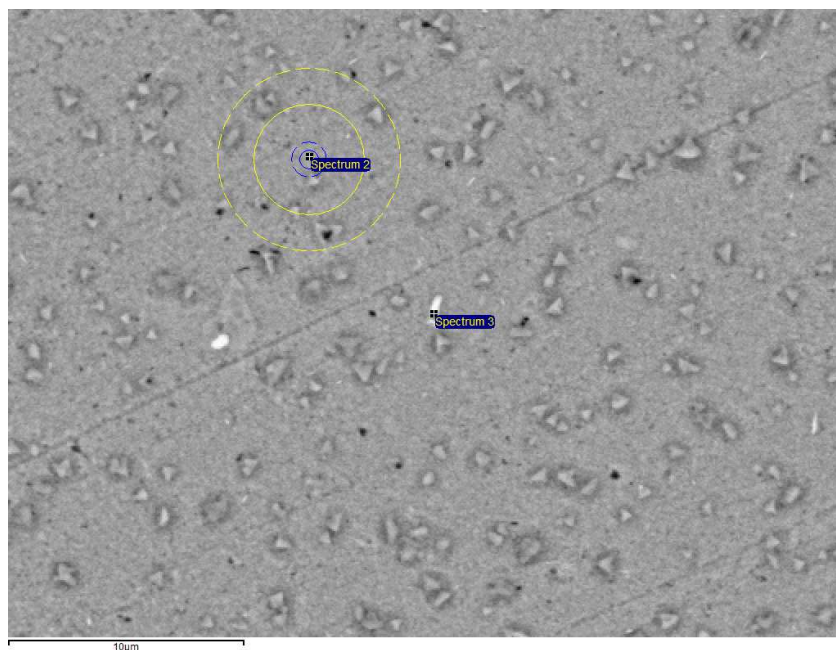


Figura 5-7 SEM para muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

En la tabla 5-17 se observa el análisis EDS para la muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C con 150 horas de molienda.

Tabla 5-17 Análisis EDS para muestra Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

<b>Espectro</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>	<b>C [%p]</b>	<b>O [%p]</b>
Sum Spectrum	89.33	2.98	4.93	2.02
Spectrum 2	86.18	3.09	9.07	1.45
Spectrum 3	48.13	41.29	8.38	1.95

#### 5.6.4 Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

En la figura 5-8 es posible observar la muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C con 150 horas de molienda

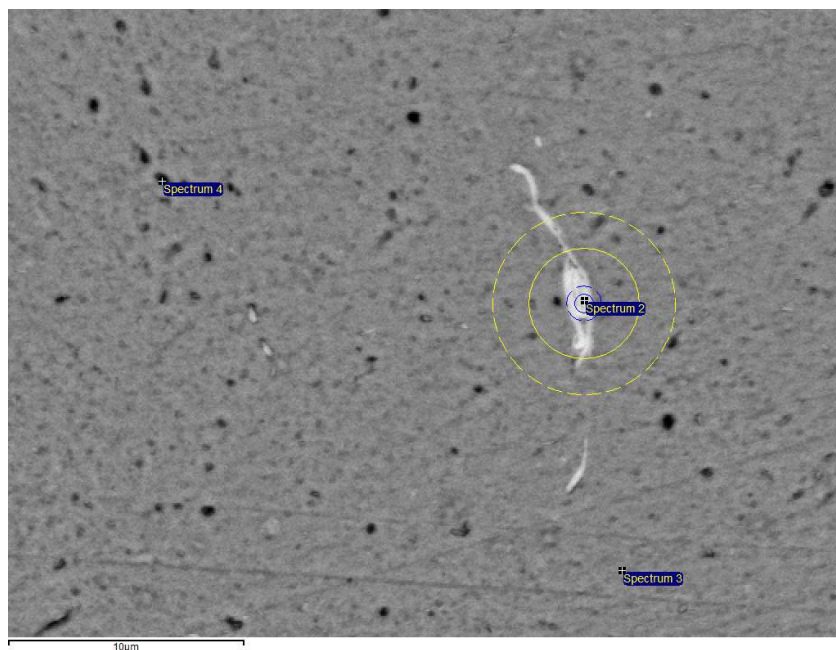


Figura 5-8 SEM para muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

En la tabla 5-18 se observa el análisis EDS para la muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C con 150 horas de molienda.

Tabla 5-18 Análisis EDS para muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas de molienda

<b>Espectro</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>	<b>C [%p]</b>	<b>O [%p]</b>
Sum Spectrum	86.05	5.43	5.96	2.13
Spectrum 2	21.33	70.28	6.01	2.20
Spectrum 3	83.18	5.43	8.44	2.42
Spectrum 4	81.36	6.19	9.34	2.48

### 5.6.5 Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda

En la figura 5-9 es posible observar la muestra Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C con 30 horas de molienda

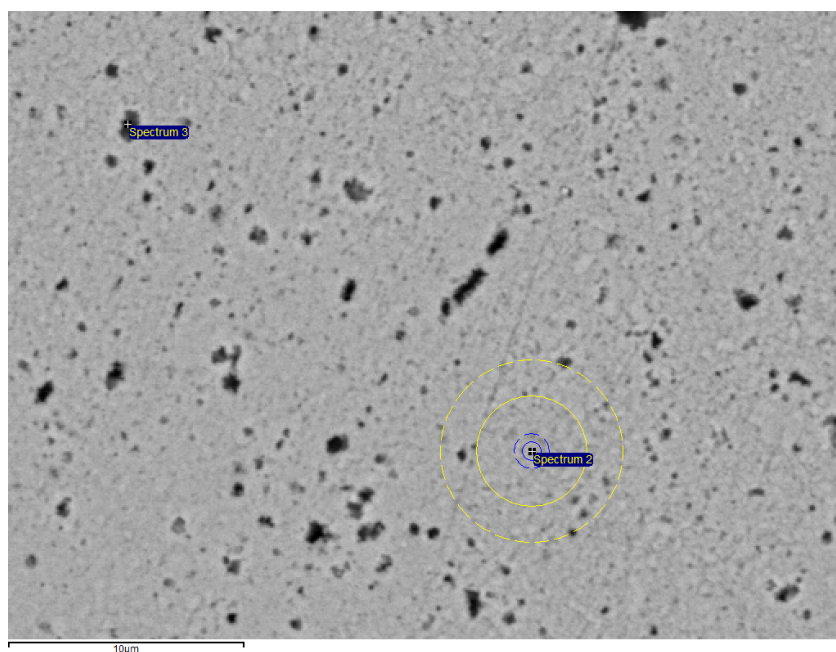


Figura 5-9 SEM para muestra Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda

En la tabla 5-19 se observa el análisis EDS para la muestra Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C con 30 horas de molienda.

Tabla 5-19 Análisis EDS para muestra Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas de molienda

<b>Espectro</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>C [%p]</b>	<b>O [%p]</b>
Sum Spectrum	93.85	3.86	1.73
Spectrum 2	92.19	6.07	1.30
Spectrum 3	90.64	4.33	3.39

## 6 Análisis y discusión

A lo largo de este capítulo, se discuten los resultados que se presentaron en el capítulo anterior.

### 6.1 Análisis químico de polvos

En la tabla 6-1 y 6-2 se presentan la composición química comparada con la nominal para las mezclas con 2,5% y 5%.

Tabla 6-1 Análisis químico de polvo junto con composición nominal para aleación Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C

	%p requerido para composición nominal	100 horas molienda	150 horas de molienda
		2,5%v Mo <sub>2</sub> C	2,5%v Mo <sub>2</sub> C
<b>Análisis</b>	-----	<b>%p</b>	<b>%p</b>
<b>Cobre</b>	<b>97,516</b>	<b>96,9</b>	<b>95,6</b>
<b>Carbono</b>	<b>0,146</b>	<b>0,5467</b>	<b>0,6447</b>
<b>Oxigeno</b>	-----	0,225	0,5166
<b>Molibdeno</b>	<b>2,337</b>	<b>2,3436</b>	<b>2,2081</b>
<b>Hierro</b>	-----	0,0306	0,1578
<b>Cromo</b>	-----	0,005	0,0104

Tabla 6-2 Análisis químico de polvo junto con composición nominal para aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C

	%p requerido para composición nominal	100 horas molienda	150 horas de molienda
		5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C
<b>Análisis</b>	-----	<b>%p</b>	<b>%p</b>
<b>Cobre</b>	<b>95,031</b>	<b>94,2</b>	<b>95,3</b>
<b>Carbono</b>	<b>0,292</b>	<b>0,6647</b>	<b>0,6497</b>
<b>Oxigeno</b>	-----	0,3715	0,4569
<b>Molibdeno</b>	<b>4,968</b>	<b>4,5516</b>	<b>3,5181</b>
<b>Hierro</b>	-----	0,0413	0,096
<b>Cromo</b>	-----	0,006	0,0163

Como se observa en ambas tablas, el porcentaje de carbono para formar 2,5% v de Mo<sub>2</sub>C y 5% v de Mo<sub>2</sub>C es 0,14% y 0,29% respectivamente. En todas las muestras se sobrepasa la cantidad nominal, detectándose sobre el 0,54%, lo cual nos indica que el carbono disponible no es limitante para la formación de carburos.

El molibdeno detectado para las muestras de 100 horas es muy cercano a la cantidad nominal, pero al aumentar las horas de molienda, este decae. Esto puede suceder debido a la incrustación que se produce en las bolas de molienda, haciendo que el molibdeno quede pegado en estas.

Con respecto al oxígeno se observa que a medida que aumenta el tiempo de molienda también aumenta el oxígeno, lo cual podría provocar óxidos en la aleación.

En cuanto al hierro y cromo se observa que aumentan con las horas de molienda, lo cual es de esperar debido a que aumenta el desgaste de la vasija de acero inoxidable con la gran cantidad de tiempo que implica la molienda. De todas formas siguen estando en bajas cantidades.

## **6.2 Análisis DRX muestras extruidas**

Se puede observar que en todas las muestras el porcentaje de Mo, medido por DRX (que corresponde al Mo libre, sin reaccionar), disminuye considerablemente en relación al porcentaje inicial y es menor que el porcentaje encontrado en el análisis químico de polvos, y la diferencia entre estos dos valores medidos correspondería al molibdeno que se encuentra en solución sólida. Por otra parte, es de esperar que a un mayor tiempo de molienda entre más Mo en solución sólida, lo cual coincide con las muestras con 5% v Mo<sub>2</sub>C, pero en el caso de las muestras de 2,5% Mo<sub>2</sub>C este aumenta, lo cual no es un resultado esperado.

También, se aprecia un refinamiento del tamaño de cristalito al aumentar las horas de molienda, fenómeno explicado a los constantes choques que están sometidos los polvos.

En la tabla 6-3 y 6-4 se observan los resultados de análisis de DRX realizados a 4 probetas, después de los ensayos de creep y se comparan con el análisis previo. A medida que las muestras son sometidas a altas temperaturas en el ensayo de creep, se observó una disminución del molibdeno detectado, lo cual indicaría que sigue entrando molibdeno en solución sólida. Además se aprecia un aumento del tamaño de cristalito, debido al crecimiento de grano que se produce en el material al ser sometido a altas temperaturas.

**Tabla 6-3 Resultados de DRX para polvos de Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C, 100 horas de molienda, extruido y ensayado en creep a 700 °C**

	<b>d<sub>Cu</sub>[nm]</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>
<b>Molido 100 horas</b>	43,5	97,4	2,6
<b>Creep a16 [MPa]</b>	53,5	97,5	2,5
<b>Creep a 25 [MPa]</b>	56,9	98,4	1,58

**Tabla 6-4 Resultados de DRX para polvos de Cu-5%v Mo<sub>2</sub>C, 150 horas de molienda, extruido y ensayado en creep a 500 °C**

	<b>d<sub>Cu</sub>[nm]</b>	<b>Cu [%p]</b>	<b>Mo [%p]</b>
<b>Molido 150 horas</b>	53,2	98,0	1,91
<b>Creep a 48 [MPa]</b>	53,5	97,5	1,79
<b>Creep a 76 [MPa]</b>	58,17	97,1	2,87

En la tabla 6-5 se muestra la diferencia entre el molibdeno detectado en el análisis químico de polvos molidos y lo detectado por difracción de rayos tras la extrusión y ensayos de creep. Este resultado tiene por objetivo estimar la máxima cantidad de molibdeno que podría estar en solución sólida y/o como carburos.

**Tabla 6-5 Diferencia entre molibdeno detectado en análisis químico y DRX**

<b>Aleación</b>	<b>%Mo en solución sólida y/o carburos</b>
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	1,92
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	0,77
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	1,95
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	1,60



### 6.3 Micrografía SEM y análisis EDS

En las figuras 5-1 a 5-4 se aprecia que existe molibdeno libre, sin reaccionar, refinado, lo cual indicaría que no todo el molibdeno entra en solución sólida o forma carburos. Además, al comparar con otros resultados [11], en el cual se llegó hasta 80 horas de molienda para una aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, con la muestra molida 150 horas e igual cantidad nominal, se observa también Mo libre y un claro refinamiento de las partículas de Mo, como se observa en las figuras 6-1 y 6-2.

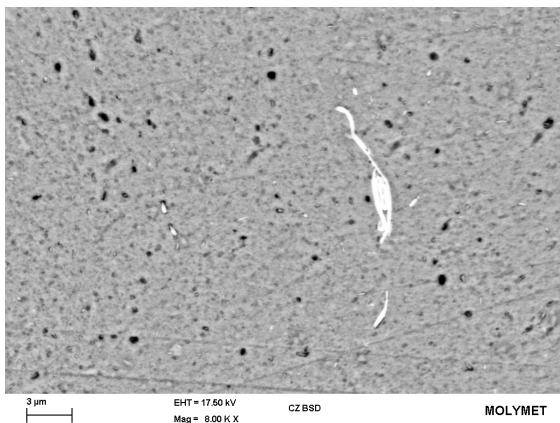


Figura 6-1 Muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas

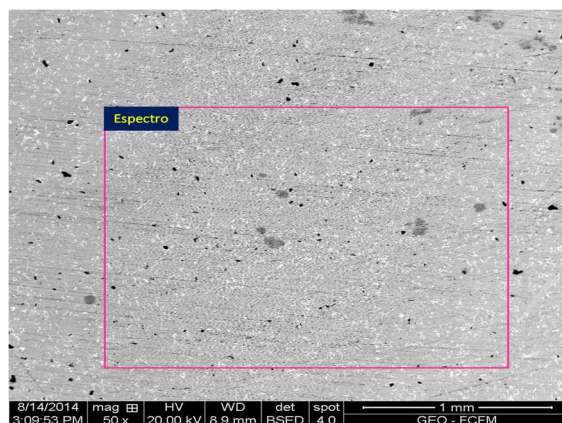


Figura 6-2 Muestra Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 80 horas

En la tabla 6-6 y 6-7 se presenta la comparación entre el análisis químico realizado a los polvos después de la molienda y el análisis EDS realizadas a las muestras extruidas. Ambos resultados indican que se sigue la misma tendencia con respecto a todos los elementos.

Tabla 6-6 Comparación análisis químico con EDS para 100 horas de molienda

	Análisis químico		EDS	
	2,5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C	2,5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C
Análisis	%p	%p	%p	%p
Cobre	96,9	94,2	90,2	85,41
Carbono	<b>0,5467</b>	<b>0,6647</b>	<b>4,83</b>	<b>6,55</b>
Oxígeno	0,225	0,3715	1,45	1,68
Molibdeno	<b>2,3436</b>	<b>4,5516</b>	<b>3,08</b>	<b>6,08</b>

Tabla 6-7 Comparación análisis químico con EDS para 150 horas de molienda

	Análisis químico		EDS	
	2,5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C	2,5%v Mo <sub>2</sub> C	5%v Mo <sub>2</sub> C
Análisis	%p	%p	%p	%p
Cobre	95,6	95,3	89,3	86,0
Carbono	<b>0,6447</b>	<b>0,6497</b>	<b>4,93</b>	<b>5,96</b>
Oxígeno	0,5166	0,4569	2,02	2,13
Molibdeno	<b>2,2081</b>	<b>3,5181</b>	<b>2,98</b>	<b>5,43</b>

#### 6.4 Ensayos de compresión en frío

En cuanto a la compresión en frío se observa que al aumentar el %v Mo<sub>2</sub>C nominal, aumenta el límite de fluencia, pero al aumentar el tiempo de molienda este disminuye. La tabla 6-8 presenta el límite de fluencia comparado con el porcentaje de molibdeno encontrado en el análisis químico, en la cual se observa que el porcentaje de Mo detectado posee una directa relación con el límite de fluencia: a mayor Mo, más alto es límite. Esto indicaría que el mecanismo de endurecimiento por dispersión de carburos de Mo y/o por solución sólida estarían dominando este comportamiento.

Tabla 6-8 Límite de fluencia comparado con análisis químico

Aleación	Límite Fluencia [MPa]	%p Mo análisis químico
Cu 0%v Mo <sub>2</sub> C 30 horas	410	0,07
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	485	2,34
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	680	4,55
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	440	2,20
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	500	3,51

## 6.5 Ensayos de compresión en caliente

Con respecto a la compresión en caliente, al igual que la compresión en frío, se observa a que a un mayor % de Mo, mayor es el límite de fluencia, pero al contrario a mayor tiempo de molienda, menor es límite de fluencia en todos los casos. Esto es posible de explicar debido a que actúan diferentes mecanismos a altas temperaturas, lo cual indicaría que en compresión en caliente prevalece el mecanismo de endurecimiento por carburos, y/o el efecto del molibdeno que está en solución sólida.

## 6.6 Creep

A continuación se analizan los ensayos de creep a 700°C y 500 °C:

### 6.6.1 Creep a 700 °C

En el gráfico 6-1 presenta los datos en escala logarítmica para el creep de 700°C y las aleaciones con 100 horas de molienda. Se observó el mejor comportamiento de la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C con respecto a la aleación 2,5%v Mo<sub>2</sub>C, obteniendo menores velocidades de deformación a esfuerzos más altos. Al observar la tabla 6-5 se aprecia que la aleación que podría poseer una mayor cantidad de molibdeno en solución sólida es Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, lo cual explicaría el mejor comportamiento en creep.

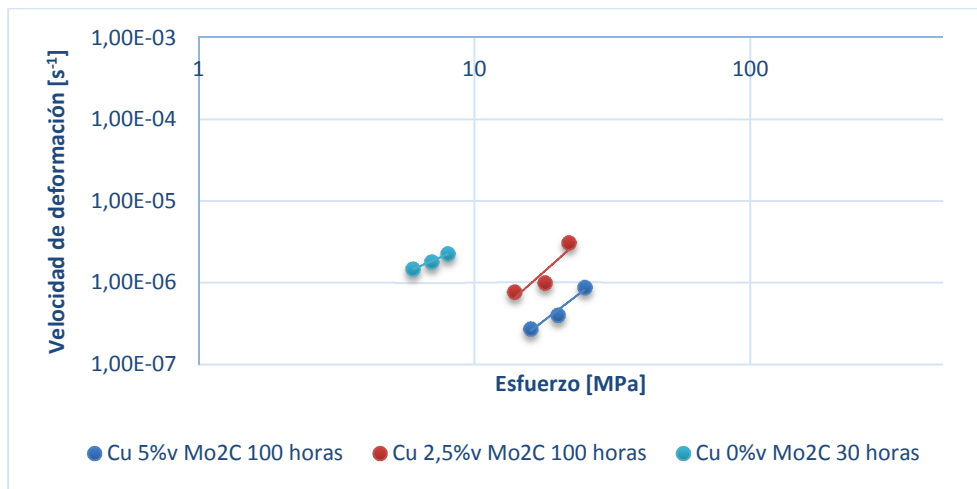
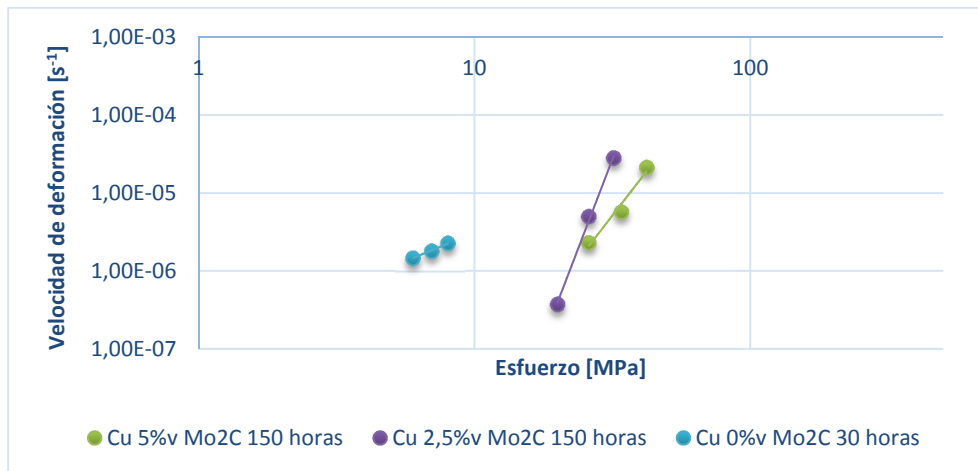


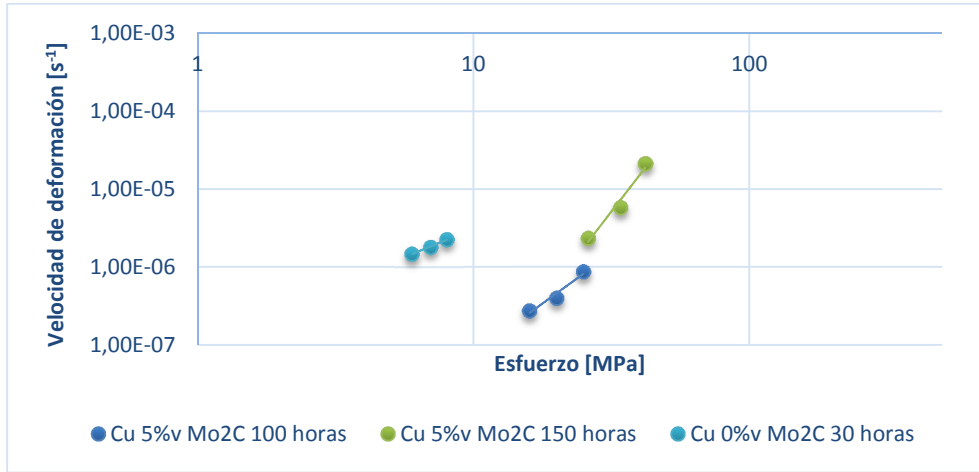
Gráfico 6-1 Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 700°C, 100 horas de molienda

El gráfico 6-2, presenta el creep a 700°, para 150 horas de molienda, al igual que el caso anterior, a mayor porcentaje de Mo, mejor es el comportamiento en creep, lo cual se explica al observar la tabla 6-5, en donde la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C podría poseer una mayor cantidad de molibdeno en solución sólida y/o formando carburos.



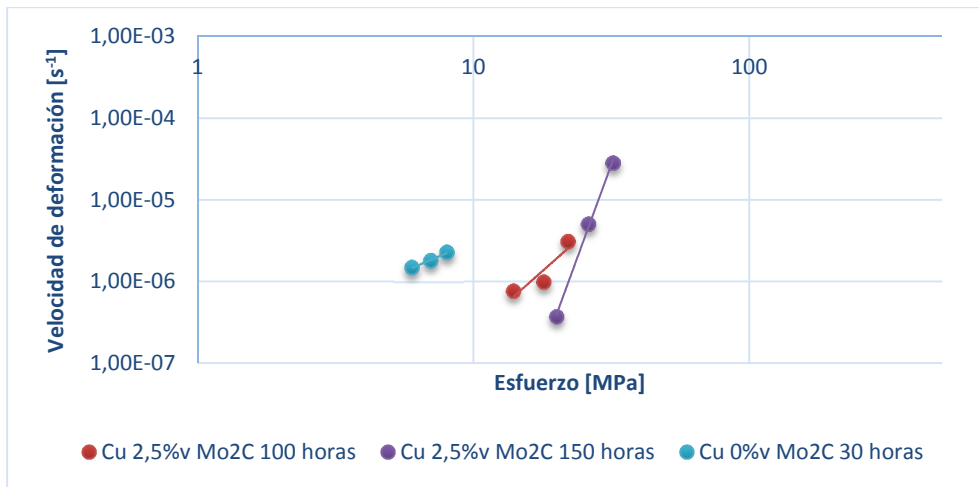
**Gráfico 6-2 Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 700°C, 150 horas de molienda**

El gráfico 6-3 muestra la influencia del tiempo de molienda para una misma composición. Las curvas están en rangos diferentes de velocidad y esfuerzo, lo cual hace difícil su comparación. El único punto comparable es el de esfuerzo aplicado más cercano entre ambas, donde se aprecia un mejor comportamiento de la aleación con 100 horas de molienda, y es también la que podría poseer una mayor cantidad de molibdeno en solución sólida según la tabla 5-6.



**Gráfico 6-3** Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 700°C para aleaciones con 5%v Mo<sub>2</sub>C

El gráfico 6-4, muestra el comportamiento para las aleaciones Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C. La muestra molida 150 horas, presenta un mejor comportamiento que la molida 100 horas. En este caso no es posible explicar el mejor comportamiento de esta aleación, debido a que no concuerda con la cantidad de molibdeno que podría estar en solución sólida o formando carburos, por lo tanto sería necesario aplicar otros métodos de análisis, como por ejemplo TEM, para saber lo que está pasando realmente.



**Gráfico 6-4** Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 700°C para aleaciones con 2,5%v Mo<sub>2</sub>C

### 6.6.2 Creep a 500°

En el gráfico 6-5 presenta los datos en escala logarítmica para el creep de 500°C y las aleaciones con 100 horas de molienda. Al igual que el creep a 700 °C, se observó el mejor comportamiento de la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C con respecto a la aleación 2,5%v Mo<sub>2</sub>C, obteniendo menores velocidades de deformación a esfuerzos más altos. En la tabla 6-5 se aprecia que la aleación que podría poseer una mayor cantidad de molibdeno en solución sólida o formando carburos es Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, lo cual explicaría el mejor comportamiento en creep.

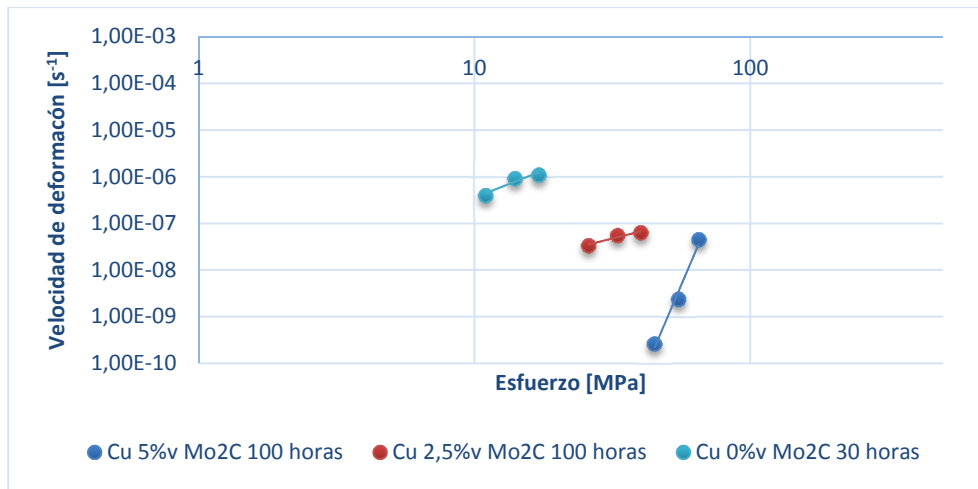
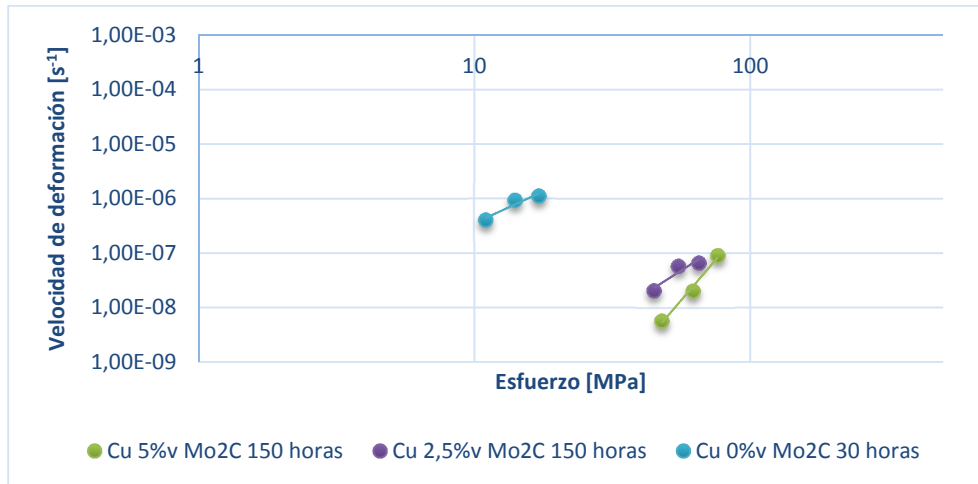


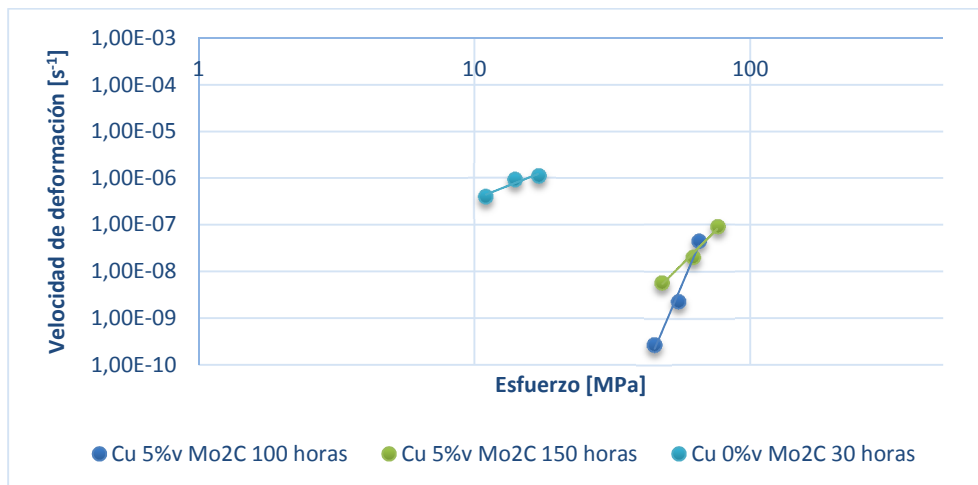
Gráfico 6-5 Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 500°C, 100 horas de molienda

El gráfico 6-6, muestra el creep a 500°, para 150 horas de molienda, donde se observó que a mayor porcentaje de Mo, mejor es el comportamiento en creep. Al observar la tabla 6-5, la aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C podría poseer una mayor cantidad de molibdeno en solución sólida o formando carburos, explicando el mejor comportamiento.



**Gráfico 6-6 Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 500°C, 150 horas de molienda**

El gráfico 6-7 muestra la influencia del tiempo de molienda para una misma composición, a 500 °C. En el caso de las aleaciones Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C, se observó un mejor comportamiento para la aleación con 100 horas de molienda, debido a que podría poseer una mayor cantidad de molibdeno en solución sólida o formando carburos, como se observa en la tabla 5-6.



**Gráfico 6-7 Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 500°C para aleaciones con 5%v Mo<sub>2</sub>C**

El gráfico 6-8, muestra el comportamiento para las aleaciones Cu 2,5%v Mo<sub>2</sub>C a 500 °C. La muestra molida 150 horas, presenta un mejor comportamiento que la molida 100 horas, a pesar de que poseen velocidad de deformación similares, esta última resiste esfuerzos más grandes. En este caso no es posible explicar el mejor comportamiento de esta aleación, debido a que no concuerda con la cantidad de molibdeno que podría estar en solución sólida o formando carburos.

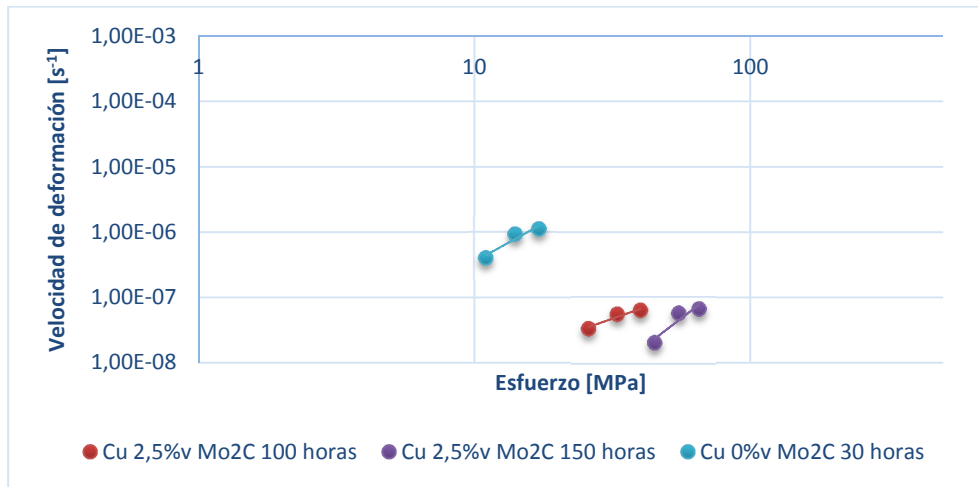


Gráfico 6-8 Esfuerzo v/s velocidad de deformación a 500°C para aleaciones con 2,5%v Mo<sub>2</sub>C

### 6.6.3 Exponente de esfuerzo aparente

La tabla 6-9 muestra el resultado obtenido para el exponente de esfuerzo aparente, junto con cantidad máxima de molibdeno que puede estar en solución sólida o formando carburos. .

Tabla 6-9 Datos del exponente de esfuerzo aparente

Aleación	Temperatura [°C]	Exponente de esfuerzo aparente n	%Mo en solución solida
Cu 0%v Mo <sub>2</sub> C 30 horas	500	2,33	----
	700	1,45	
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	500	1,48	1,92
	700	2,99	
Cu 2,5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	500	3,23	0,77
	700	9,23	
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 100 horas	500	13,86	1,95
	700	2,57	
Cu 5%v Mo <sub>2</sub> C 150 horas	500	5,93	1,60
	700	4,57	

Es posible apreciar que no existe una clara correlación entre el molibdeno que podría estar en solución sólida o formando carburos y el mecanismo de creep predominante. Nótese que valores de n cercanos a 1, indican que el mecanismo predominante es flujo difusional; entre 3 y 8, ascenso de dislocaciones, y mayores valores que los anteriores, endurecimiento por dispersión.



## 7 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones son:

- Se logró incorporar molibdeno y carbono en la matriz de cobre, observando en los resultados de DRX de las muestras extruidas la presencia de molibdeno en solución sólida y/o formando carburos.
- El análisis SEM, demuestra que existe un gran refinamiento del molibdeno a medida que aumentan las horas de molienda.
- La inclusión de molibdeno aumentó el límite de fluencia en frío, dando un mejor resultado las muestras con 5%v Mo<sub>2</sub>C. A diferencia del tiempo de molienda, que al ser mayor, produjo una disminución en el límite de fluencia.
- Al igual que la compresión en frío, la inclusión de molibdeno aumentó el límite de fluencia en caliente. Además a mayor tiempo de molienda aumentó el límite de fluencia.
- La resistencia al creep de las aleaciones Cu-Mo, fue mayor que la del cobre puro. Las muestras con 5%v Mo<sub>2</sub>C presentaron un mejor comportamiento en creep que las muestras con 2,5%v Mo<sub>2</sub>C en todos los casos. Con respecto al tiempo de molienda no es clara su influencia sobre el comportamiento en creep. Junto con esto el esfuerzo aparente  $n$ , no reflejó una tendencia clara de los mecanismo de creep con respecto a la cantidad de Mo total o en solución sólida y/o formando carburos.

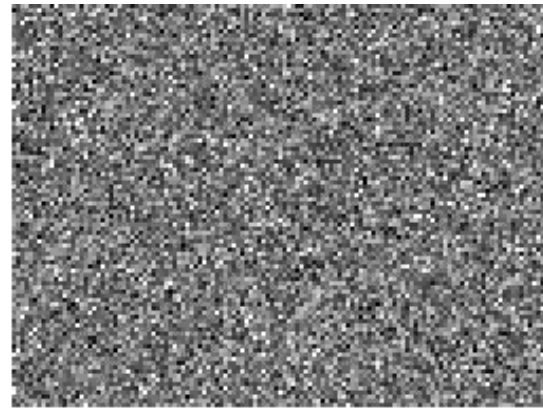
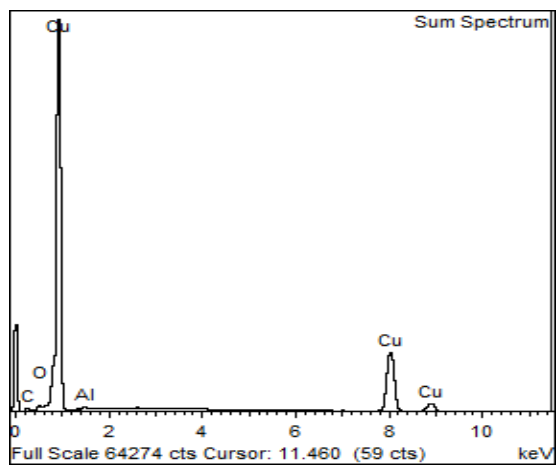
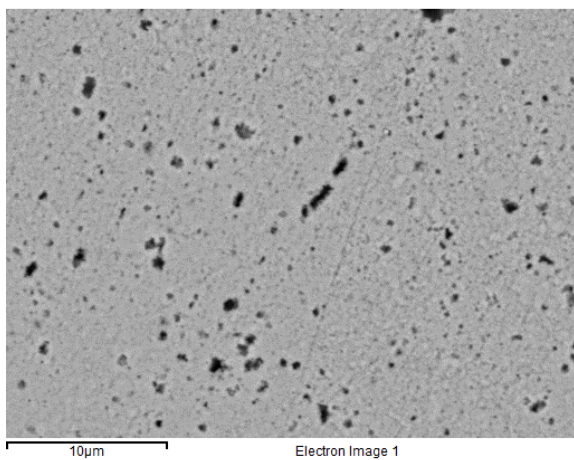
## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rodrigo H. Palma, Aquiles H. Sepúlveda, Rodrigo A. Espinoza, Roberto C. Montiglio, "Performance of Cu-TiC alloy electrodes Developer by reaction milling for electrical-resistance welding", *Journal of Materiales Processing Technology*, 169,2005, pp.62-66.
- [2] I. Anzel, A. Kneissl, L. Kosec. *Metallkd.* vol 90, pp. 621-635.
- [3] Li Lu Man On Lai, "Mechanical alloying", Kluwer academic publishers, 1998.
- [4] Cristián Egaña. Estudio de la evolución de la microestructura y dureza de aleaciones Cu-Ti y Cu- Ti-V durante su fabricación por molienda reactiva y extrusión. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile. Marzo 2008.
- [5] R. Espinoza, R. Palma, A. Sepúlveda, V. Fuenzalida, G. Solórzano, A. Craievich, D. Smith, T. Fujita, M. López. Microstructural characterization of dispersion-strengthened Cu-Ti-Al alloys obtained by reaction milling, *Materials Science and Engineering A* (2007), pp. 454-455.
- [6] C. Suryanarayana. Mechanical Alloying and milling. *Progress Materials Science* vol. 46 (2001), pp.1-184
- [7] W. Hayden, W Moffat, J Wulff, "Propiedades Mecánicas", Editorial Limusa-Valley S.A, 2<sup>da</sup> edición, 1968.
- [8] M. Ashby, D. Jones. *Engineering Materials 1: An Introduction to their Properties and Applications*, Segunda Edición, Editorial BH. Capítulos 17, 18 y 19.
- [9] C. Suryanarayana. Mechanical Alloying and milling. *Progress Materials Science* vol. 46 (2001), pp. 1-184.
- [10] Z. Zang, F. Zhou, and E.J. Lavernia. On the analysis of grain size in bulk nanocrystalline materials via x-ray diffraction. *Metallurgical and Materials transactions A*, 34A, june 2003.
- [11] Carlo Nawrath. Resistencia mecánica de aleaciones de Cu-Mo-C obtenidas por molienda reactiva. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile. 2015

## **9 ANEXOS**

## Anexo A

### Resultados completos SEM y EDS aleación Cu 0%v Mo<sub>2</sub>C 30 horas



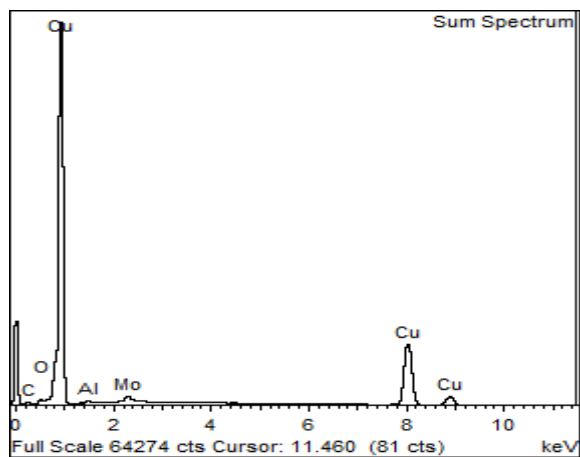
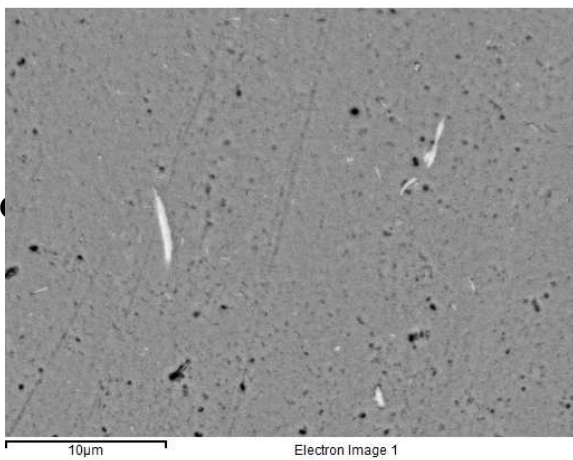
Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Cu	Total
Sum Spectrum	Yes	3.86	1.73	0.56	93.85	100.00
Spectrum 2	Yes	6.07	1.30	0.44	92.19	100.00
Spectrum 3	Yes	4.33	3.39	1.64	90.64	100.00
Mean		4.75	2.14	0.88	92.23	100.00
Std. deviation		1.17	1.10	0.66	1.61	
Max.		6.07	3.39	1.64	93.85	
Min.		3.86	1.30	0.44	90.64	

All results in weight%

## Anexo B

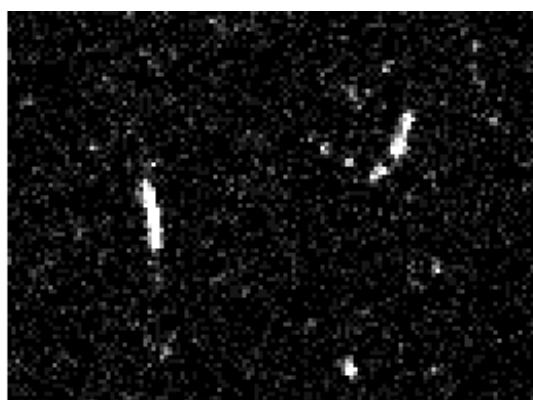
### Resultados completos SEM y EDS aleación Cu 2,5%v Mo2C 100 horas



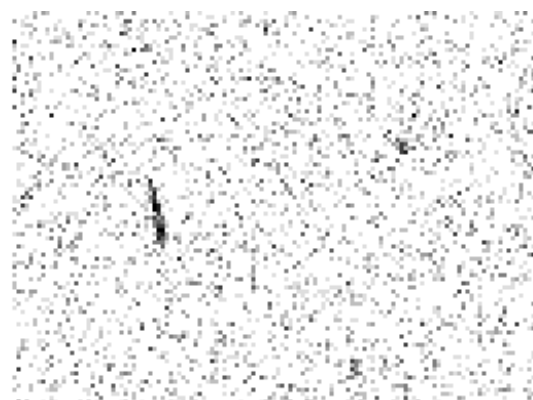
C Ka1\_2



O Ka1



Mo La1



Cu Ka1

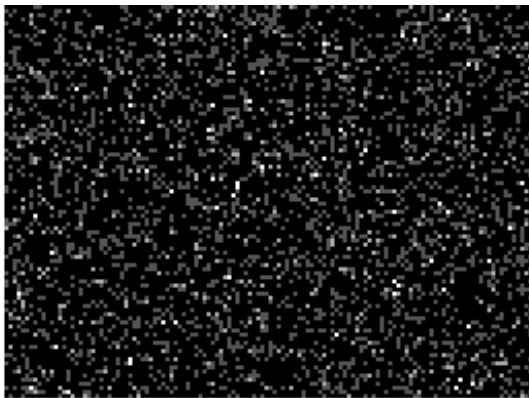
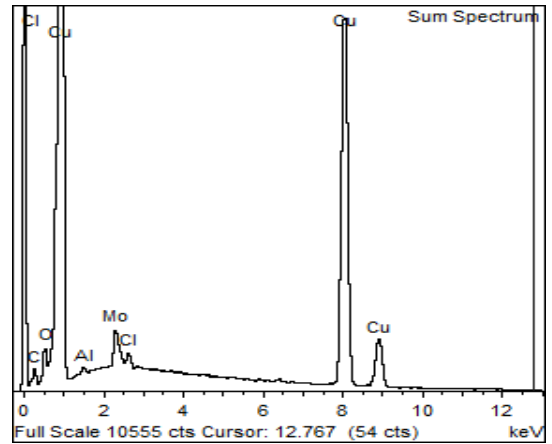
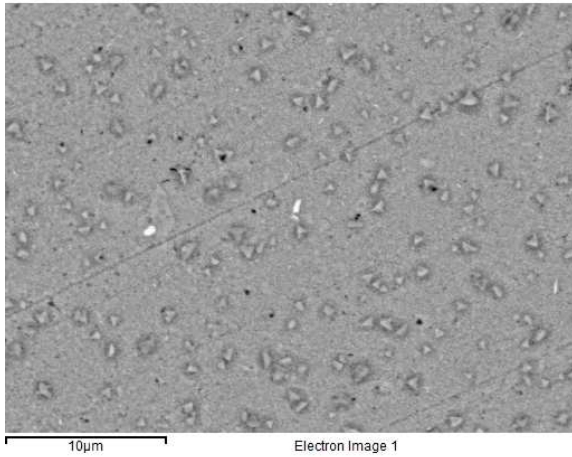
Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Cu	Mo	Total
Sum Spectrum	Yes	4.83	1.45	0.38	90.27	3.08	100.00
Spectrum 2	Yes	8.76	1.45	0.06	14.19	75.54	100.00
Spectrum 3	Yes	4.53	1.56	0.61	92.64	0.66	100.00
Spectrum 4	Yes	22.81	1.18	0.15	65.30	10.56	100.00
Mean		10.23	1.41	0.30	65.60	22.46	100.00
Std. deviation		8.60	0.16	0.25	36.44	35.64	
Max.		22.81	1.56	0.61	92.64	75.54	
Min.		4.53	1.18	0.06	14.19	0.66	

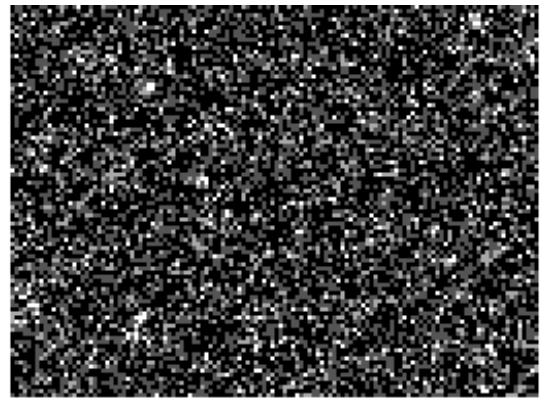
All results in weight%

## Anexo C

### Resultados completos SEM y EDS aleación Cu 2,5%v Mo2C 150 horas



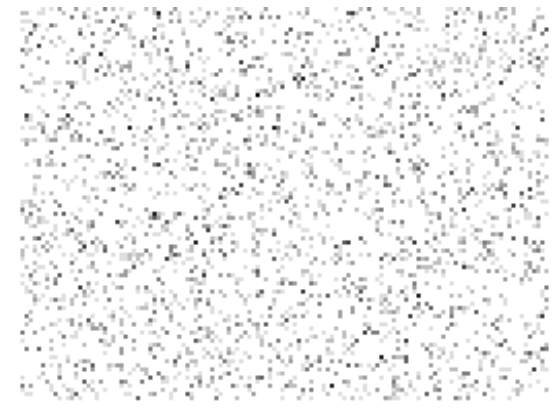
C Ka1\_2



O Ka1



Mo La1



Cu Ka1



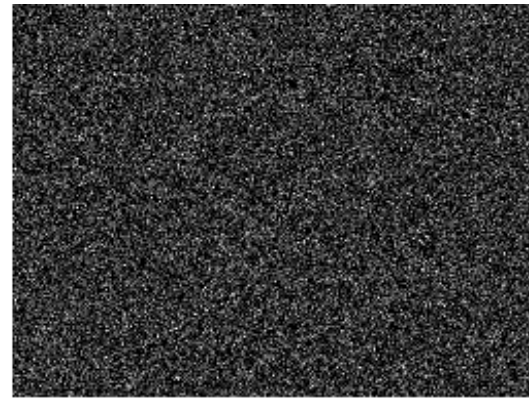
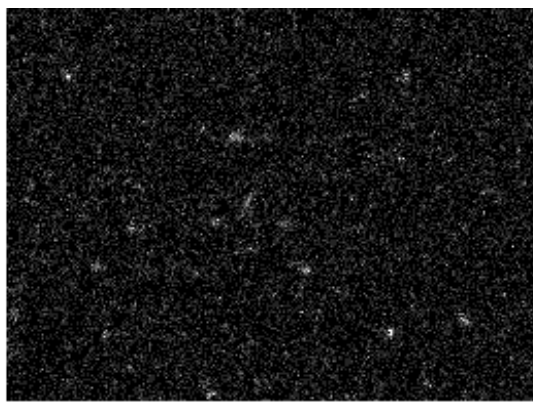
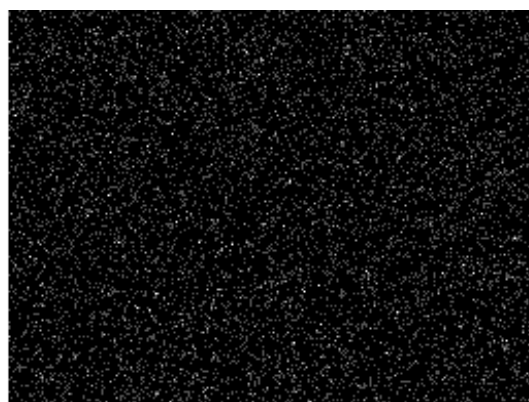
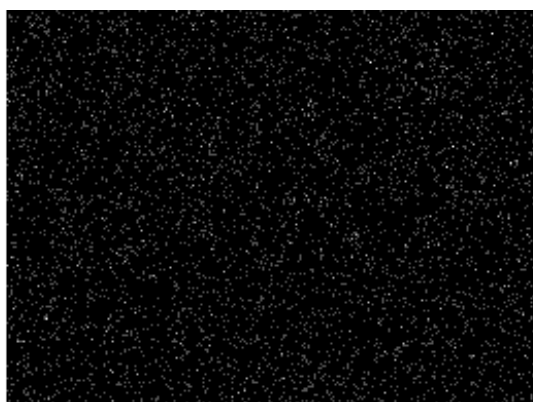
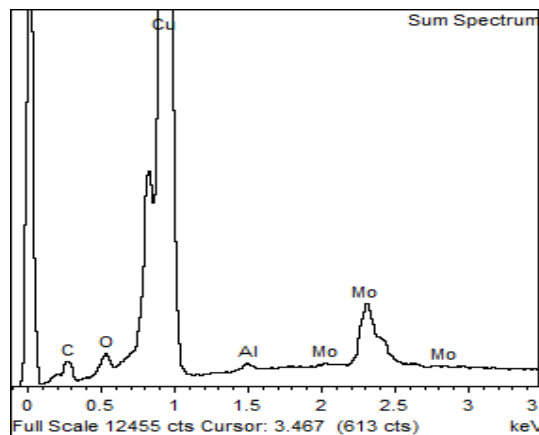
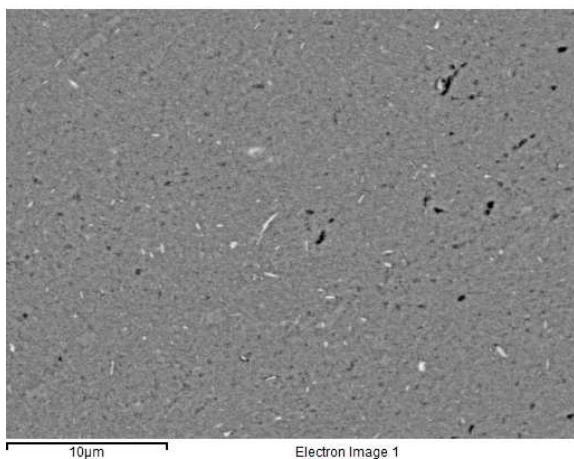
Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Cl	Cu	Mo	Total
Sum Spectrum	Yes	4.93	2.02	0.22	0.51	89.33	2.98	100.00
Spectrum 2	Yes	9.07	1.45	0.13	0.08	86.18	3.09	100.00
Spectrum 3	Yes	8.38	1.95	0.08	0.18	48.13	41.29	100.00
Mean		7.46	1.81	0.14	0.26	74.55	15.79	100.00
Std. deviation		2.22	0.31	0.07	0.23	22.93	22.09	
Max.		9.07	2.02	0.22	0.51	89.33	41.29	
Min.		4.93	1.45	0.08	0.08	48.13	2.98	

All results in weight%

## Anexo D

### Resultados completos SEM y EDS aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 100 horas



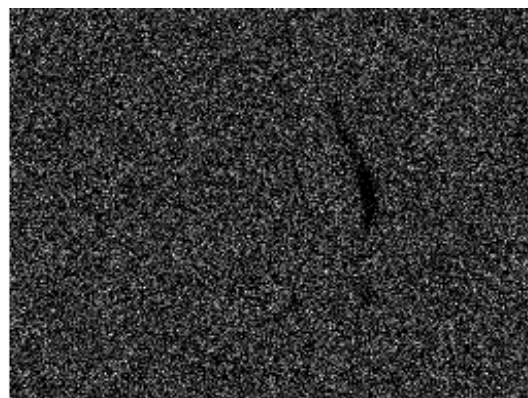
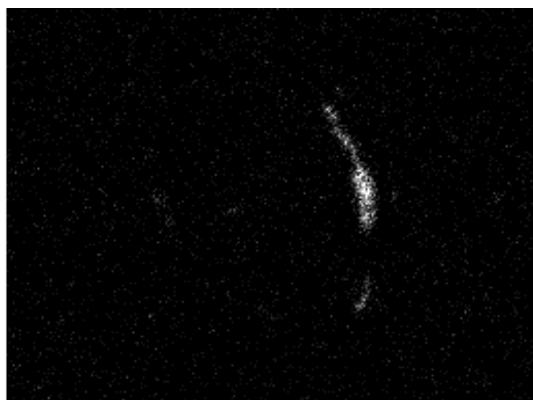
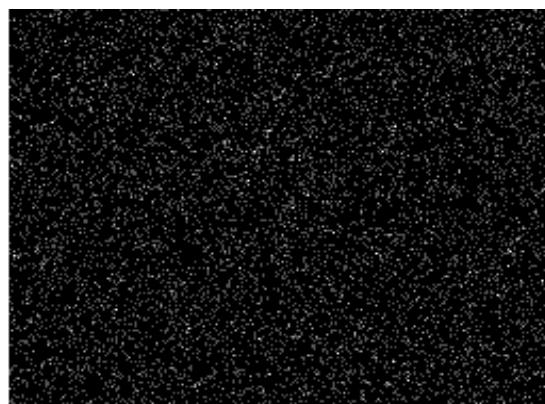
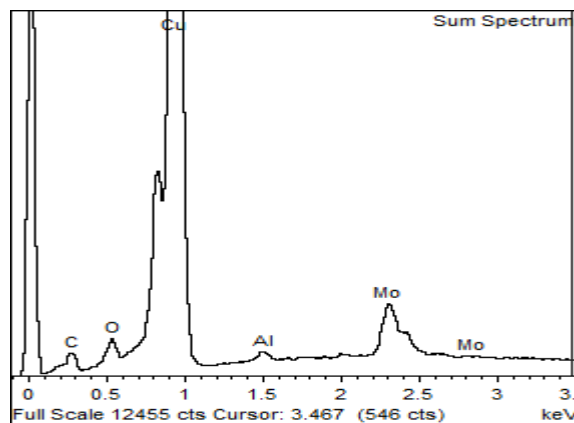
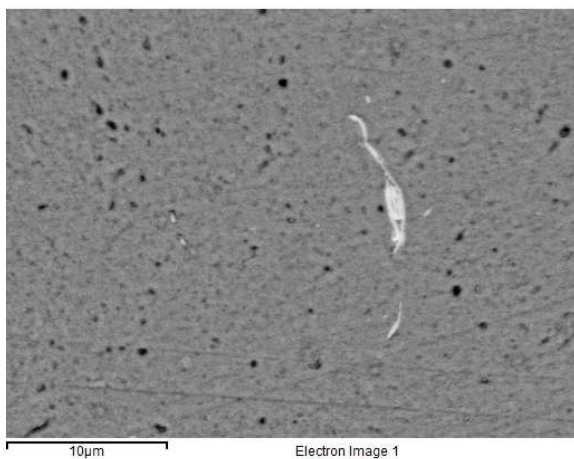
Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Cu	Mo	Total
Sum Spectrum	Yes	6.55	1.68	0.28	85.41	6.08	100.00
Spectrum 2	Yes	14.09	1.44	0.14	71.63	12.70	100.00
Spectrum 3	Yes	9.12	1.39	0.15	71.40	17.94	100.00
Mean		9.92	1.51	0.19	76.15	12.24	100.00
Std. deviation		3.83	0.16	0.08	8.02	5.94	
Max.		14.09	1.68	0.28	85.41	17.94	
Min.		6.55	1.39	0.14	71.40	6.08	

All results in weight%

## Anexo E

### Resultados completo SEM y EDS aleación Cu 5%v Mo<sub>2</sub>C 150 horas



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Cu	Mo	Total
Sum Spectrum	Yes	5.96	2.13	0.44	86.05	5.43	100.00
Spectrum 2	Yes	6.01	2.20	0.18	21.33	70.28	100.00
Spectrum 3	Yes	8.44	2.42	0.54	83.18	5.43	100.00
Spectrum 4	Yes	9.34	2.48	0.63	81.36	6.19	100.00
Mean		7.44	2.31	0.44	67.98	21.83	100.00
Std. deviation		1.72	0.17	0.19	31.16	32.30	
Max.		9.34	2.48	0.63	86.05	70.28	
Min.		5.96	2.13	0.18	21.33	5.43	

All results in weight%