



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES
Y METALURGIA**

**COMPACTACIÓN EN CALIENTE DE POLVO
DE ZINALCO^{MR}**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
ING. EN CIENCIA DE LOS MATERIALES

P R E S E N T A:

DANIEL GARCÍA ORIBE

**ASESORES: DRA. ANA MARÍA BOLARÍN MIRÓ
DR. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR**

DEDICATORIA

A Jesucristo mi Dios. que siempre va y está conmigo.

A mi héroe, mi amigo, mi ejemplo a seguir, a quién todo lo da sin pedir nada a cambio, para quién su familia lo es todo, el que siempre da la respuesta correcta, quién sabe charlar y jugar, él que es: sincero, discreto y firme pero a la vez flexible y comprensivo, a quién respeta y se hace respetar, quién además de órdenes transmite valores y amor, a quién le debo todo, al Sr. Juan L. García Bautista, gracias por ser mi padre.

A la persona que ha sabido ser mi amiga, quién siempre está en disposición de escuchar, de quien siempre recibo un sabio consejo, a quien sabe darme paz, a quien me da la fuerza y la grandeza que me impulsa a salir adelante, a quien amo como ama el amor a mi madre la Sra. Marcela Oribe Olmos.

El verdadero paraíso no está en el cielo, sino al lado de ustedes dos, gracias por estar siempre para mí.

AGRADECIMIENTOS

A Jesucristo, quién me acompaña día con día a dónde quiera que voy, y me ha dado una vida llena de bendiciones. Gracias por dármelo todo.

A mis cuatro abuelos que dejaron una profunda huella en mí, la cual quedara hasta más allá de la muerte.

A mi padre, por enseñarme que el secreto de la felicidad radica en no esforzarse por el placer, sino en encontrar el placer en el esfuerzo.

A mi madre, por enseñarme que las cualidades que hacen a un hombre exitoso son: la fe en la verdad y la confianza en uno mismo.

A la Dra. Ana Maria Bolarín Miró y a el Dr. Félix Sánchez de Jesús, por compartir conmigo sus conocimientos y por su gran ayuda para llevar a cabo este proyecto.

Al Dr. Gabriel Torres Villaseñor por su apoyo incondicional en el desarrollo experimental de esta tesis

A los sinodales de esta tesis, por enriquecer mí trabajo con sus sabias y oportunas correcciones.

A mis hermanos Alberto y Claudia, por lograr la armonía perfecta con su risa, y la belleza de su alma. Ocupan un lugar especial en mi corazón.

A mis sobrinos Alberto y Daniela, porque me han llenado de alegrías.

Porque no me gustaría omitir a ninguna persona, agradezco a todas aquellas que compartieron sus conocimientos conmigo, a todo el cuerpo docente y administrativo del Área Académica de Materiales y Metalurgia de la U.A.E.H. y a todos mis amigos y amigas, que hicieron de mi estancia en esta casa de estudios lo mas placentera posible. Mil gracias a todos.

Hago así extenso mi agradecimiento a toda mi amorosa familia.

Un agradecimiento especial se merece la Ing. Erika Espiricueta, estudiante de Maestría del Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, así como su asesora de tesis, la Dra. Elizabeth E. Martínez, por su gran contribución en la caracterización de los compactos, sin la cual no habría sido posible el término de esta tesis de licenciatura.

Cabe destacar que ambas tesis se han venido desarrollando en el marco de colaboración establecido entre el Área Académica de Materiales y Metalurgia de la Universidad Autónoma de Hidalgo y el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, por lo tanto se han compartido las experiencias y resultados, lo cual ha favorecido el éxito de las tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	IV
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	VII
CAPITULO I ANTECEDENTES	1

CAPITULO II DESCRIPCIÓN TEÓRICA

2.1 Zn-Al-Cu, una aleación mexicana.....	6
2.2 La metalurgia de polvos.....	9
2.2.1 Definición.....	9
2.2.2 Descripción de las etapas que constituyen a la metalurgia de polvos.....	9
2.2.3 Ventajas y desventajas.....	22
2.2.4 Aplicaciones.....	23
2.3 Compactación de polvos.....	24
2.3.1 Compactación en frío “cold compaction”.....	25
2.3.2 Compactación en caliente “warm compaction”.....	27

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Materiales de Partida.....	30
3.2 Instrumentos y Equipos.....	30
3.2.1 Obtención y caracterización del polvo.....	31
3.2.2 Compactación del polvo.....	36
3.2.3 Caracterización de compactos.....	37
3.3 Ensayos.....	41
3.3.1 Diseño experimental.....	41
3.3.2 Obtención y caracterización del polvo.....	42
3.4 Compactación del polvo.....	44
3.4.1. Compactación en frío.....	45
3.2. Compactación en caliente.....	46
3.4.3 Caracterización de los Compactos.....	47

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1.1 Morfología.....	48
4.1.2 Tamaño de partícula.....	50
4.1.3 Composición química.....	51
4.1.4 Estructura Cristalina.....	51
4.1.5 Microestructura.....	52
4.1.6 Composición química superficial.....	55
4.2 Caracterización de los compactos de Zinalco ^{MR}	59

4.2.1 Efecto de la temperatura sobre la compresibilidad.	59
4.2.2 Efecto de la Temperatura sobre la porosidad.	62
4.2.3 Efecto de la Temperatura sobre la microestructura.	65
4.2.4 Efecto de la temperatura sobre la dureza.	66
4.2.5 Efecto de la temperatura sobre la resistencia mecánica en ensayo de compresión.	67

CONCLUSIONES.....	74
PROBLEMÁTICA PENDIENTE	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Etapas del proceso pulvimetalurgico	10
Fig. 2.2 Posibles formas de polvos y su descripción. [11].	11
Fig. 2.3 Molino de bolas. [10].....	12
Fig. 2.4 Disposición de cribas verticalmente [12].....	15
Fig. 2.5 Etapas del sinterizado. [19].....	20
Fig. 2.6 Usos de la metalurgia de polvos (M/P) [24].	24
Fig. 2.7 Etapas de la compactación [15].	26
Fig. 3.1 Balanza digital.....	31
Fig. 3.2 Molino de bolas.	31
Fig. 3.3 Medio de molienda.....	31
Fig. 3.4 Rotap.....	32
Fig. 3.5 Mezclador tipo V.	32
Fig. 3.6 Microscopio electrónico de barrido.	33
Fig. 3.7 Analizador de tamaños de partícula.....	34
Fig. 3.8 Dispositivo de espectroscopia de plasma por acoplamiento	34
Fig. 3.9 Difractómetro de rayos x.	35
Fig. 3.10 Prensa hidráulica.	36
Fig. 3.11 Matriz y punzones superior e inferior.	37
Fig. 3.12 Pirómetro digital.	37
Fig. 3.13 Desbastadora.....	38
Fig. 3.14 Pulidora.....	38
Fig.3.15 Microscopio Óptico.....	39
Fig.3.16 Micro durometro.	39
Fig. 3.17 Máquina Universal.	40
Fig. 3.18 Diseño experimental.	41

Fig. 3.19 Diagrama de flujo del procedimiento de obtención de polvo de Zinalco ^{MR} a partir de lingotes de esta composición.....	42
Fig. 3.20 Compactacion en frio.	45
Fig. 3.21 Compactación en caliente.....	46
Fig. 4.1. Morfología del polvo de Zinalco ^{MR} obtenido a diferentes aumentos	49
Fig. 4.3. Patrón de difracción del polvo de Zinalco ^{MR} molido por 6 horas.	52
Fig. 4.4. Microestructura de los polvos de Zinalco ^{MR} obtenidos mediante molienda mecánica, a diferentes aumentos.....	53
Fig. 4.5. Ampliación de la figura 4.4, con el fin de observar las fases y su morfología.	54
Fig. 4.6. Diagrama de equilibrio del sistema Zn-Al [31].	55
Fig.4.7. Espectro EDS de la zona bifásica (perlítica).....	56
Fig. 4.8 Espectro EDS de la zona monofásica, blanca (MEB-EDS). ..	57
Fig. 4.9. Espectro EDS de la zona superficial (MEB-EDS).	57
Fig. 4.10. Aspecto superficial de una partícula de Zinalco ^{MR} . Se señala con un círculo la zona donde se realizó el análisis superficial.....	58
Fig. 4.11. Compresibilidad en función de la Temperatura de compactación (a) 25°C, b) 100°C, (c) 150°C y (d) 250°	59
Fig. 4.12. Gráfico comparativo de la compresibilidad en función de la Temperatura de compactación, desde 25 °C hasta 250 °C.....	61
Fig. 4.13. Gráfico comparativo de densidad frente a la Temperatura en función de la presión, 480 hasta 1200 MPa.....	62
Fig. 4.14. Efecto de la Temperatura sobre la porosidad superficial, desde 25 °C hasta 250 °C.	63

Fig. 4.15. Micrografías que muestran el aspecto superficial de los compactos en función de la temperatura de compactación, prensadas a 960 MPa de Presión.....	64
Fig. 4.16. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido que muestran la microestructura de los compactos obtenidos a diferentes temperaturas.	65
Fig.4.17. Efecto de la temperatura y presión sobre la dureza, HVN...	67
Fig. 4.18. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 25°C a diferentes presiones.....	69
Fig. 4.19. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 100°C a diferentes presiones.....	69
Fig. 4.20. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 150°C a diferentes presiones.....	70
Fig. 4.21. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 200°C a diferentes presiones.....	70
Fig. 4.22. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 250°C a diferentes presiones.....	71
Fig. 4.23. Efecto de la presión y temperatura de compactación sobre el esfuerzo máximo a ruptura.	72
Fig. 4.24. Micrografía de un compacto prensado a 250°C y 720 MPa, en el que se pueden ver la presencia de grietas superficiales.	73

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I.- PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO ^{MR}	6
TABLA II.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL ZINALCO ^{MR}	7
TABLA III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ZINALCO ^{MR}	30
TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO DE MOLIENDA	43
(BOLAS DE ACERO ENDURECIDO).....	43
TABLA V ANÁLISIS DEL POLVO DE PARTIDA	44
TABLA VI. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPACTOS.....	47
TABLA VII. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POLVOS OBTENIDOS (GENERAL).....	51
TABLA VIII. COMPOSICIÓN QUÍMICA PUNTUAL EN LA SUPERFICIE DE LA PARTÍCULA (3).....	58

RESUMEN

En esta tesis, se examina el efecto de variables tales como presión y temperatura empleadas durante el proceso de compactación uniaxial, sobre compactos de polvo de la aleación Zinalco^{MR} (Zn-21Al-2Cu) sin el empleo de una sinterización posterior.

En primer lugar se obtuvo polvo de Zinalco^{MR} mediante molienda mecánica, cuya distribución de tamaños de partícula mostró un diámetro medio inferior a 90 micrómetros, una morfología irregular, estructura cristalina bifásica $\beta+\eta$ y una microestructura perlítica con una pequeña proporción de fase proeutectoide.

Se obtuvieron probetas del polvo de Zinalco^{MR}, estas se consiguieron mediante compactación uniaxial modificando la temperatura: 25, 100, 150, 200 y 250 °C y la presión, en el rango entre 240 a 1200 MPa. Los compactos en verde (sin sinterizar) se caracterizaron microestructural, química y mecánicamente, concluyendo que la temperatura de compactación no genera modificaciones en la estructura cristalina y composición química, pero si afecta notablemente en todas sus propiedades mecánicas y físicas, tales como la compresibilidad (incidiendo sobre la proporción y morfología de los poros), microdureza, resistencia y comportamiento frente a la compresión así como la densidad del compacto.

Los resultados muestran que conforme se incrementa la temperatura y la presión es notable una disminución en la porosidad y un incremento en densidad en los compactos (mejora la compresibilidad del polvo). Aunado a lo anterior, mejoran en general las propiedades mecánicas, justificable como una consecuencia de la disminución en la porosidad, que actúa como exaltador de esfuerzos en los materiales. Este efecto de mejora de las propiedades mecánicas, es menos relevante después de 150 °C, es decir después de esta temperatura se requieren de una mayor cantidad de energía calorífica y de mayores presiones para que los incrementos sean del mismo orden.

Por lo tanto los parámetros de temperatura y presión de compactación para obtener densidades cercanas a la densidad ideal de la aleación oscilan entre 150 °C y 1200 MPa. Confirmando con esto la hipótesis planteada al inicio de esta tesis, en la que se exponía la posible obtención de compactos con densidades similares a la densidad del macizo de la aleación sin necesidad de un sinterizado posterior, lo cual hace mas eficiente el proceso de obtención de compacto P/M base Zinalco^{MR}.

INTRODUCCIÓN

La aleación ternaria conocida como el Zinalco^{MR}, constituida químicamente por 21% Al, 2% Cu y 77% Zn (proporciones en peso) cuenta con propiedades interesantes para su aplicabilidad, tales como elevada resistencia a la corrosión en atmósfera y medios acuosos, bajo peso específico respecto al acero y elevada resistencia mecánica (similar a la del acero estructural). Lo anterior aunado a su bajo costo, tanto del material como en los requerimientos energéticos en su procesamiento, hace que este material pueda ser sustituto del hierro, aluminio, latón y bronce [4].

Este último material, bronce, ya fue substituido con éxito por el Zinalco^{MR} a nivel industrial, gracias al perfeccionamiento de nuevas válvulas para el control de fluidos (gas), desarrolladas por la empresa FALMEX en 1987. Este producto fue sacado del mercado cuando la empresa IUSA en 1994 adquirió el control sobre esta patente y decidió no producir válvulas de este material [1]. Sin embargo a fines del 2005, la exclusividad de la empresa IUSA sobre este material terminó, lo cual abre nuevas posibilidades para la industrialización y comercialización del Zinalco^{MR}.

Es por lo anterior que se considera de vital importancia la caracterización de este material para un mejor aprovechamiento de sus capacidades. Motivo por el cual este proyecto de investigación está enfocado a conocer un poco más de esta excelente y muy poco explotada aleación, cuando es conformada mediante metalurgia de polvos convencional.

En años pasados se han desarrollado una serie de estudios basados en la obtención de compuestos de matriz de Zinalco^{MR}, empleando como técnica de conformado la metalurgia de polvos. Esos trabajos revelan la existencia de

problemas durante el proceso de sinterización, asociados a la presencia de una capa de óxidos e hidróxidos superficiales en las partículas de Zinalco^{MR}, que dificultan e incluso inhiben la difusión durante la sinterización.

Es por ello, que en el presente trabajo se pretende profundizar en el estudio de la compactación en caliente de polvos de Zinalco^{MR}, que es probable que mejore el proceso de consolidación de los polvos, ya que ésta es una técnica empleada en casos en que la difusión está impedida por diferentes motivos.

Por lo cual el objetivo primordial de este trabajo de investigación esta enfocado a:

Obtener y caracterizar compactos de polvo de Zinalco^{MR} elaborados por compactación uniaxial, modificando la temperatura desde 25°C hasta 250°C, con el fin de evaluar como afecta esta variable sobre las propiedades del compacto en verde (sin sinterizar). Así como también:

1. Obtener y caracterizar polvos de Zinalco^{MR} mediante molienda mecánica.
2. Obtener y caracterizar compactos de polvos de Zinalco^{MR} en función de la temperatura de compactación.
3. Encontrar relaciones empíricas entre la temperatura de compactación y las propiedades de los compactos en verde.

La forma de abordar este trabajo es como sigue: el capítulo I está dedicado a la descripción de los antecedentes que motivaron a la realización de esta investigación, y que a su vez justifica que se desarrolle.

El capítulo II está encauzado a la descripción de los principios teóricos que sostienen la elaboración del proyecto de investigación.

La descripción de los instrumentos y equipos así como la metodología experimental empleada en el desarrollo de esta tesis son definidos en el Capítulo III.

Los resultados obtenidos durante la experimentación así como también la discusión de los mismos, se presentan en el Capítulo IV. Y finalmente se presentan las conclusiones pertinentes.

CAPITULO I. ANTECEDENTES

Observar en un mundo que nadie ve a simple vista, aquello que compone la materia que nos rodea, estudiar sus propiedades y utilizarlas en la estructuración de nuevas combinaciones de la materia con mayores aplicaciones y ventajas es una ciencia que aún no encuentra muchos espacios de desarrollo en México.

Y es que la ciencia de materiales, como tal, cuenta con un desarrollo de no más de 30 años en nuestro país, refiere Gabriel Torres (México DF, 1944) [2], uno de los investigadores que se inició en esta área cuando ni siquiera era considerada como tal. Asimismo, el investigador se entregó al estudio de metales que se producían en México, como el cobre, zinc, bismuto y plomo, con el fin de fomentar el uso de los recursos naturales del país.

Torres [2], integrante del Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM, conquistó su propósito al utilizar materia prima nacional para lograr un mejor producto: el Zinalco^{MR}, una aleación de zinc y aluminio que mejoraba las características que presentaban cada uno de los elementos por separado. Los estudios se iniciaron alrededor de 1973, en el Instituto de Investigaciones en Materiales, con el objetivo de contribuir al conocimiento de estas materias primas nacionales, en virtud de que empezaban a presentarse señales de debilitamiento en cuanto a su uso, por efecto de la sustitución que se estaba realizando en todo el mundo con aluminio y plásticos. Al final la aleación Zinalco^{MR} represento un logro de vinculación tecnológica después de años de investigación y cooperación entre empresas e instituciones, encabezadas por el Instituto de Investigación en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Grupo FALMEX-GALVOTEC.

El Zinalco^{MR} es una aleación desarrollada a partir de una aleación eutectoide Zn-21Al, modificada con 2 a 3% de cobre. Esta aleación tiene muchas ventajas debido a su alta resistencia mecánica, buena maquinabilidad y dureza, buena resistencia a la corrosión, bajo punto de fusión y algo no menos importante, muy económica [1].

Esta aleación posee la resistencia a la corrosión del zinc, y es menos pesado que el hierro, resistente como el acero estructural y con un precio muy accesible. El Zinalco^{MR} tiene alta resistencia a la corrosión atmosférica, por lo que es útil también para cualquier configuración arquitectónica y estructural.

La obtención del Zinalco^{MR} y su trabajo de investigación en el área de los metales le valió a Gabriel Torres reconocimientos como el premio Manuel Noriega Morales, otorgado por la OEA; el Premio Universidad Nacional, el Premio Condomex-UNAM al mejor curriculum y el Premio Nacional de Ciencias y Artes 1992, Innovación tecnológica, entre otros.

De acuerdo con Torres Villaseñor [2], este material puede sustituir a otros como la fundición gris, el aluminio, el bronce o el latón, con el que, por ejemplo se hacen llaves, e incluso otros materiales y aleaciones que se podrían utilizar para carrocerías de coches. Y aunque a partir del Zinalco^{MR} surgieron patentes y acuerdos de transferencia de tecnología, su implementación en el mercado no se extendió. "Insertar un material nuevo a la industria en lugares como Estados Unidos tarda unos 15 años en promedio, pero en nuestro país, en general, a los industriales les da miedo tener una mentalidad innovadora, y a su vez, la estructura económica no es suficientemente fuerte para correr el riesgo" [1].

Numerosos autores han estudiado esta aleación por su interés tecnológico [4], sobre todo en su conformado mediante técnicas convencionales tales como: fundición, forja y procesos de corte, sin embargo han sido contados los trabajos

empleando técnicas de metalurgia de polvos entre ellos se puede mencionar brevemente los siguientes:

E. Mendoza [5] evaluó la producción de compactos sinterizados de Zinalco (Zn-21Al-2Cu) usando técnicas de metalurgia de polvos, a partir de: (1) mezclas de polvos elementales de los constituyentes de dicha aleación en las proporciones adecuadas y (2) polvos de Zinalco^{MR} aleados, obtenidos mediante molienda mecánica. Los polvos se compactaron a una presión de 600 Mpa y después sinterizados en diferentes condiciones de temperatura, tiempo y atmósfera.

Los resultados mostraron que es posible obtener Zinalco^{MR} a partir de polvo elemental, pero con muy baja eficiencia.

Paralelamente, en este trabajo se denota la dificultad en la sinterización de polvo de Zinalco^{MR}, asociado a la presencia de una capa de óxidos e hidróxidos de los metales involucrados (Zn y Al), que dificultan el proceso de difusión en estado sólido. A pesar de los problemas, se mostró que un aumento en la temperatura, atmósfera reductora e incrementos en tiempo promueven el proceso de sinterización o difusión en estado sólido.

H. Islas [6] en este trabajo de tesis llevo a cabo la obtención, mediante metalurgia de polvos, y caracterización de compuestos de matriz metálica (CMM) base Zinalco^{MR} empleando partículas cerámicas de: carburo de silicio, alúmina y carburo de tungsteno como elementos de refuerzo.

Para la fabricación de estos materiales se llevó a cabo el proceso experimental descrito brevemente a continuación.

Obtención de polvos de Zinalco^{MR}, con tamaños de partícula inferiores a 200 μm , mediante molienda mecánica debido a que este producto no se consigue comercialmente.

Proceso de mezclado, con la finalidad de distribuir homogéneamente las partículas de cada uno de los polvos de: SiC, WC, Al₂O₃, incorporados en cantidades de: 7, 14 y 21% en peso a la matriz de Zinalco^{MR}.

Prensado de las mezclas obtenidas en el punto anterior. Esto se llevo a cabo mediante compactación convencional uníaxial con prensa hidráulica hasta un valor máximo de presión de 1.300 GPa.

Sinterización de los compactos obtenidos en el punto tres. Las condiciones de sinterización fueron: atmósfera de aire, 300 °C durante 20 horas.

Los compactos en verde y los sinterizados fueron caracterizados. En los casos de las partículas de WC y Al₂O₃ se presentó un incremento en la porosidad conforme se aumenta la cantidad de partículas de refuerzo, a excepción de los compactos con los contenidos de SiC, donde se obtuvo una buena distribución de las partículas en la matriz.

Los valores de dureza se ven incrementados para los casos del SiC y el WC pero para el caso de la alumina estos disminuyen. Por otro lado, la resistencia mecánica, tanto el esfuerzo de cedencia como el esfuerzo máximo, que soportaron los CMM, tuvieron sus mejores valores para el caso del 7% de alúmina incorporada”.

Ma. Teresa Martínez [8], caracterizó compuestos de matriz metálica, producidos mediante M/P utilizando como matriz la aleación Zn – 21% Al – 2% Cu y como partículas de refuerzo el íter metálico δ Cu41 Sn11 y estudio la variación de la resistencia a la compresión y la dureza Rockwell B, en función del contenido de refuerzo para diferentes condiciones de tratamiento térmico.Dando como resultado lo siguiente:

Bajo condiciones de extrusión a temperatura de 300°C y cantidades de refuerzo superiores a 10% surgen problemas atribuibles a las reacciones que sufren las partículas de refuerzo descritas anteriormente.

La disminución en la temperatura de extrusión en todos los materiales provoca una modificación en la micro estructura de la aleación base en los materiales compuestos que produce la disminución en las propiedades de dureza y resistencia a la compresión.

Concluyendo que la variación en las propiedades de dureza y resistencia mecánica dependen de la morfología de las fases de la matriz y de la reacción en la interfase matriz – refuerzo.

V. Hugo Brocado [7], por medio de técnicas de metalurgia de polvos y extrusión en caliente se produjeron materiales compuestos, utilizando como matriz la aleación Zn – 21% Al – 2% Cu (% en peso) y como refuerzo tres diferentes contenidos (5, 10 y 20% en peso) del compuesto inter metálico γ_2 del sistema Cu – Al, y éstos se compararon contra la aleación base.

Mediante técnicas de microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X, analizó la micro estructura, las transformaciones de fase y el efecto de los tratamientos térmicos. Así mismo, determinó la dureza, la densidad y la resistencia mecánica en compresión. De los resultados obtenidos, observó que la dureza de los materiales se incrementó con la cantidad de refuerzo añadido a la matriz y los materiales normalizados presentaron valores de esfuerzo máximo más altos que los de los materiales templados y envejecidos, ya que la micro estructura laminar observada en los materiales normalizados ofreció mayor resistencia mecánica que la micro estructura granular que tenían los materiales templados y envejecidos.

CAPITULO II. DESCRIPCIÓN TEÓRICA.

2.1 Zn-Al-Cu, una aleación mexicana.

El Zinalco^{MR} debe ubicarse dentro de la categoría de los denominados *nuevos materiales*. Sus capacidades y características de desarrollo son las propias de un *material de diseño*.

Por lo cual cabe señalar que el bajo punto de fusión de esta aleación en comparación con el del aluminio, latón, bronce o hierro de fundición permite ahorros considerables de energía.

En este sentido el Zinalco^{MR} casi funde con el doble de rapidez que el aluminio y tres veces más rápido que el bronce con suministros de energía similares.

Por otro lado la densidad de la aleación, la coloca en una posición intermedia entre el acero y el aluminio, comparativamente es 18% más ligera que el Zamak, la cual es la aleación más conocida del zinc, 30% mas ligera que el latón. Su coeficiente de expansión térmica es muy similar al del aluminio. Este coeficiente tiene importancia, en el caso de perfiles para ventanas o fundición de precisión.

Propiedades.

En las tablas I y II se engloban algunas de las propiedades mecánicas y físicas del Zinalco^{MR}

TABLA I.- PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO^{MR}.

PROPIEDAD	FUNDICION EN ARENA	INYECCION	EXTRUSIÓN	LAMINADO
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	270-290
Esfuerzo de cedencia (MPa)	280-300	290-310	280-320	300-310
Deformación máxima (%)	3-5	8-10	30-35	80-100
Dureza RB	50-55	60-65	40-55	25-30

TABLA II.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL ZINALCO^{MR}.

PROPIEDAD	VALOR NUMERICO
<i>Temperatura de fusión</i>	421°C-481°C
<i>Densidad</i>	5.41g/cm ³
<i>Modulo elástico</i>	110-130Gpa
<i>Conductividad eléctrica</i>	37% de Cu
<i>Conductividad térmica</i>	37% de Cu
<i>Coefficiente de expansión térmica</i>	25 micrómetros/mm ⁰ K
<i>Color</i>	Blanco grisáceo

Impactos económicos de la innovación.

Lo primero que puede decirse respecto a los aspectos económicos del Zinalco^{MR} como innovación es que nunca se tuvieron claros ni el potencial económico ni los alcances productivos.

Puede pensarse que inicialmente se buscaba dar solución a un problema identificado a un nivel macroeconómico, que era la cada vez menor utilización de los metales nacionales y su eventual sustitución (por los plásticos principalmente). Sin embargo, más que un impulso económico es posible que fueran razones de justificación social las que se tuvieron en mente al inicio del desarrollo de la innovación. Después de esta etapa inicial de solución a un problema, se fue desarrollando otra de mayor conocimiento de las implicaciones económicas de la innovación y sus aplicaciones, que se centra en las posibles ventajas en la reducción de costos.

Efectivamente, parece ser que la identificación de las ventajas en la reducción de costos fue un proceso bien diferenciado, que no se tenía contemplado más que a grandes rasgos cuando se pensaba en resolver el problema de las crecientes importaciones de aluminio y el uso reducido de las materias primas nacionales.

Esta identificación se aprecia como el resultado de una serie de investigaciones específicas que no se podían realizar únicamente a nivel del laboratorio y que tenían que esperar los resultados del comportamiento del material (Zinalco^{MR}) en pruebas industriales.

En las pruebas industriales se fueron identificando al menos algunas reducciones en costos de producción y procesos con Zinalco^{MR}:

- Menor consumo de materia prima (con este material se pueden producir piezas con tolerancias muy altas sin necesidad de maquinados posteriores).
- Menor gasto de energía.
- Utilización de moldes menos costosos.
- Menores costos por procesos adicionales (anticorrosivos, soldaduras, pintura).

Posibles aplicaciones industriales del Zinalco^{MR}.

Debido a que el Zinalco^{MR} es un material que posee una temperatura de fusión baja en un intervalo de 421 a 481°C, y con buenas propiedades como la alta resistencia mecánica (380-410 MPa), muy cercana a la resistencia del acero de bajo contenido en carbono(462 MPa para el acero AISI 1010), menor densidad respecto al acero, con buena resistencia a la corrosión atmosférica similar a la del aluminio y adicionalmente debido a que posee características de superplasticidad es posible procesarlo o conformarlo aplicando grandes niveles de deformación por técnicas como: extrusión, forja, laminación, y metalurgia de polvos, tema principal de este proyecto de investigación.

En resumen las posibles aplicaciones de este material sólo se ven limitadas por industrias, oligopólicas y monopólicas que no permiten la industrialización y comercialización de un material de diseño como lo es el Zinalco^{MR}. Ya que los intereses propios de estas industrias se verían afectados con la llegada al mercado de productos elaborados con materiales de los cuales ellos no tienen control.

Y es que las aplicaciones del Zinalco^{MR} van mas allá de válvulas de control de fluidos como la realizada gracias a la vinculación de la UNAM y el grupo FALMEX-GALVOTEC como ya se mencionò anteriormente. Barras producidas con este material podrían aplicarse para la fabricación de tornillos resistentes a la corrosión, así como láminas en estado superplástico podrían innovar la forma de producir carrocerías para automóviles.

2.2 La metalurgia de polvos.

La metalurgia de polvos es una técnica de conformado de materiales que se remonta a la antigüedad en la cual se utilizaba para recubrir algunas joyas con polvos de metales preciosos o para la fabricación de herramientas utilizando polvo de hierro que data del año 300 A. C [9].

La metalurgia de polvos como técnica de aplicación industrial aparece por primera vez con el científico ruso P. Sobolevsky, en 1827 cuando empleo el prensado, sinterizado y forjado para fabricar monedas de polvo de platino [10].

El atractivo mayor de la pulvimetalurgia (PM) es la habilidad de fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y alta calidad. En la PM se utilizan polvos metálicos con ciertas características como tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear una figura de alta dureza y precisión [8].

El proceso puede ser automatizado con un relativamente bajo consumo de energía, alto porcentaje de utilización de materias primas y bajo costo de manufactura o mano de obra.

Esta técnica es flexible y capaz de emplear un amplio rango de materiales y proporcionar un gran número de micro estructuras y propiedades.

2.2.1 Definición.

La metalurgia de polvos es el estudio del tratamiento de polvos metálicos, incluyendo su fabricación, caracterización, y conversión de dichos polvos metálicos en componentes útiles de ingeniería [10].

Es decir la metalurgia de polvos es el arte y ciencia de producir polvo metálico y de utilizarlo para la producción de materiales macizos y formar objetos [10].

2.2.2 Descripción de las etapas que constituyen a la metalurgia de polvos.

En el diagrama mostrado en la Fig. 2.1 se muestran de modo esquemático las etapas mas relevantes en el proceso pulvimetalúrgico el cual consiste en procesar el metal para obtener el polvo metálico, las técnicas empleadas para tal efecto dependerán de las características que se deseen suministrar al polvo

final. Subsecuentemente el polvo es mezclado para que ostente una mejor homogeneidad y al ser compactado promueva compactos con pequeños gradientes de densidad lo que conllevara a una mejor resistencia de los compactos y posiblemente a una mejor sinterización de los mismos.

Las operaciones pos sinterizado se emplean para mejorar las propiedades internas y superficiales del producto final.

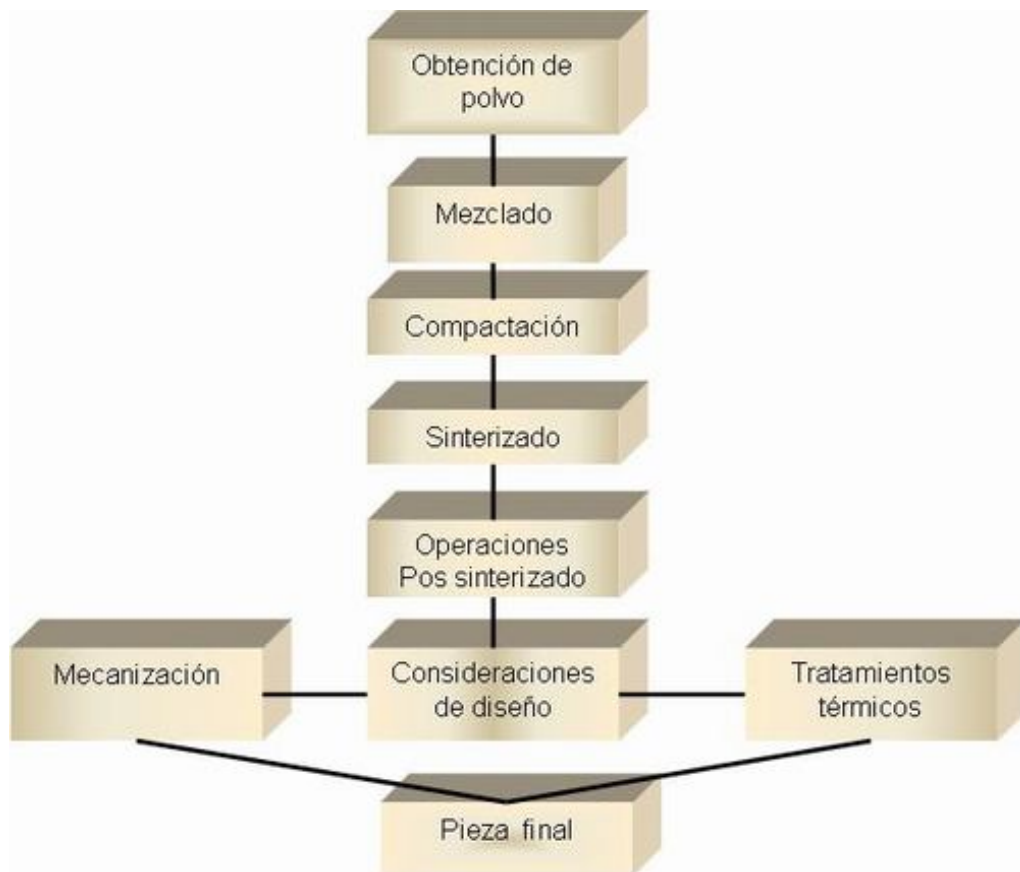


Fig. 2.1 Etapas del proceso pulvimetalúrgico

a).- Métodos de obtención de polvos metálicos.

En los últimos tiempos, se han desarrollado y perfeccionado nuevos métodos de producción de diversos elementos mecánicos que, por la complejidad de sus geometrías o características de sus aleantes, no se habían podido fabricar mediante los procesos convencionales. Tal es el caso de los procesos pulvimetalurgicos (PM). El éxito en un proceso pulvimetalurgico depende en gran medida de las propiedades físicas y químicas de los polvos metálicos empleados, tanto en partícula individual como en conjunto o masa. [7]

Las propiedades físicas del polvo metálico final se ven fuertemente influenciadas por el tamaño de partícula, distribución de tamaño de partícula, forma, microestructura y condición superficial del polvo. [7]. Que dependerán del método utilizado para la fabricación del polvo ya que existen diversas técnicas de elaboración del mismo, entre las más importantes se encuentran: atomización, electrolisis, procesamiento químico y la molienda mecánica, entre otras. Cada técnica produce polvos con características especiales. En la Fig. 2.2 se muestran las posibles formas de polvos y su descripción.








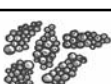






a).Esféricas		b).- Gota	
c).- Cilíndrica		d).- ligamental	
e).- Irregular		f).- Esponjosa	
g).Dendrita		h).- Agregados	
i).—cúbico		j).- Acicular	
k).- Hojuela		i).- Pologonal	
m).-Erizo		n).- Angular	

Fig. 2.2 Posibles formas de polvos y su descripción. [11].

b).-Molienda mecánica.

Existen cuatro procesos fundamentales de molienda mecánica: impactación, rozamiento, cizallamiento y compresión.

La impactación implica un proceso rápido instantáneo, golpeando el material causando rompimiento y resultando en reducción de tamaño. El rozamiento aplica la reducción en el tamaño de partícula por medio de un movimiento de fricción. El cizallamiento forma un tipo de hendidura o fractura por corte. Los polvos formados por cizalladura son gruesos y a menudo no se encuentran en la metalurgia de polvos a no ser que el material sea extremadamente duro. Finalmente las fuerzas de compresión pueden romper un material convirtiéndolo en polvo grueso, si este es lo suficiente quebradizo o frágil. En muchos casos se pueden dar combinaciones de procesos de impactación, rozamiento, cizallamiento y compresión para formar polvo metálico. La molienda por impacto mecánico es recomendable para polvos en el rango de medida de 1 a 10 μ m.

Molienda por impacto mecánico.

La molienda por impacto mecánico usa bolas duras y es muy útil para la fabricación de polvos de materiales quebradizos. Esta técnica de molienda, consiste en un recipiente cilíndrico lleno con bolas y el material a ser molido. Semejante al de la figura 2.3

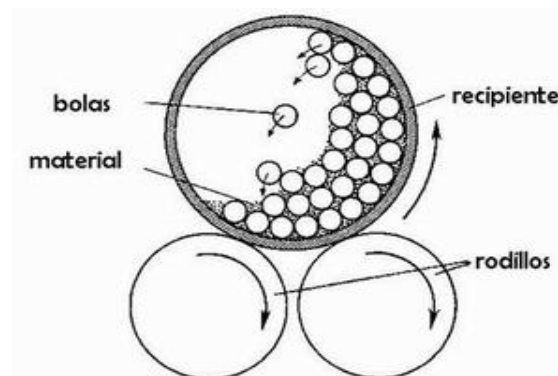


Fig. 2.3 Molino de bolas. [10]

Debido al giro del recipiente, las bolas colisionan constantemente con el material convirtiéndolo en polvo. La fuerza de presión T requerida para fracturar un material quebradizo en el molino esta relacionada con los defectos estructurales y a la sensibilidad de propagación de la grieta según la ecuación 2.1.

$$\sigma = \left(2 * Er / D \right)^{1/2} \quad [2.1].$$

Donde E es el modulo elástico, r es el defecto o radio de la punta de la grieta existente, y D es la medida de la partícula. Por consiguiente las partículas grandes requieren menor fuerza de impacto para fracturar. A medida que el tamaño de partícula disminuye durante la molienda, la fuerza requerida para continuar reduciendo la dimensión de la partícula se incrementa.

Realizar moliendas prolongadas es menos productivo. Existe una relación simple, ecuación 2.2, para estimar la energía relativa requerida para moler un polvo. Comenzando desde una medida inicial de partícula de D_i , la energía W requerida para obtener una medida final de partícula D_f es estima por la siguiente formula empírica:

$$W = g \left(D_f^{-a} - D_i^{-a} \right) \quad [2.2].$$

Con g siendo una constante, que depende del material, las bolas, diseño del molino y la operación del molino. El exponente a adquiere valores entre 1 y 2. La energía requerida para reducir un polvo a medidas pequeñas varía con el cambio relativo en la medida de la partícula. De este modo el tiempo de molienda depende del polvo disponible, el cambio de medida de la partícula, el tamaño medio de partícula que se quiera obtener y la velocidad de giro del molino. La molienda mecánica usualmente no es usada para algunos metales dúctiles ya que estos no son fáciles de fracturar. Debido a que las partículas dúctiles soldan en frío entre si, dando una baja eficiencia al proceso, con frecuencia en rangos de 1 al 3%. Ya que los materiales quebradizos son más sensibles a la fractura es apropiado realizar moliendas sobre los óxidos previamente a la reducción.

Con cierta frecuencia se usan fluidos o atmósferas protectoras para reducir la oxidación y ayudar a la molienda. Por otro lado dos de las principales fuentes de pérdidas de la energía suministrada durante la molienda son el ruido y el calor generado durante el proceso. Cabe señalar que en general los polvos metálicos formados por molienda sufren trabajo en frío, son irregulares y exhiben baja fluencia y características de empaquetamiento malas [10].

c).- Clasificación y mezclado de polvos.

Las diversas técnicas de producción de polvos generalmente producen un rango de distribución de tamaños de partícula y este incluye tamaños que en muchas ocasiones no son deseables para la aplicación final del polvo, por este motivo se llevan a cabo procesos de clasificación o separación para ajustar la distribución de tamaños de partícula en un rango apropiado. Por otro lado y como una etapa previa a la compactación o consolidación de los polvos se realiza el proceso de mezclado, cuyas funciones principales son homogeneizar la distribución de tamaños de partícula en todo el polvo y en el caso de la producción de aleaciones partiendo de polvos elementales, distribuir las partículas de los elementos de aleación requeridos en el producto final y adicionalmente para incorporar los lubricantes que sirven para reducir la fricción interpartícula y con las paredes de los moldes.

A continuación se describen las formas más usuales de clasificación y homogenización de polvos.

Tamizado.

El cribado o tamizado a máquina se usa casi universalmente, ya que el cribado manual es largo y tedioso y su exactitud depende en gran parte del operador.

Las cribas seleccionadas para la prueba se colocan en forma de columna, o nidada, con la criba de aperturas más grandes en la parte superior y la más fina en el fondo. Un depósito receptor cerrado se coloca debajo de la criba del fondo para recibir las partículas finales de menor tamaño y se coloca una tapadera sobre la parte superior de la criba más gruesa para evitar el escape de la muestra.

El material que se va a ensayar se coloca en la criba superior, mas burda y entonces el juego de cribas se coloca en un sacudidor de cribas que vibra el material en un plano vertical y, en algunos modelos, en plano horizontal.



Fig. 2.4 Disposición de cribas verticalmente [12].

Durante el sacudimiento, el material de menor tamaño cae a través de las cribas sucesivas hasta que es retenido sobre una criba que tiene aberturas que son ligeramente más pequeñas que el diámetro de las partículas. En esta forma la muestra se separa en varias fracciones de tamaño como se esquematiza en la figura 2.4.

Después del tiempo necesario, el conjunto de cribas se separa y se pesa la cantidad de material retenido en cada una de las cribas. La mayor parte de las partículas de malla próxima, que bloquean las aberturas, se pueden quitar invirtiendo la criba y golpeando suavemente el armazón. Cuando esto falla, se pasa suavemente una brocha de alambre de bronce suave o de nylon por el lado opuesto de la tela. El cegamiento constituye un problema que se agrava mientras más fina sea la apertura; en tal sentido la limpieza, aun con brocha de pelo suave, tiende a distorsionar las mallas de las cribas de aperturas menores a 150 μ m. Por lo cual es recomendable limpiarlas con un aparato de ultrasonido. [12].

Series de tamices o cribas.

Existen diversas series que incluyen la nomenclatura para clasificar los tamaños de apertura de las mallas de los tamices, las más empleadas se encuentran las que a continuación se mencionan:

- **Serie de tamices U.S.**

- **Serie Tyler.**

- **Serie británica estándar.**

d).-Mezclado.

El mezclado es una operación que tiene como propósito principal la eliminación de segregación de los polvos y la incorporación de un lubricante cuya función primordial es la reducción de la fricción que existe entre el polvo metálico y la superficie de las herramientas (paredes de la matriz; punzón de compactación, etc.).

De igual manera es importante la lubricación para facilitar la extracción del compacto, minimizando la tendencia a que se fracture. Entre los lubricantes más empleados se encuentran:

- **Ácido esteárico.**
- **Estearina.**
- **Estearatos metálicos.**
- **Estearato de zinc.**
- **Compuestos orgánicos como las ceras naturales.**

La adecuada selección del lubricante es primordial ya que una mala selección puede afectar desfavorablemente a la resistencia en verde a si como también a la resistencia mecánica del producto sinterizado [5].

e).-Compactación de polvos.

La compactación es una operación crítica del proceso pulvimetalúrgico ya que la forma final y las propiedades mecánicas son determinadas en este proceso, debido a que el grado de homogeneidad de la densidad del compacto se ve afectado después de ser prensado (en verde) [14].

La compactación de polvos tiene como principales objetivos:

- a).- Consolidación de polvo en cualquier forma deseada.
- b).- Proporciona un alto grado de precisión dimensional. Con la consideración de que algunas dimensiones cambian después de la sinterización.
- c).- Provee la posibilidad de obtener diferentes niveles de porosidad y tipos de porosidad.
- d).- Aporta adecuada resistencia al polvo compactado (en verde) para subsiguientes manipulaciones.

El segundo y tercer factor no son precisamente lo mismo. Las reacciones químicas o metalúrgicas durante el sinterizado pueden efectuar cambios en las dimensiones o la densidad en diferentes grados o niveles de uniformidad, por lo tanto la compactación sería considerada como un proceso que proporciona un significativo control y manipulación de cada uno de estos factores, por separado. Adicionalmente para algunas aplicaciones es conveniente considerar a la porosidad como algo deseable respecto al nivel de densidad.

La compactación puede ser usada para controlar selectivamente el grado de porosidad y por lo tanto es muy eficaz para alcanzar propiedades específicas de ingeniería. Además es factible producir una parte en la que el grado de porosidad (o densidad) no sea uniforme intencionalmente [15].

Para poder efectuar el proceso de compactación existen diversos métodos entre los cuales se encuentran [15]:

A. Técnicas que aplican presión:

- En dado.
- Isostática.
- Conformado a alta energía.
- Forja.
- Extrusión.
- Vibratoria.
- Continua.

B. Técnicas “sin aplicación de presión”(de presión baja):

- Vaciado de suspensiones
- Por gravedad
- Continua

f).-Sinterizado.

Este método de producción de estructuras metálicas se ha hecho cada vez mas importante en los últimos años y es particularmente útil cuando existe una gran diferencia en los puntos de fusión de los metales, que han de alearse o cuando un metal tiene un punto de fusión extremadamente alto y es difícil y costoso fundirlo en escala comercial [16].

Este proceso consiste en calentar un compacto prensado en frío a una temperatura lo suficientemente elevada para cambiar su naturaleza en forma sobresaliente. El compacto original, que era débil y desmenuzable, se transforma en un cuerpo mucho mas fuerte, aumenta en densidad y las partículas vecinas se unen acrecentando el tamaño de grano. Si la temperatura es suficientemente elevada y el tiempo adecuadamente largo, el compactado puede acercarse a la densidad máxima característica de su composición [17].

La sinterización se usa también para producir una distribución uniforme de algún constituyente insoluble en la estructura metálica. En las llamadas chumaceras sin aceite, se comprime grafito pulverizado con cobre pulverizado y estaño para formar una chumacera de bronce que es, como resultado final, impregnada con grafito [16].

Entre las principales formas de sinterizado se encuentran:

El sinterizado en fase sólida.

Es uno de los métodos mas comunes. En este la parte compactada verde o briqueta, debe sinterizarse en un horno o atmósfera cuidadosamente controlada durante ½ a 2 horas al 60-80% de la temperatura de fusión del constituyente de menor punto de fusión [18].

La sinterización en fase líquida.

Se realiza a temperaturas más altas del punto de fusión de uno de los constituyentes de la aleación o a temperaturas más altas que el punto de fusión de una aleación que se forme durante la sinterización [18].

A pesar del extenso trabajo experimental y teórico sobre los aspectos fundamentales del sinterizado, todavía hay mucho del proceso que no se entiende. El proceso de sinterizado empieza con el enlace entre las partículas conforme el material se calienta. El enlace incluye la difusión de átomos donde hay contacto íntimo entre partículas adyacentes que dan lugar al desarrollo de fronteras de grano. Esta etapa origina un incremento en resistencia y dureza relativamente grande, aun después de breves exposiciones a elevada temperatura. Durante la siguiente etapa, las áreas de enlace recientemente formadas llamadas "cuellos", crecen en tamaño, seguidas por un redondamiento de los poros. Esto se muestra esquemáticamente en la figura 2.5, en términos de un modelo de tres esferas. La última etapa es el encogimiento y la eventual disminución del poro. Esta etapa rara vez se

completa, ya que las temperaturas y los tiempos necesarios son demasiado imprácticos [19].

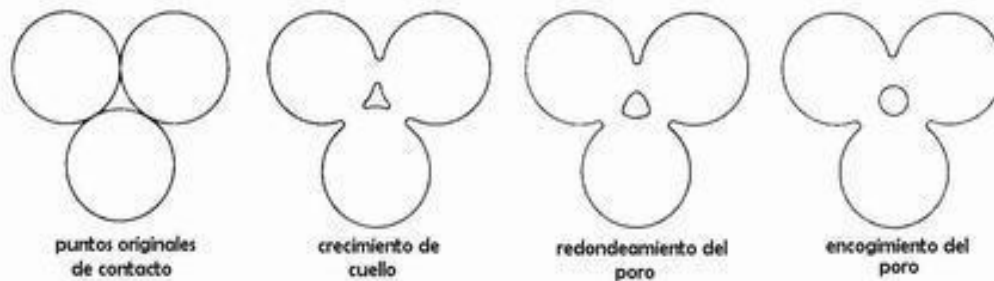


Fig. 2.5 Etapas del sinterizado. [19]

g).- Operaciones pos sinterizado.

Al menos que se requiera mayor precisión en los compactos, las piezas están ahora listas para usar. Para obtener mayor precisión pueden tratarse las piezas en un dado de acuñación para ajustarla a la dimensión requerida. Otras operaciones secundarias incluyen la impregnación de las partes con un material antifricción tal como el grafito o aceite para obtener cojinetes auto lubricado. La densidad y la resistencia de la parte se pueden incrementar infiltrándose por los poros una aleación de menor punto de fusión. Los productos sinterizados también pueden modificarse por maquinado y tratamiento térmico [18].

Maquinado.

A los objetos metálicos producidos por la metalurgia de polvos descrita anteriormente, se les dan las dimensiones finales por medio de técnicas de corte de metales [20]. El maquinado es el proceso de eliminar el exceso de material mediante corte plástico. Los procesos mas comunes de maquinado incluyen el torneado, barrenado, fresado, cepillado y rectificado [21]. Estas técnicas se detallan cuidadosamente en muchos libros y en este texto no trataremos de duplicar esos informes.

La capacidad del labrado a máquina es una función de la facilidad de eliminación del metal y la capacidad para mantener las dimensiones y lograr un

acabado satisfactorio. La capacidad de labrado a máquina es distinto para composiciones diversas y operaciones diferentes de corte. Las herramientas de corte forman tres tipos distintos de virutas: discontinuas, continuas con resultados en los bordes y continuas sin resultados en los bordes. Este último tipo es generalmente el más conveniente desde el punto de vista de la capacidad para el labrado a máquina.

La eficiencia del corte de metales se ve afectada por muchos factores tales como la dureza, la resistencia, la ductilidad, el diseño de las herramientas, el fluido de corte, la temperatura, la micro estructura, la presencia de defectos en el material y los esfuerzos residuales.

Los métodos no mecánicos de corte de metales son: el fresado químico, el labrado a maquina por descarga eléctrica y el electroquímico. El fresado químico involucra la solución química selectiva de un miembro metálico. El labrado a maquina por descarga eléctrica depende de la formación de un arco a través de un material dieléctrico para la eliminación de partículas metálicas. El labrado a maquina electroquímico funciona, en cierto modo a la inversa que la electro deposición, en una solución electrolítica [20].

Tratamientos térmicos.

“El tratamiento térmico es una combinación de calentamiento y enfriamiento en tiempos determinados aplicados a un metal o a una aleación en estado sólido de tal forma que producirá las propiedades deseadas” [22]. Los principales tratamientos térmicos son:

Temple:

Tratamiento térmico en el que una aleación o metal se lleva hasta una temperatura adecuada y al cabo de un tiempo determinado se le da un enfriamiento drástico capaz de fijar las fases meta estables de una aleación.

Recocido:

Consiste en calentar el metal o aleación a la temperatura adecuada y luego se deja enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación, preponderantemente dentro del horno o en un material que sea aislante del calor.

Normalizado:

La normalización es un tratamiento en el que se calienta el material en una región de temperatura adecuada y luego se enfría en aire estático. Los objetivos para los cuales se realiza el proceso de normalización varían en cada caso. Entre ellos se encuentran:

1. Refino de la estructura granular.
2. Incremento de la resistencia (en el acero en comparación con el acero recocido).
3. Reducir la segregación de composiciones en coladas o forjados y mantener así mayor uniformidad estructural.

2.2.3 Ventajas y desventajas.

El proceso de fabricación de piezas metálicas a través de la metalurgia de polvos tiene un 97% de utilización de los materiales de partida, comparando esta técnica con los procesos de conformado de piezas tradicionales, la metalurgia de polvos promueve ahorros de energía debido a su producción de piezas con tolerancias dimensionales estrechas, que contribuyen a evitar maquinados posteriores para obtener la forma última deseada. Sin embargo la forma y el tamaño de las piezas está restringida debido a la capacidad de las prensas disponibles en el mercado, ya que las prensas más grandes no serían capaces de realizar geometrías de gran tamaño.

Alcances.

Los sistemas de metalurgia de polvos son adecuados para producir partes pequeñas a gran escala. Se puede utilizar casi cualquier combinación de

aleaciones para producir componentes de alta temperatura y productos muy duros y muy tenaces tales como herramientas de tungsteno. Aunado a esto es posible producir piezas pequeñas y complicadas a una velocidad hasta tres veces mayor que los métodos convencionales; además los costos del herramental son relativamente bajos.

En algunos casos ciertos productos únicos, que no pueden ser producidos mediante otros métodos, pueden ser fabricados con una gran variedad de combinaciones de metales y no metales.

Limitaciones.

La metalurgia de polvos tiene algunas desventajas, pero muchas de éstas han sido superadas con el uso de métodos nuevos. En general, las piezas de metalurgia de polvos tienen una menor resistencia a la corrosión que los metales macizos, sobre todo si son bastante porosas. Asimismo, las piezas fabricadas mediante el proceso de metalurgia de polvos en general tienen propiedades plásticas (resistencia al impacto, ductilidad y elongación) menos eficientes que los metales convencionales

2.2.4 Aplicaciones.

Las aplicaciones de los componentes de metalurgia de polvos se congregan en dos grupos principales. En el primer grupo se encuentran los componentes que son de difícil manufactura por algún otro método de conformado de piezas, como lo son elementos hechos de tungsteno, molibdeno, y componentes magnéticos elaborados exclusivamente por esta técnica. El segundo grupo esta constituido por componentes de metalurgia de polvos que ofrecen un efectivo costo alternativo a elementos maquinados, fundidos y forjados.

Los dispositivos elaborados mediante metalurgia de polvos son utilizados en su gran mayoría en la industria automovilística. Sin embargo el crecimiento de la pulvimetalurgia durante el último cuarto del siglo pasado, ha sido muy grande, por encima de lo que se había especulado con avances importantes en el área del diseño industrial compitiendo con las tecnologías habituales de conformado

de metales. En la figura 2.6 se esquematizan los usos principales de la metalurgia de polvos (M/P).

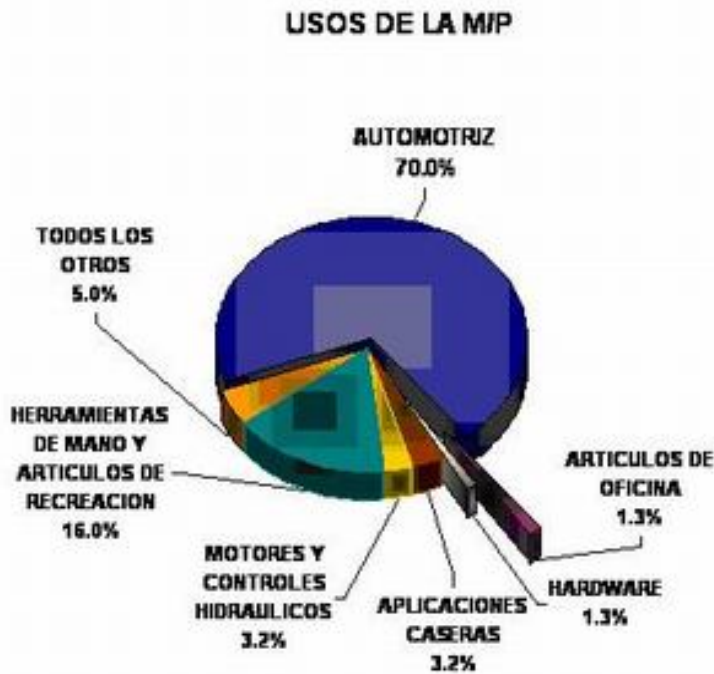


Fig. 2.6 Usos de la metalurgia de polvos (M/P) [24].

Visión a futuro

La producción de elementos en la industria a entrado en tiempos de cambios severos. Concretamente en la fase global de competición en la que se encuentran inmersas todas las empresas, los procesos de producción que ofrezcan mayores ventajas serán los que subsistan en la industria. Lo cual abre grandes oportunidades para el uso y estudio de la pulvimetalurgia.

2.3 Compactación de polvos.

La operación más importante en la metalurgia de polvos es el compactado. La habilidad para obtener una densidad presionada satisfactoria determina a menudo la factibilidad de manufactura de piezas a través de la metalurgia de polvos.

El propósito del compactado es consolidar el polvo en la forma deseada tan cerca de las dimensiones finales como sea posible, teniendo en cuenta cualquier cambio dimensional que resulte del sinterizado; el compactado se ha diseñado también para impartir el nivel y tipo de porosidad deseado y proporcionar una adecuada resistencia para la manipulación [19].

La compactación uniaxial técnica empleada en este trabajo de investigación puede realizarse con polvos fríos o calientes. Esto afectará la densidad del compacto. La densidad del artículo prensado también depende de la forma de la pieza, el tamaño de partícula del polvo, la presión empleada y el tiempo de permanencia dentro del horno de sinterización.

A continuación se describen los rasgos principales de las técnicas de compactado en frío y en caliente utilizadas en este proyecto.

2.3.1 Compactación en frío “cold compaction”.

El compactado uniaxial es el método más ampliamente utilizado. La secuencia usual de operaciones en el compactado uniaxial consiste en llenar la cavidad del troquel con un volumen definido de polvo; la aplicación de la presión requerida mediante el movimiento del punzón superior hacia el inferior; y la expulsión del comprimido verde por el accionar del punzón inferior. La figura 2.7 muestra estas operaciones esquemáticamente. Es importante mencionar que el ciclo de prensado uní axial contribuye para que el polvo adquiera la resistencia necesaria para desempeñar su función como componente ingenieril.

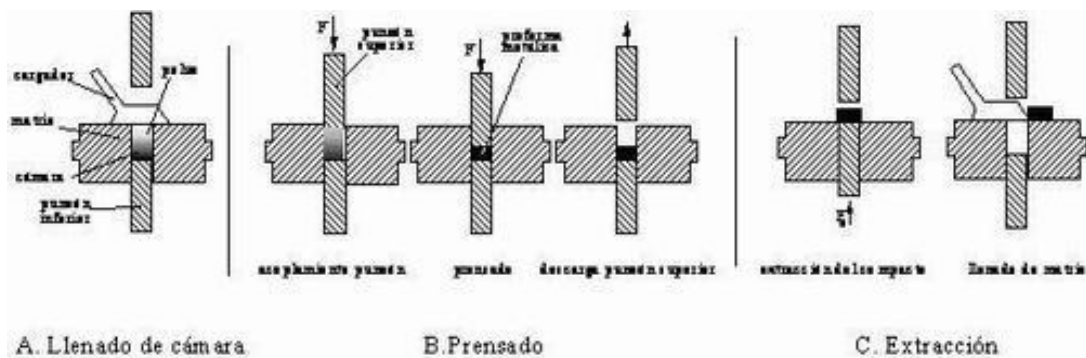


Fig. 2.7 Etapas de la compactación [15].

Las presiones utilizadas comúnmente varían de 19 a 50 ton/in². La presión puede obtenerse por prensas mecánicas o hidráulicas. Las prensas mecánicas están disponibles con variaciones de presión de 10 a 50 ton y velocidades de 6 a 150 golpes min⁻¹. Las características más importantes de las prensas mecánicas son: la rapidez de producción a alta velocidad, flexibilidad en el diseño, simplicidad en el diseño y costos de inversión y mantenimiento relativamente bajos [14].

A menudo se utilizan las prensas mecánicas (excéntricas) en la compactación uní axial de piezas pequeñas. Como regla empírica, la cavidad del troquel debe ser lo suficientemente profunda para contener una cantidad de polvo equivalente a 2 veces al tamaño final de la briqueta. Esta longitud de carrera elimina el uso de algunas prensas mecánicas cuando las dimensiones de las piezas terminadas son muy largas [14].

Sin embargo las prensas hidráulicas se usan cuando es necesario aplicar golpes para la compactación, para la fabricación de partes de gran tamaño y para piezas de metal de polvo más complicadas que requieren mayor presión.

Las prensas hidráulicas pueden desarrollar una fuerza de hasta 5 000 toneladas, a velocidades de golpeo generalmente inferiores de 20 golpes min⁻¹. En general las prensas hidráulicas tienen menores velocidades de operación que las mecánicas, pero para trabajos de golpe corto tales como el reprensado o en la acuñación, se pueden lograr velocidades relativamente altas [14].

Los troqueles se hacen generalmente de aceros para herramienta endurecidos, esmerilados y pulidos. Cuando el polvo que se compactará consiste en partículas duras abrasivas, el troquel se construye generalmente de dos piezas.

Los punzones se hacen de acero para troquel tratado térmicamente a fin de que sean un poco más suaves que el troquel, ya que suelen ser más fáciles de remplazar que el troquel.

2.3.2 Compactación en caliente “warm compaction”.

La industria de la metalurgia de polvos continúa creciendo porque los avances en materiales crudos y procesos de producción de partes permiten la manufactura de componentes con gran complejidad y altos niveles de desempeño.

Sin embargo los usuarios finales de partes de pulvimetalurgia están demandando altos niveles de propiedades mecánicas, disponibles solamente a través de partes con alta densidad. Tradicionalmente los métodos empleados para alcanzar altas densidades incluyen el uso de infiltraciones de cobre, doble compresión y doble sinterización y polvo forjado. Lo cual involucra el uso de procesos secundarios, lo que resulta en costos significativamente elevados y por lo tanto ofrecen, malos ahorros en costos de producción.

El proceso de compactación en caliente es una técnica alternativa en la cual las piezas logran alcanzar densidades y propiedades mecánicas similares a las obtenidas en el proceso de doble compresión/ doble sinterización utilizando un proceso de compresión uniaxial [14].

El proceso de compactación en caliente consiste en aplicar presión y temperatura simultáneamente. Aunado a esto el compactado y sinterizado tienen lugar al mismo tiempo, para tal efecto el proceso incorpora el uso de polvo caliente y herramental caliente en prensas de compactado uniaxial. Lo que ocasiona densidades mayores en las piezas compactadas. La figura 2.8 ilustra esquemáticamente el proceso de compactación en caliente.

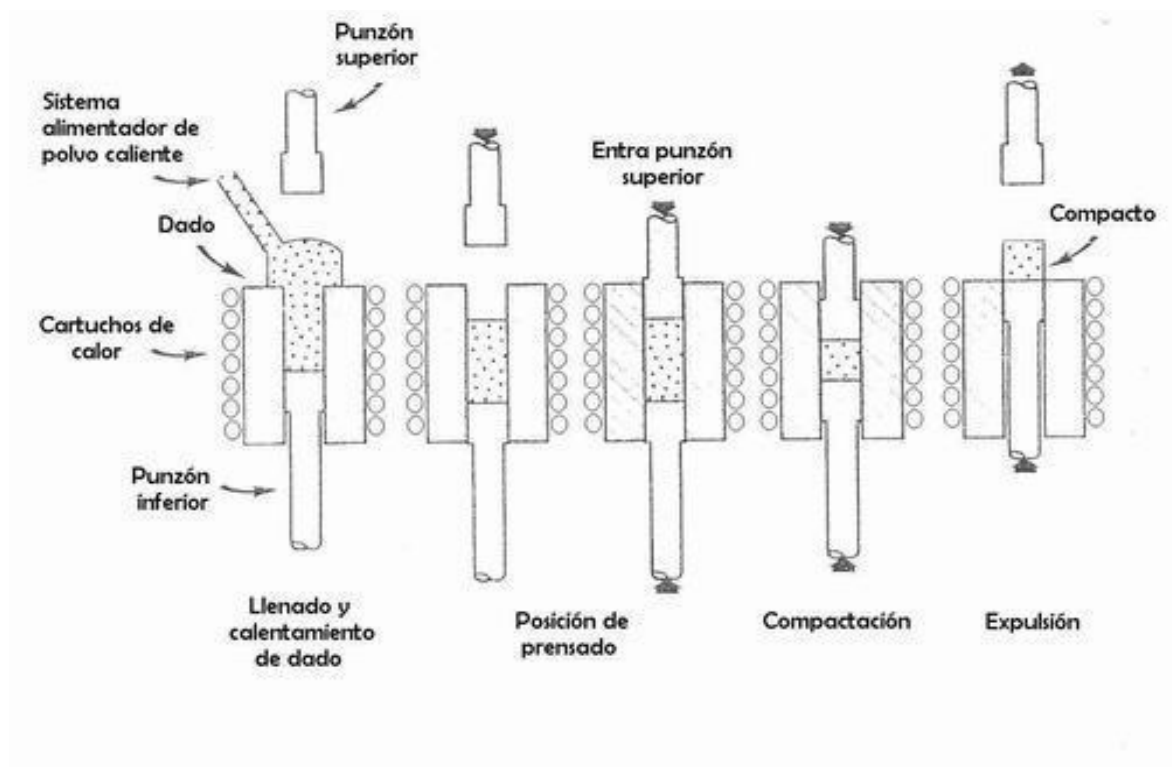


Fig. 2.8 Proceso de compactación en caliente [10].

Aplicaciones exitosas del proceso de compactación en caliente necesitan que el polvo suministrado y el herramental estén calientes a las temperaturas adecuadas para tal efecto. El control de temperatura recomendado para el calentamiento del polvo y del herramental es de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$. El calentamiento del herramental es llevado a cabo usando cartuchos de calor empotrados en el dado.

Las temperaturas de polvo y dados usadas varían, de acuerdo a las propiedades finales que se deseen obtener teniendo en cuenta que por cada incremento en la temperatura de compactación se verá incrementada la densidad en verde.

Actualmente son 3 **sistemas de distribución y calentamiento de polvo** los que se encuentran disponibles en el mercado. Cada sistema es capaz de alimentar y calentar el polvo a la temperatura apropiada [14]. Los tres sistemas de alimentación son:

- “Cincinnati inc. the temp system”.
- “Abbott Furnace Company thermal powder processor”.
- “Slotheater”.

El herramental diseñado para la compactación en caliente es esencialmente el mismo que el herramental para la compactación uniaxial con una tolerancia radial en herramental de 0.01 a 0.02 mm (0.0004 a 0.0008 in) [14].

Sin embargo, el diseño debe ser prudente debido a las diferencias de expansión térmica a las que están sometidos los herramentales. Asumiendo que a medida que la densidad incrementa, la carga en el herramental incrementa rápidamente. Estos incrementos en las presiones del herramental necesitan que los dados sean espesos y con grandes tolerancias para que soporten las grandes deflexiones a las que se ven sometidos.

Porque la compactación en caliente es un proceso de simple compactación y simple sinterizado, el proceso es ideal para piezas de pulvimetalurgia que requieren altas propiedades mecánicas que no pueden ser obtenidas por las densidades alcanzadas en la compactación convencional [14].

Futuras aplicaciones del proceso de compactación en caliente se prevé que exploten la habilidad de alcanzar altas densidades en verde a bajas presiones de compactación [14].

CAPITULO III.

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En este capítulo se describe concisamente el proceso experimental utilizado para la obtención de la materia prima y la elaboración y caracterización de los compactos obtenidos mediante metalurgia de polvos. Así mismo se hace referencia a los instrumentos y dispositivos utilizados durante la realización de este proyecto de investigación.

3.1 Materiales de Partida.

Polvo de partida.

El polvo de Zinalco^{MR} se obtuvo a través de medios mecánicos, generando limaduras de un lingote de dicha aleación suministrado por el Dr. Gabriel Torres Villaseñor (diseñador del Zinalco^{MR}) miembro del instituto de investigaciones de Materiales de la UNAM. En la siguiente tabla se describen las características principales del material de partida.

TABLA III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ZINALCO^{MR}.

Tipo de polvo	Fórmula	Densidad (g/cm ³)	D _{m,50} (μm)	Morfología	Marca
Zinalco ^{MR}	Zn77%Al21%Cu2%	5.41	100	Hojuelas con surcos	Zinalco ^{MR}

3.2 Instrumentos y Equipos.

En el siguiente apartado, se llevará a cabo la descripción general de los instrumentos y equipos utilizados durante el desarrollo experimental; en tres apartados para una mejor comprensión del lector:

- 3.2.1 Obtención y caracterización del polvo.
- 3.2.2 Compactación del polvo.
- 3.2.3 Caracterización de compactos.

3.2.1 Obtención y caracterización del polvo.

1.- Balanza digital.

Balanza marca OHAUS modelo Explorer, con rango de carga de 0 a 150gr con precisión de ± 0.0001 gr. mostrada en la Figura 3.1. Fue empleada en todas las pesadas de polvo durante la experimentación.



Fig. 3.1 Balanza digital.

2.- Molino y medio de molienda.

Molino de bolas vertical marca US STONEWARE modelo MAHWAH. NJ 07430. Con numero de serie CE – 88148 mostrado en la figura 3.2 equipado con un recipiente plástico de volumen 1065 ml., y como medio de molienda bolas de acero endurecidas con un diámetro de: 1/2, 3/4, 1/8, 1/4 pulgadas. Todo lo anterior se esquematiza en la figura 3.3



Fig. 3.2 Molino de bolas



Fig. 3.3 Medio de molienda.

3.- Rotap.

Marca Ro –Tap modelo RX – 29 con número de serie 8000 mostrado en la figura 3.4. Proveído con mallas o tamices marca W.S. TYLER, INCORPORATED con número de malla 32 y malla 170 mostradas en la misma figura.



Fig. 3.4 Rotap.

4.- Mezclador tipo V.

Se empleó un mezclador con forma de “V”, como el ejemplificado en la Figura 3.5, utilizado para homogenizar la distribución de las partículas de polvo de Zinalco^{MR}.

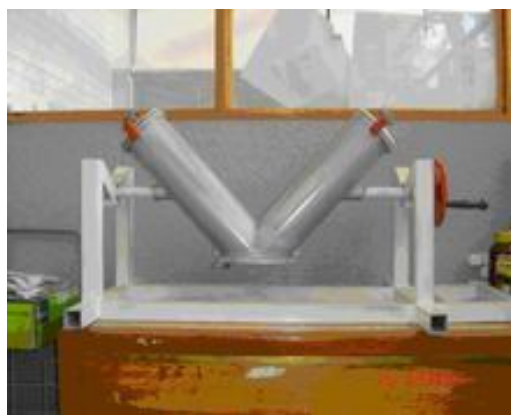


Fig. 3.5 Mezclador tipo V.

5.- Microscopio electrónico de barrido.

Unidad marca JEOL, modelo JSM 6300, equipado con cámara fotográfica y videoimpresora con amplificación nominal de 300,000 X y resolución de 3 a 4 nm mostrado en la figura 3.6 El principio de funcionamiento del equipo se basa en el análisis de electrones secundarios y retro dispersados que son obtenidos al hacer emitir un haz de electrones sobre una muestra. Las señales producidas por los electrones secundarios y retro dispersados son colectadas y interpretadas electrónicamente de tal forma que cada punto de la muestra corresponda a un punto en la pantalla. La calidad de la imagen dependerá de la intensidad de las señales.



Fig. 3.6 Microscopio electrónico de barrido.

6.- Analizador de tamaños de partícula.

Equipo de difracción de luz láser marca Beckman Coulter modelo LS 13320 con un software Microsoft Windows-Based LS 13320 mostrado en la figura 3.7. El principio de funcionamiento de este equipo se basa en el principio de dispersión de luz, teniendo un rango dinámico de longitudes de onda de 0.4 a 2000 μ m, mediante la medición del patrón de luz dispersada por las partículas de la muestra.



Fig. 3.7 Analizador de tamaños de partícula.

7.- Espectroscopio de plasma por acoplamiento inductivo.

Dispositivo de espectroscopia de plasma por acoplamiento inductivo marca Perkin Elmer modelo OPTIMA 3000XL con software Winlab versión 4.3 expuesto en la figura 3.8. Su funcionamiento esta basado en la espectroscopia de emisión, la cual considera que todos los átomos de un material se encuentran en estado fundamental. Y que al hacer ingresar una sustancia a un estado de excitación los electrones de los orbitales extremos saltan a orbitales mas energéticos, teniendo una vida de excitación corta por lo cual retornan a su estado fundamental acompañado de la emisión de un foton de radiación, dicha emisión es examinada y traducida electrónicamente por el equipo, lo cual le permite indicar la cantidad presente de dicha sustancia en la muestra.



Fig. 3.8 Dispositivo de espectroscopia de plasma por acoplamiento Inductivo.

8.- Difractómetro de rayos x.

Modulo de rayos X marca Phillips modelo X`Pert con un software PC-APD versión 4.0 expuesto en la figura 3.9. El principio de funcionamiento de este aparato esta basado en el espectro de difracción que poseen todas las substancias cristalinas el cual se puede describir de la siguiente manera, cuando un rayo x incide a determinado ángulo en la superficie del material que se desea analizar, este producirá dispersiones, las cuales en su mayoría serán destructivas Sin embargo una porción de estas dispersara constructivamente produciendo difracción, que puede ser colectada y analizada por el equipo, lo que permitirá identificar las fases presentes en la muestra y así determinar cual es el material en cuestión. Para que esto suceda se debe cumplir con la ley de Bragg.

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta ,$$

Donde: **n** es un numero entero, **λ** es la longitud de onda del haz incidente, **d** es la distancia interplanar de los planos del cristal, y **θ** es igual al ángulo de incidencia del haz.



Fig. 3.9 Difractómetro de rayos x.

3.2.2 Compactación del polvo.

1.- Prensa hidráulica.

Prensa ENERPAC de cilindro hidráulico modelo RC-506 con capacidad de 50Tm de aplicación de carga y carrera máxima de 6"equipada con: una bomba de recirculación de aceite modelo No. P0012018 , manómetro ENERPAC modelo No. 6F-835 y regulador de velocidad ENERPAC V8F 00405C mostrada en la Figura 3.10.



Fig. 3.10 Prensa hidráulica.

2.- Herramental.

La compactación de los polvos se llevó a cabo en una matriz fabricada con acero grado herramienta de dimensiones: 8.4 centímetros de diámetro exterior, 11.5 centímetros de altura y una cavidad interna de 0.953 centímetros de diámetro. Equipada con una resistencia eléctrica diseñada para trabajar a 400 W de potencia a un voltaje de 120 V lo anterior se muestra en la figura 3.11. Los punzones empleados están contruidos de acero especial grado herramienta, y son mostrados en la misma figura.



Fig. 3.11 Matriz y punzones superior e inferior.

3.- Pirómetro digital.

La medición de la temperatura de polvo adecuada para la compactación se llevó a cabo con la ayuda de un pirómetro digital marca Thermolyne modelo PM20700 con numero de serie 78KA0311 mostrado en la figura 3.12.



Fig. 3.12 Pirómetro digital.

3.2.3 Caracterización de compactos.

1.- Equipo de pulido.

Devastadora marca Buehler, modelo Master 2000 equipada con: 2 discos giratorios, control de velocidad de 50 a 500rpm y auto lubricación. Mostrada en la Figura 3.13

Pulidora marca Buehler, modelo ECOMET 4, proveída de: 1 disco giratorio, regulador de velocidad de rotación (con una velocidad máxima de 500rpm) y auto lubricación ilustrada en la Figura 3.14.



Fig. 3.13 Desbastadora.



Fig. 3.14 Pulidora.

2.- Microscopio óptico.

Microscopio óptico de polarización. marca Nikon, modelo Epiphot 200 (equipado con lentes de aumento de 100x, 200x, 500x y 1000x) con sistema de video cámara Sony CCD-IRIS comandados por una computadora marca DELL Pentium IV con un software de análisis de imagen IMAGE-PRO PLUS para Windows Versión 4.1 expuesto en la figura 3.15.



Fig.3.15 Microscopio Óptico.

3.- Micro durometro.

Este aparato marca Buehler, modelo ECOMET-4 mostrado en la figura 3.16, consta de dos sistemas uno mecánico y otro óptico. El primero permite aplicar carga por medio de presión neumática dejando la huella de un diamante en forma cuadrada y así medir la dureza del material. La escala utilizada fue la escala Vickers.



Fig.3.16 Micro durometro.

4.- Máquina universal

Es una máquina de ensayos universal, dinámica de doble efecto. Este equipo permite realizar ensayos a tracción, flexión, compresión y fatiga, a todo tipo de materiales. Además se puede realizar, estudios estáticos y dinámicos de elementos constructivos: Tubos, pilares, vigas, paneles, ensayos de flexión y cortante. En esta tesis se empleó para realizar los ensayos de compresión, determinando la curva esfuerzo versus deformación.



Fig. 3.17 Máquina Universal.

3.3 Ensayos.

En este apartado se sintetiza el desarrollo experimental utilizado en el proceso de investigación de esta tesis.

3.3.1 Diseño experimental.

En la figura 3.18 se esquematiza de manera gráfica, los diversos métodos de fabricación y caracterización empleados para la elaboración de compactos de Zinalco^{MR} mediante metalurgia de polvos partiendo de polvos elementales de Zinalco^{MR}.

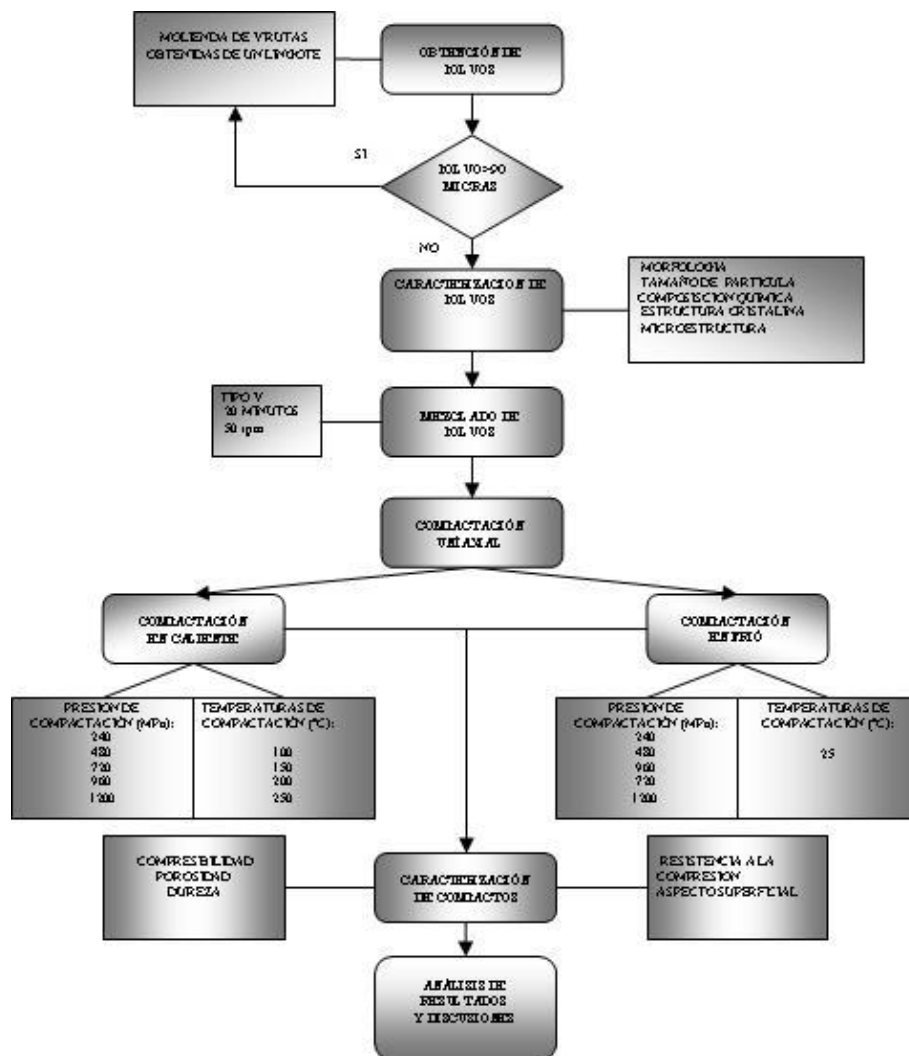


Fig. 3.18 Diseño experimental.

3.3.2 Obtención y caracterización del polvo.

En la Figura 3.19 se muestra el esquema experimental empleado para obtener polvo de Zinalco^{MR}, con el objetivo que el diámetro medio del polvo obtenido tenga un diámetro medio de partícula inferior a 90 μm .

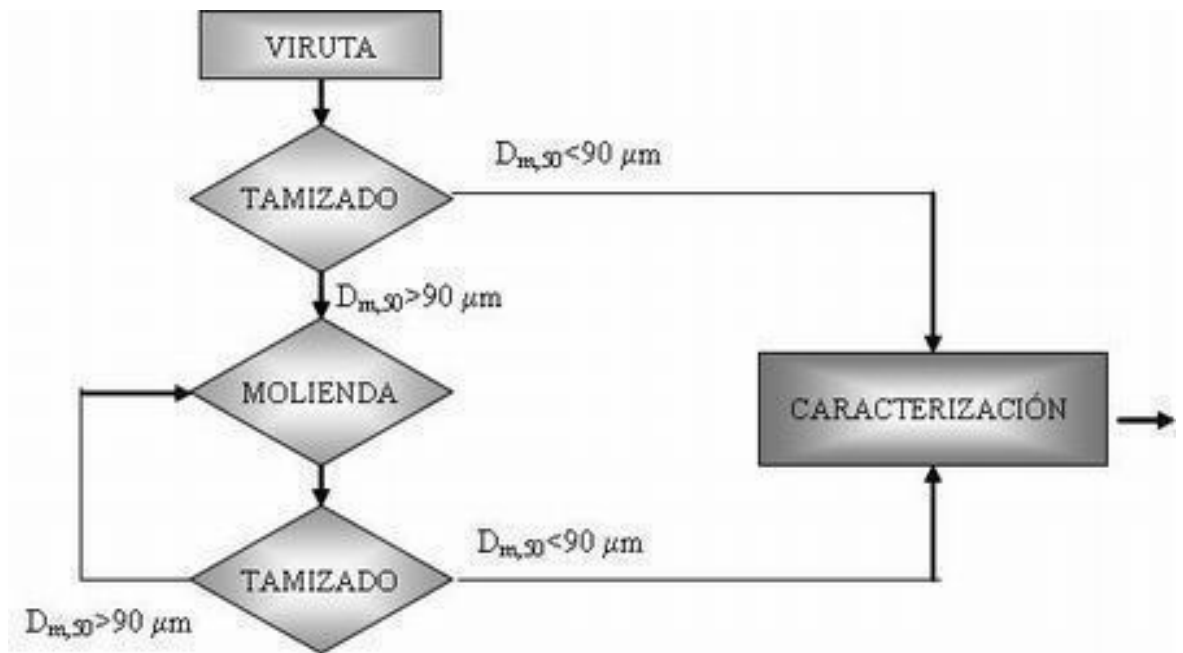


Fig. 3.19 Diagrama de flujo del procedimiento de obtención de polvo de Zinalco^{MR} a partir de lingotes de esta composición.

A continuación se describen de un modo más detallado como se llevan a cabo el proceso de molienda, hasta obtener el polvo con las características de tamaño deseado.

Obtención de la viruta.

Se obtiene mediante procesos de corte (cepillado) de lingotes de Zinalco^{MR}, el cual fue distribuido por el Dr. Gabriel Torres Villaseñor.

Molienda de viruta y polvo de Zinalco^{MR} mayor a 90 micrómetros.

Este proceso es realizado con ayuda de un molino de bolas (ver apéndice 3.2.1), sobre el cual se pone a rodar la muestra de polvo a moler (100 gramos), que se introduce en un recipiente de plástico, de volumen 1065 ml, junto con bolas de acero, las cuales son el medio de molienda. Las características del medio de molienda se muestran en la Tabla IV.

**TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO DE MOLIENDA
(BOLAS DE ACERO ENDURECIDO).**

DIÁMETRO DE BOLA (In)	CANTIDAD (NÚMERO)	PESOS DE BOLAS (Kg)
1/2	178	1.492
3/4	6	0.199
1/8	221	0.746
1/4	231	0.240

El proceso de molienda se realiza durante seis horas obteniendo una eficiencia del 90%. Las condiciones de molienda adecuadas se seleccionaron de acuerdo a estudios preliminares realizados por H. Islas Vázquez [6].

Tamizado.**1.1 Tamizado primario.**

Para el material mas grueso (viruta gruesa) el tamizado se realiza en un ROTAP. Durante 10 minutos con la ayuda de malla de 500 micrómetros (malla 32).

1.2 Tamizado secundario.

Se realiza en un ROTAP. Durante 10 minutos con la ayuda de malla de 90 micrómetros (malla 170) para el caso de las virutas que ya fueron molidas.

Eficiencia.

La eficiencia del proceso es de 5% en el tamizado primario y de 70% en el tamizado secundario (después de la molienda).

Caracterización del polvo de partida.

La caracterización del polvo de partida es descrita en la tabla V mostrada a continuación.

TABLA V ANÁLISIS DEL POLVO DE PARTIDA			
Característica evaluada	Equipo	Técnica	Detalles del equipo
Morfología y microestructura	Microscopio electrónico de Barrido	Microscopía	Apéndice 3.2.1 / 4
Distribución de Tamaño de partícula	Analizador de tamaño de partícula	Difracción láser	Apéndice 3.2.1 / 5
Composición química	Espectrómetro de plasma por acoplamiento inductivo	Espectrometría de plasma por acoplamiento inductivo	Apéndice 3.2.1 / 6
Estructura cristalina	Difractómetro de rayos X	Difracción de rayos X	Apéndice 3.2.1 / 7

Mezclado.

El mezclado del polvo se llevó a cabo en un equipo de mezclado tipo V durante 20 minutos a 50 revoluciones por minuto para evitar la segregación de tamaños de partícula. Es decir que toda la muestra de polvo sea representativa.

3.4 Compactación del polvo.

En las Figura 3.20 y 3.21 se muestran los esquemas experimentales empleados para obtener compactos de polvo de Zinalco^{MR}, con el objetivo de comparar que efectos tiene la temperatura en el proceso de compactación.

Y de tal manera poder evaluar si es posible el alcanzar una mayor densidad en compactos de Zinalco^{MR}, sin tener la necesidad de sinterizar.

3.4.1.- Compactación en frío.

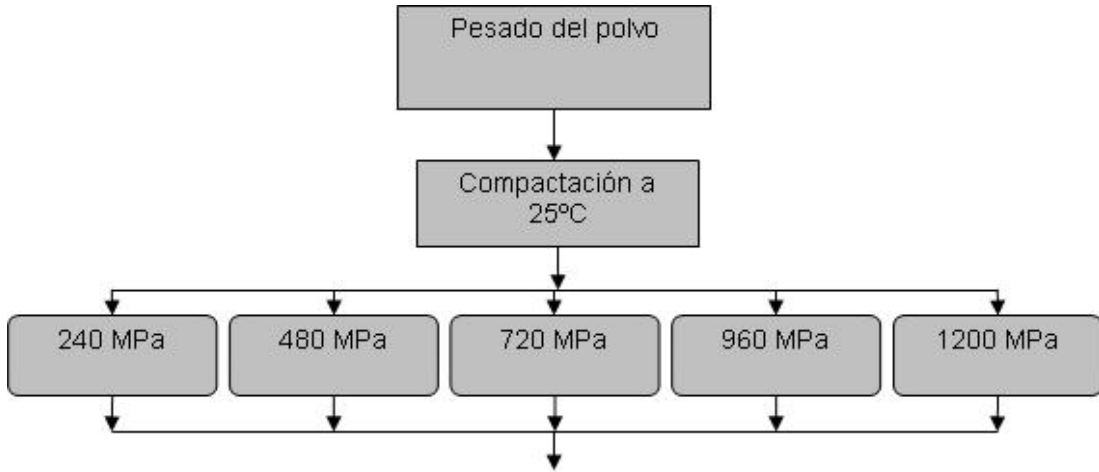


Fig. 3.20 Compactacion en frio.

Pesado de polvo.

La cantidad de polvo necesaria para tener una relación de esbeltez de 1 a 1.5 adecuada para realizar pruebas mecánicas se estimó en 6.4gramos de Zinalco^{MR}.

Compactación a 25°C.

La compactación de los polvos de Zinalco^{MR}. Se realizó por medio del proceso compactación uniaxial descrito en el capítulo II apéndice 2.3.1. a una velocidad de prensado de $1.2795 \times 10^{-3} \text{ m / segundo}$. Las características de los aparatos empleados para tal efecto se describen en el apéndice. 3.2.2 de este capítulo. Para tener un mejor panorama del comportamiento de compactado del Zinalco^{MR}, la presión utilizada fue de 240, 480, 720, 960, 1200.

3.2.- Compactación en caliente.

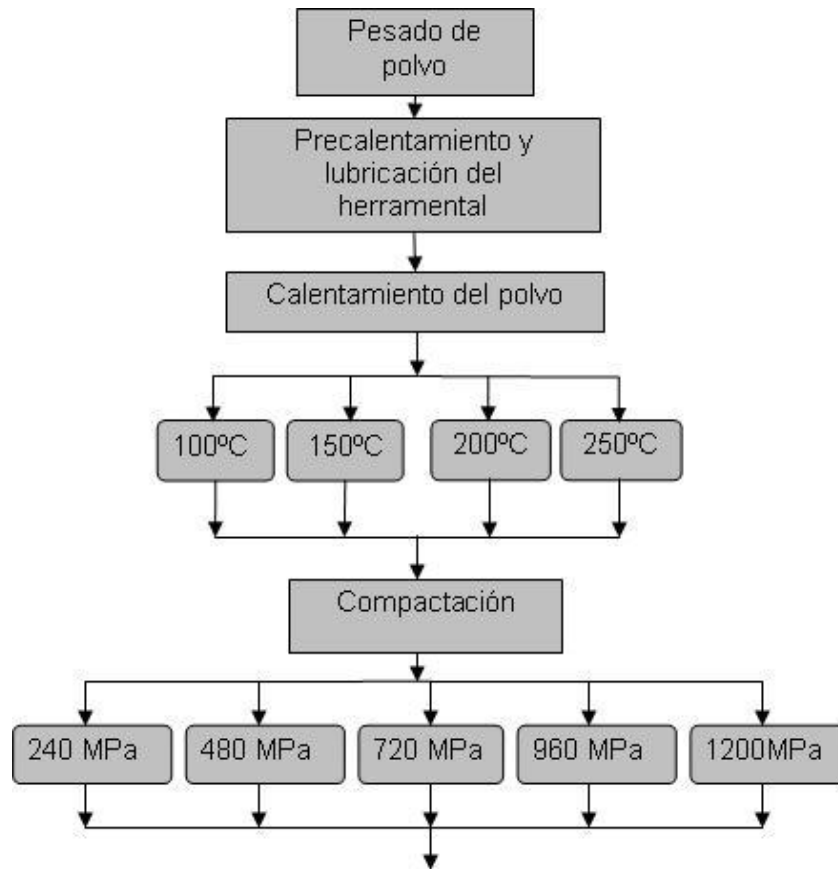


Fig. 3.21 Compactación en caliente.

Pesado de polvo.

La cantidad de polvo necesaria para tener una relación de esbeltez de 1 a 1.5 adecuada para realizar pruebas mecánicas se estimó en 6.4gramos de Zinalco^{MR}.

Precalentamiento y lubricación del herramental.

Para que el desarrollo de la compactación en caliente se lleve a cabo de la mejor manera es necesario que exista un precalentamiento y lubricación en el herramental de compactación. Lo cual facilitará la extracción de la pieza procesada por este método, de esta manera se evitan agripamiento en las piezas elaboradas mediante este método. El proceso de compactación en caliente es descrito en el capítulo II apéndice 2.3.2.

La lubricación del herramental fue hecha con estearato de zinc con punto de fusión de 125°C [23]. Para evitar contaminar la muestra.

Calentamiento del polvo.

El calentamiento del polvo se llevó a cabo en el interior de la matriceria de compactación, para mantener la temperatura de polvo lo más estable posible. La medición de la temperatura adecuada se realizó con la ayuda de un pirómetro digital reportado en el apéndice 3.2.2 de este capítulo.

Compactación en caliente.

La fuerza empleada en esta compactación fue la misma que para la compactación en frío a si como también la velocidad de prensado. La descripción del proceso de compactación en caliente esta detallado en el capítulo II apéndice 2.3.2.

3.4.3 Caracterización de los Compactos.

En la tabla VI se presentan los ensayos realizados en los compactos.

TABLA VI. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPACTOS.			
Característica evaluada	Equipo	Técnica	Detalles del equipo
Compresibilidad.	Prensa Hidráulica.	Metalurgia de polvos	Apéndice 3.2.2 / 1
Porosidad.	Analizador de Imagen.	Análisis Métao gráfico.	Apéndice 3.2.3 / 2
Dureza.	Micro durómetro	Análisis de Dureza	Apéndice 3.2.3 / 3
Resistencia a la compresión.	Máquina Universal	Compresibilidad	Apéndice 3.2.3 / 4

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos y a su vez se discuten los mismos. Se ha dividido en dos apartados, con el fin de facilitar la comprensión, estos se mencionan a continuación:

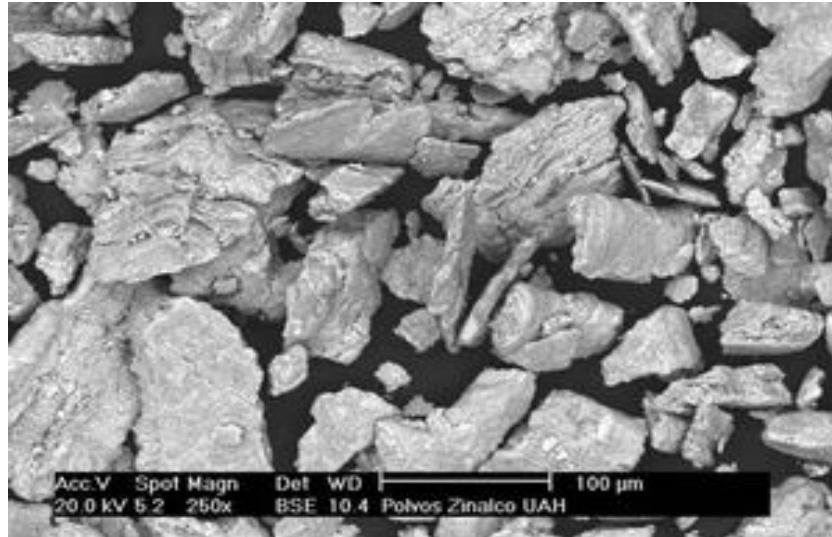
4.1. Caracterización de los polvos de partida.

En este apartado se presentan las características más relevantes del polvo de Zinalco^{MR} obtenido mediante molienda mecánica, de acuerdo a la metodología experimental mostrada en el Capítulo II de esta tesis.

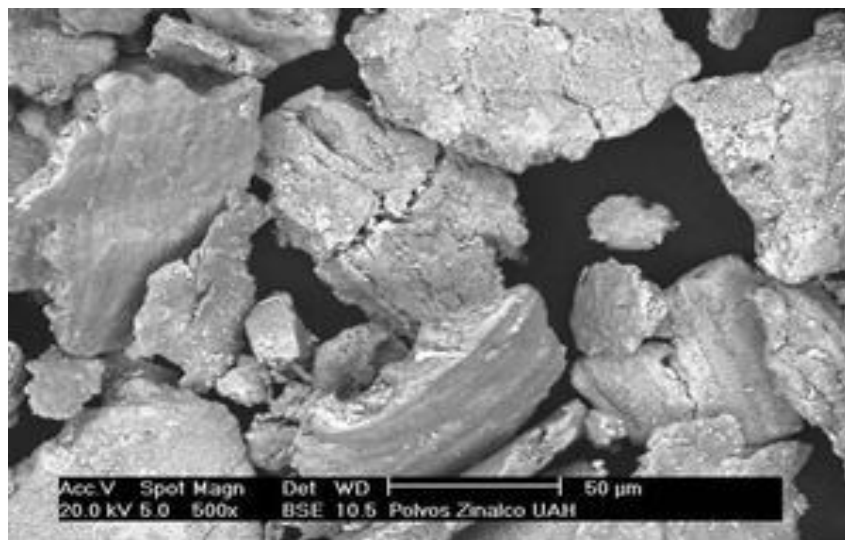
El polvo de Zinalco^{MR} se obtuvo mediante molienda mecánica, tal como se describió en el capítulo III de esta tesis, los polvos obtenidos se caracterizaron, determinando sus propiedades tales como: distribución de tamaños de partícula, morfología de las partículas, composición química y microestructura. Se muestran los resultados obtenidos a continuación

4.1.1 Morfología

Se muestra en la Figura 4.1, obtenida mediante microscopía electrónica de barrido, la morfología que presentan las partículas de polvo de Zinalco^{MR}, la cual es del tipo irregular y con la presencia de grietas en dichas partículas, típica de los polvos obtenidos por métodos mecánicos [25], debido a que la disminución del tamaño se produce como consecuencia de la fractura por impacto y de la fricción durante el proceso de molienda.



a).- Polvo de Zinalco^{MR} 250x de aumento.



b).- Polvo de Zinalco^{MR} 500x de aumento

Fig. 4.1. Morfología del polvo de Zinalco^{MR} obtenido a diferentes aumentos

4.1.2 Tamaño de partícula

En la Figura 4.2 se muestra la curva de distribución de tamaños de partícula del polvo de Zinalco^{MR} antes y después de ser sometido a un periodo de molienda de seis horas.

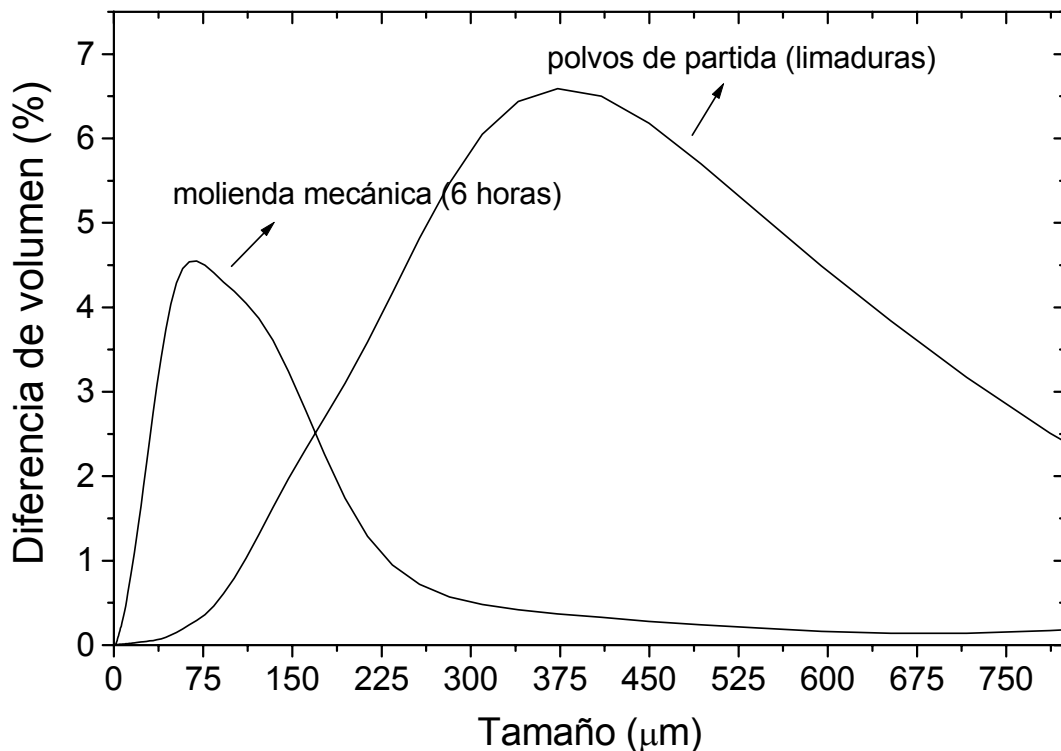


Fig. 4.2. Distribución de tamaño de partícula del polvo de zinalco molido durante 6 horas.

Las distribuciones de partículas obtenidas son de menor tamaño a la inicial (marcada como limaduras). Ambas presentan un comportamiento monomodal, con un único pico centrado en 80 y 375 µm, para la molida y la sin moler, respectivamente.

Se seleccionó la correspondiente a 6 horas de molienda, porque con el sistema de molienda que se dispone se consigue obtener un $D_{m,50}$, tamaño medio de

partícula, de 80 μm , este tamaño es de amplio uso en la fabricación de piezas estructurales mediante metalurgia de polvos convencional.

4.1.3 Composición química.

Con el fin de verificar que el polvo obtenido es de la composición típica del Zinalco^{MR} y que éste no estuviera contaminado por hierro, procedente del proceso de obtención (molienda mecánica), se analizó mediante análisis ICP, la composición química de los polvos obtenidos, los resultados se muestran en la Tabla VII

TABLA VII. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POLVOS OBTENIDOS (GENERAL).

Elemento	% en peso	σ_{std}
Al	25.04	0.
Cu	2.36	0.12
Zn	72.45	0.81
Fe (contaminante)	0.15	0.07

La composición de los polvos obtenidos, corresponden a Zinalco^{MR} Tipo I [26], de composición general Zn-22Al-2Cu

4.1.4 Estructura Cristalina.

Se muestran en la Figura 4.3 el patrón de difracción del polvo molido durante 6 horas, el cual fue la base del estudio del presente trabajo. Tal como se puede apreciar en el difractograma, se detectan un micro-constituyente formado por la mezcla de dos fases: $\alpha+\eta$, que de acuerdo con el diagrama de equilibrio Al-Zn, Figura 4.6 , corresponden a una fase rica en Al y zinc, respectivamente.

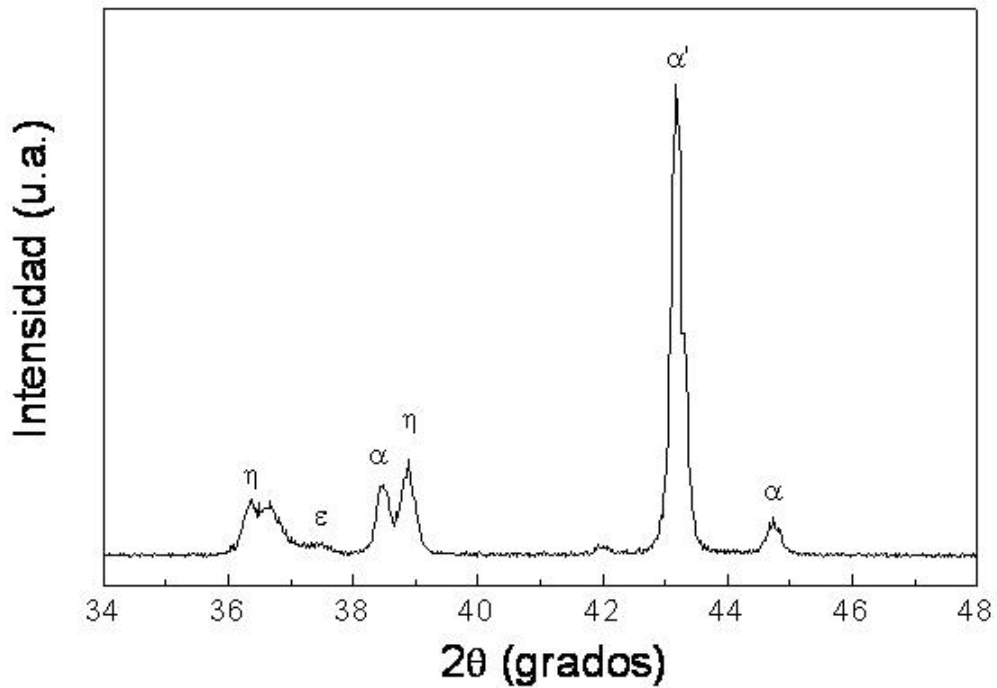


Fig. 4.3. Patrón de difracción del polvo de Zinalco^{MR} molido por 6 horas.

También se puede concluir del difractograma obtenido, que el hierro no se encuentra en altas concentraciones (%Fe<5% en peso) debido a que no se aprecian picos de este elemento en el patrón de difracción.

4.1.5 Microestructura.

En la Figura 4.4 se presenta la microestructura, obtenida mediante microscopía electrónica de barrido a diferentes magnificaciones de los polvos de Zinalco^{MR} empleados. Para realizar su observación sólo fue necesario su montaje en resina y pulido hasta acabado espejo, ya que este material no precisa ataque químico, queda revelado por sí mismo en MEB [27].

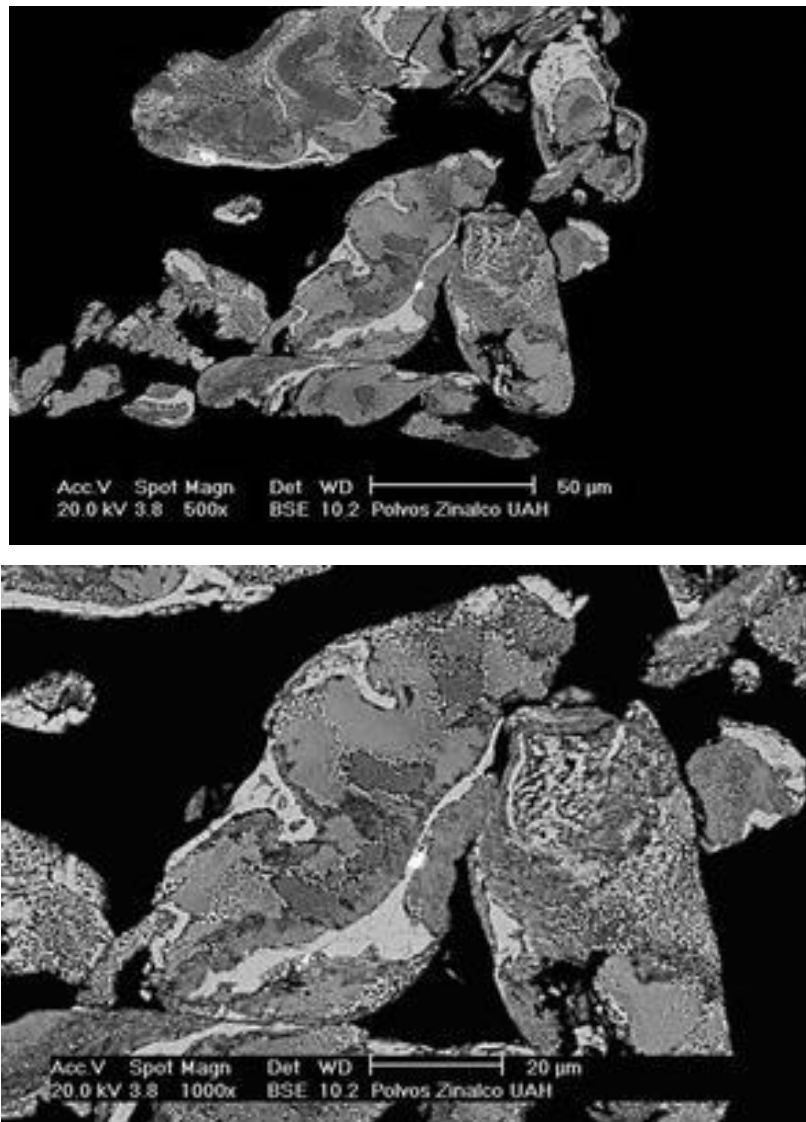


Fig. 4.4. Microestructura de los polvos de Zinalco^{MR} obtenidos mediante molienda mecánica, a diferentes aumentos.

En la micrografía mostrada en la Figura 4.4, se puede apreciar que este material presenta una estructura aparentemente perlítica, a base de dos fases, una blanca (η de acuerdo a la bibliografía) y una negra (α , de acuerdo a la bibliografía) [26]. La distribución de las fases no es homogénea, apareciendo la mayor parte del material bifásico, pero unas zonas únicamente donde se observa la presencia de la fase blanca. De acuerdo al diagrama de equilibrio, mostrado en la Figura 4.6, lo anterior indica que el material se encuentra

alrededor del punto eutectoide, pero no en él, debido especialmente a la presencia de zonas monofásicas.

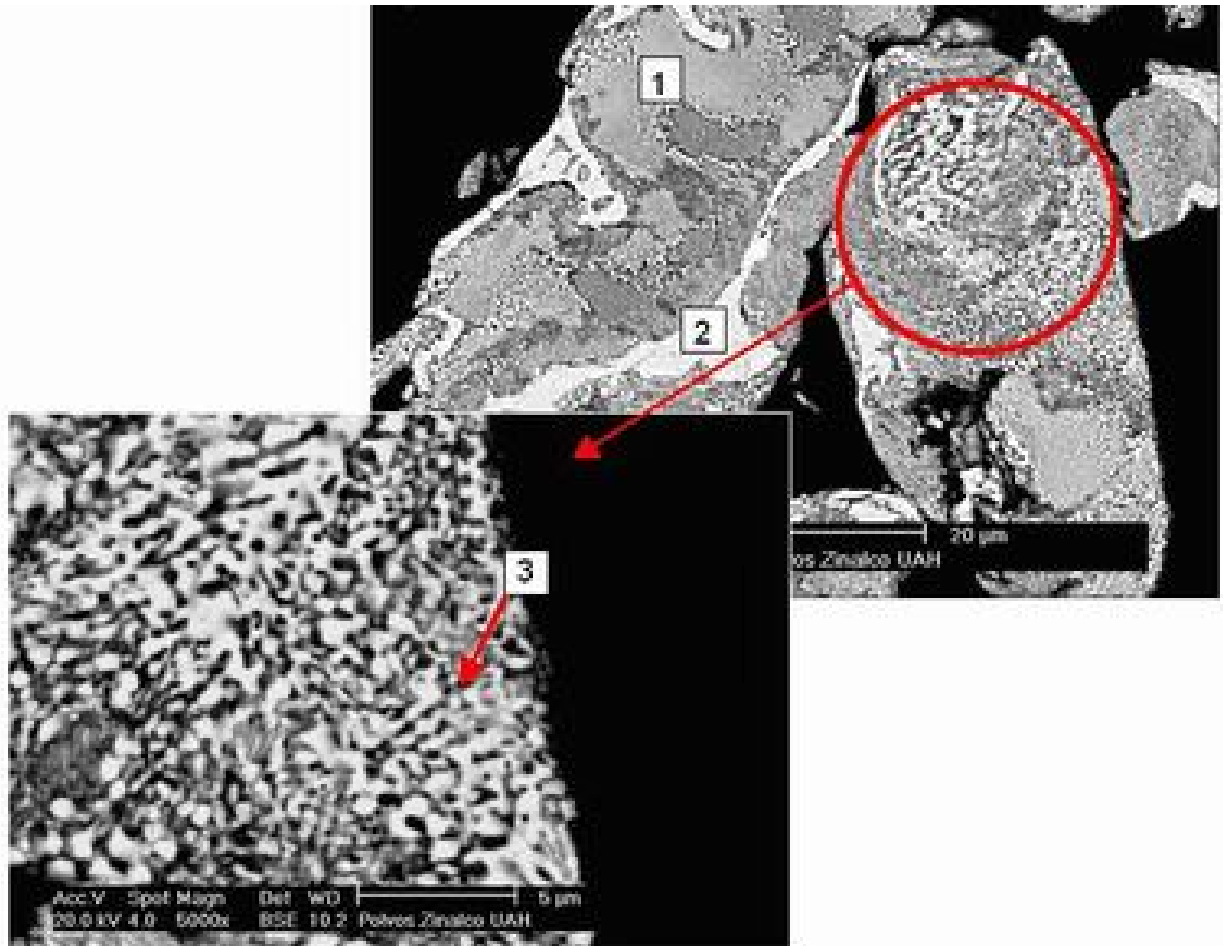


Fig. 4.5. Ampliación de la figura 4.4, con el fin de observar las fases y su morfología.

Con el fin de establecer claramente la morfología (forma) de las fases presente, se realizó un análisis a mayores magnificaciones, mostrado en la Figura 4.5. Se observa que la estructura perlítica ha desaparecido en algunas zonas, pudiendo distinguir una estructura bifásica pero granular, lo cual se puede asociar al proceso de molienda mecánica, capaz por si solo, de modificar la morfología de las fases presentes, y romper las láminas perlíticas transformándolas en granos.

Para confirmar de que fases se trataba, se determinó mediante EDS la composición química de ambas zonas, siendo de 77.8% de Zn para la zona bifásica y 93.96% de Zn (solución sólida de Al en Zn) para la zona monofásica y corresponde de acuerdo al diagrama de equilibrio Al-Cu, Figura 4.6, a perlita $\alpha+\eta$ y α , respectivamente.

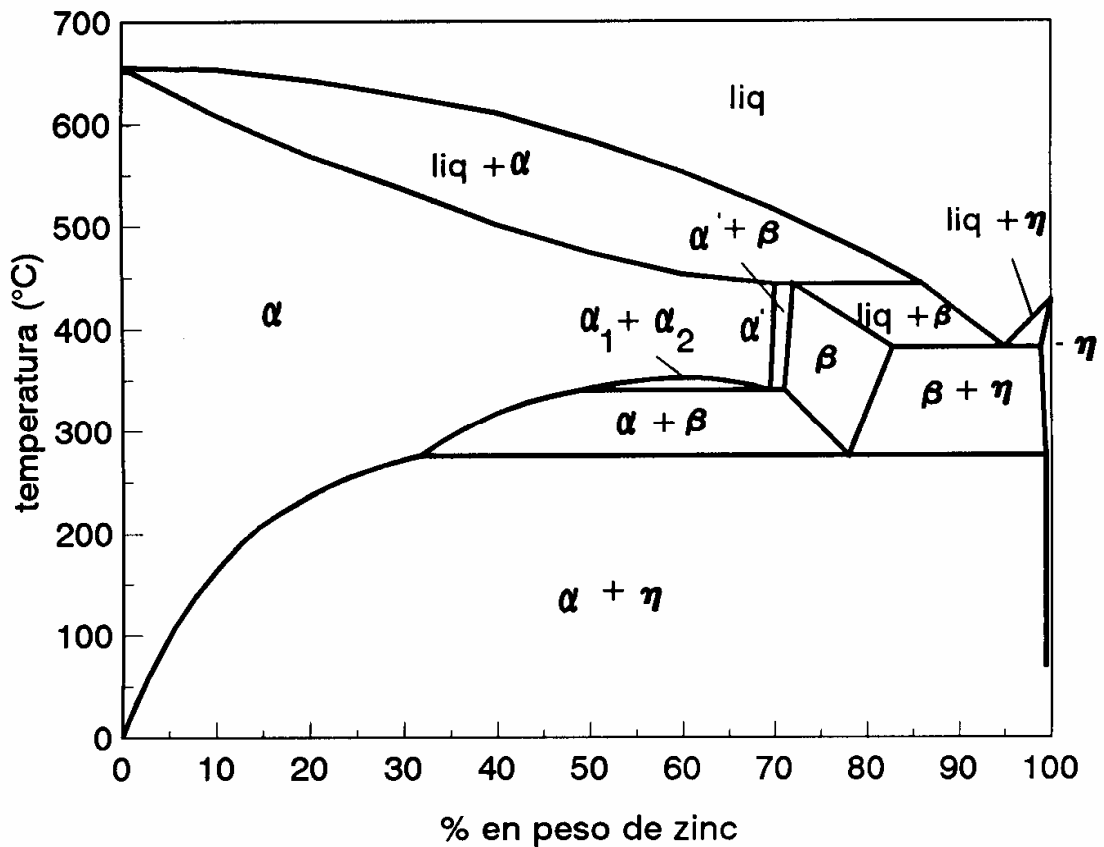


Fig. 4.6. Diagrama de equilibrio del sistema Zn-Al [31].

4.1.6 Composición química superficial.

Uno de los principales objetivos de este trabajo, es proponer las condiciones óptimas de compactación, con el fin de facilitar el proceso de difusión durante la sinterización, asociado a lo que se ha considerado que es la principal dificultad en los procesos de sinterización de materiales metálicos que presentan elevada

tendencia para la oxidación (debido a sus potenciales de oxidación), debido principalmente a la presencia de una capa de óxido superficial en las partículas del polvo, que inhibe la difusión, a pesar de emplear altas temperatura [5].

Con base en lo anterior, se realizó un estudio sobre la composición química tanto superficial como de todas las fases observadas en la Figura 4.5, para ello se empleo microanálisis mediante EDS (MEB), se muestran los resultados en las Figuras 4.7 a 4.9 y un resumen con las composiciones químicas en la tabla VIII.

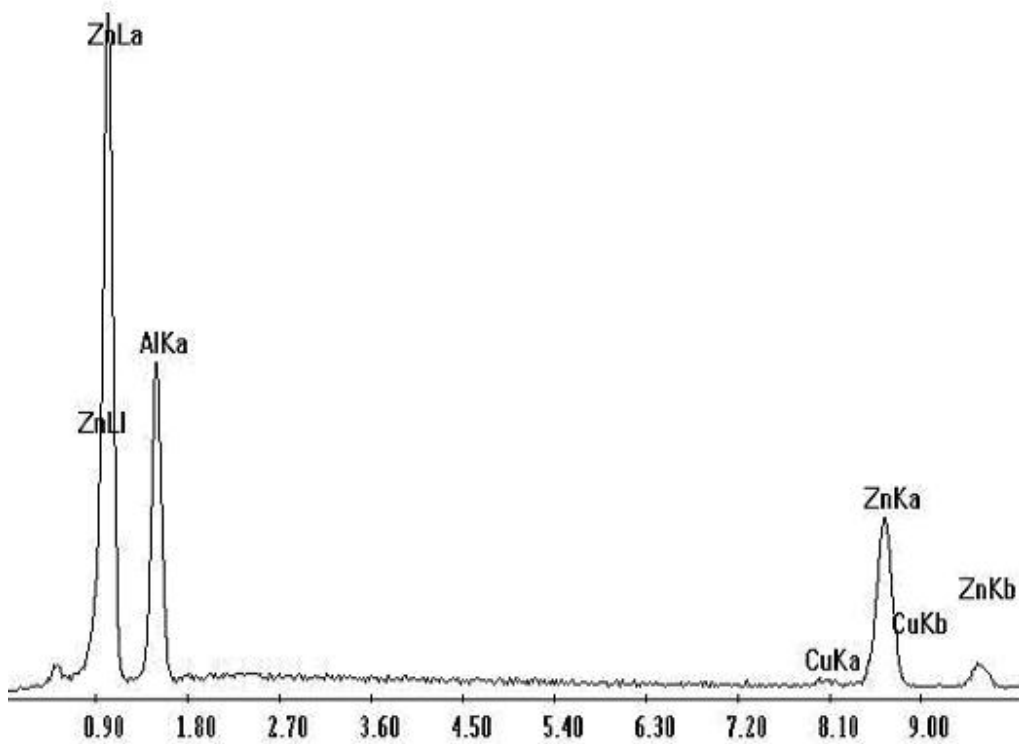


Fig.4.7. Espectro EDS de la zona bifásica (perlítica).

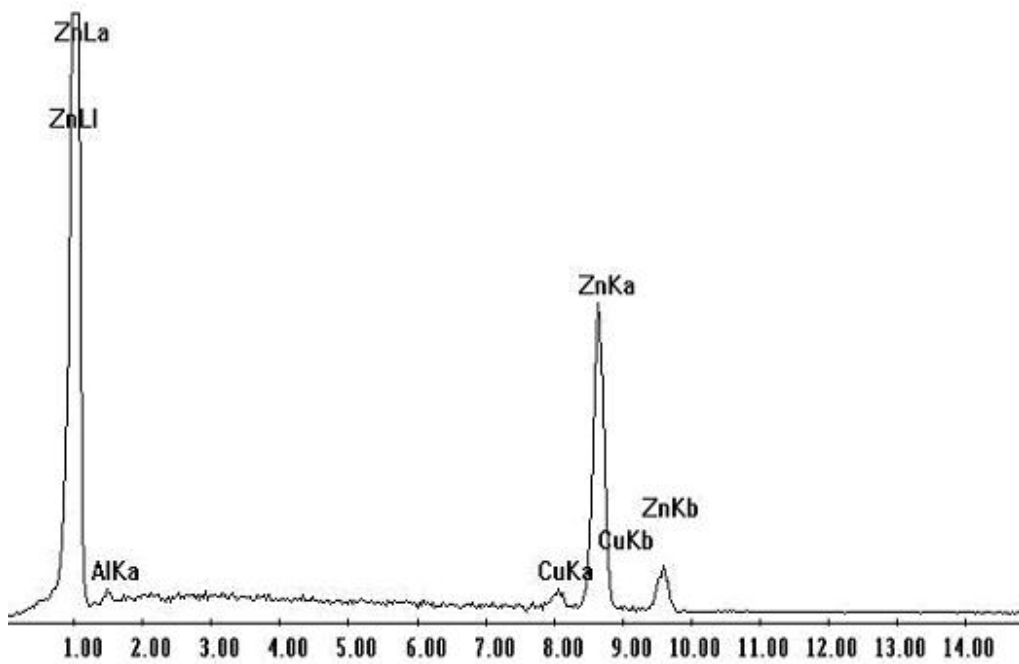


Fig. 4.8 Espectro EDS de la zona monofásica, blanca (MEB-EDS).

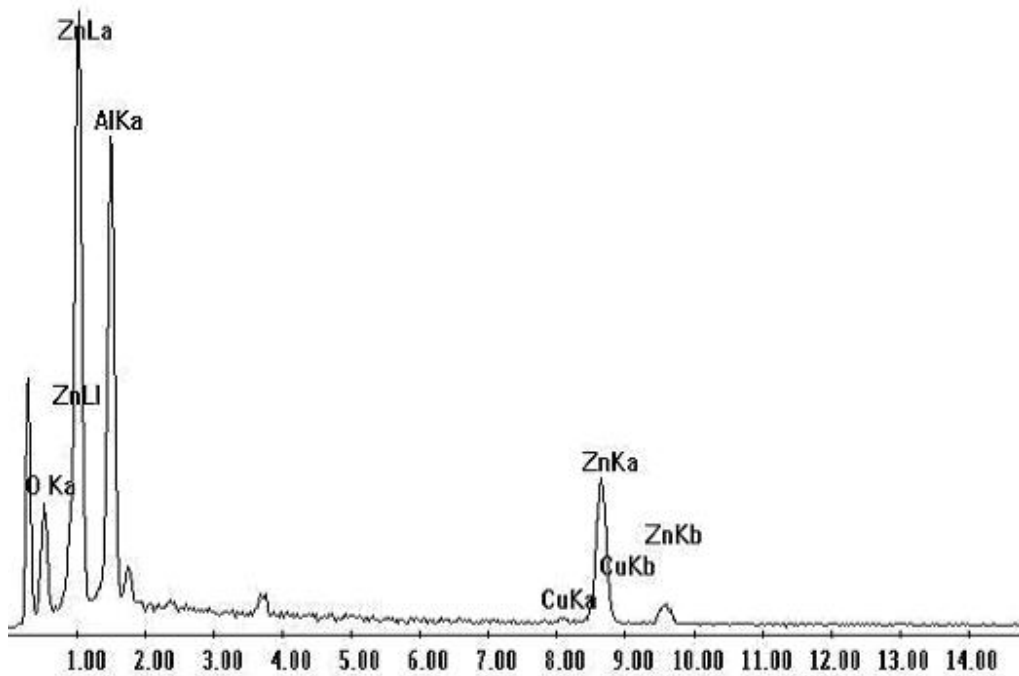


Fig. 4.9. Espectro EDS de la zona superficial (MEB-EDS).

TABLA VIII. COMPOSICIÓN QUÍMICA PUNTUAL EN LA SUPERFICIE DE LA PARTÍCULA (3).

Elemento	Superficie % en peso	Zona bifásica % en peso	Zona Monofásica % en peso
O	17.51	No detectable	No detectable
Al	34.29	34.29	1.38
Cu	1.63	1.63	4.66
Zn	46.57	46.57	93.96

Tal como se presumía en párrafos anteriores, la zona bifásica corresponde a una mezcla de fase $\alpha+\eta$, mientras que la monofásica, coincide en composición química con la fase η , con lo cual se trataría de un Zinalco^{MR} hipereutectoide. Superficialmente las partículas de Zinalco^{MR} presentan una capa muy delgada, no continua de óxido y difícil de apreciar mediante microscopía electrónica de barrido (Figura 4.10), cuya composición química tiene gran cantidad de oxígeno, el cual puede encontrarse en forma de hidróxidos y/o óxidos de Al y Zn. Los resultados cuantificados de cada una de las zonas se muestra en la Tabla VIII.

La presencia de esta capa concuerda con la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de tesis, en la cual se justificaba su realización con base en la aplicación de calor durante la compactación, con la finalidad de romper esta capa de óxido y promover la sinterización.

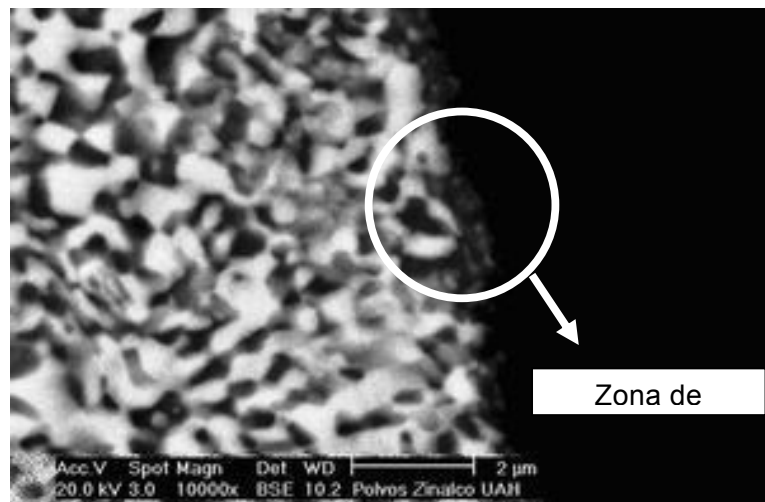


Fig. 4.10. Aspecto superficial de una partícula de Zinalco^{MR}. Se señala con un círculo la zona donde se realizó el análisis superficial.

4.2 Caracterización de los compactos de Zinalco^{MR}.

Se muestra en este apartado el efecto de la temperatura y la presión de compactación sobre propiedades como densidad, porosidad, microestructura, resistencia a la compresión y dureza, los cuales se justificarán principalmente con base en la temperatura empleada para la compactación, objetivo principal de este trabajo de tesis.

4.2.1 Efecto de la temperatura sobre la compresibilidad.

En la Figura 4.11 se muestra el efecto de la temperatura de compactación sobre la curva de compresibilidad, la cual muestra la relación entre la presión aplicada a la masa de polvo y la densidad que adquiere el compacto.

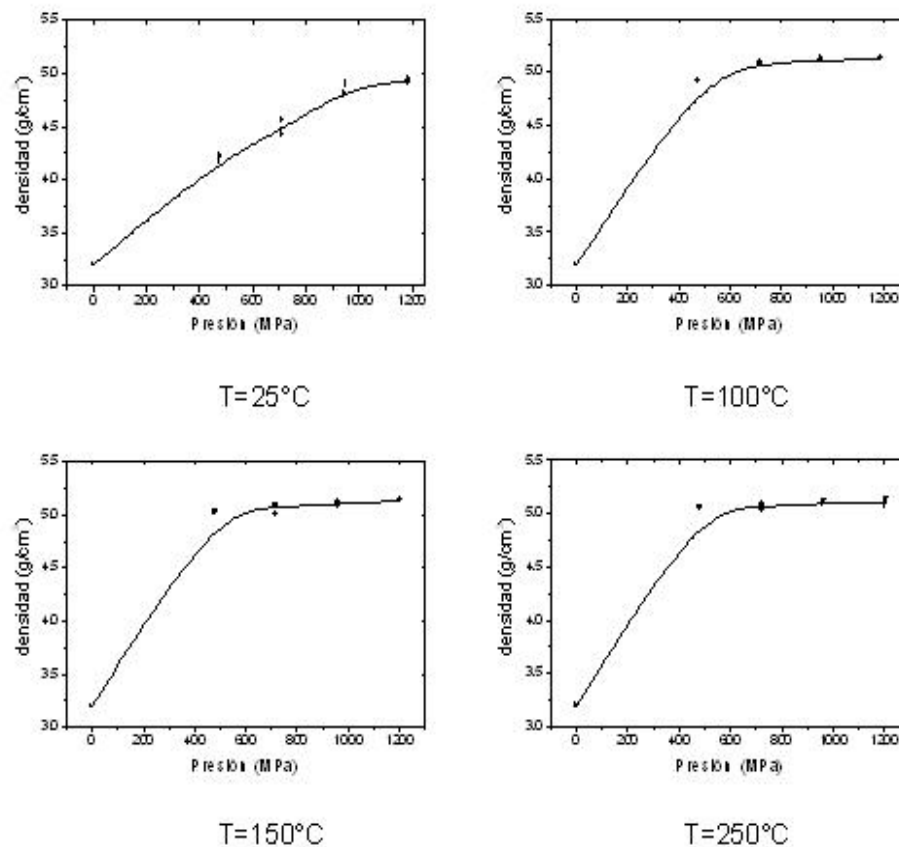


Fig. 4.11. Compresibilidad en función de la Temperatura de compactación (a) 25°C, b) 100°C, (c) 150°C y (d) 250°

Tal como se aprecia, para incrementos de temperatura inferiores o iguales a 150 °C se produce un gran cambio en la pendiente de las curvas, mejorando notablemente la compresibilidad del material. Para una presión dada, por ejemplo 600 MPa, la densidad incrementa desde 4.3 g cm⁻³ hasta alrededor de 5 g cm⁻³, en el intervalo de temperatura de 25 a 100 °C. Por encima de 150°C y especialmente a presiones elevadas, no se aprecia una mejora sustancial en la compresibilidad que justifique el gasto de la aplicación de energía para calentarlo por encima de dicha temperatura.

Lo anterior se debe a que el Zinalco^{MR} tiene bajo punto de fusión 421-480 °C, es por ello que un incremento de hasta 150 °C durante la compactación (que representa un 33% de $T_f = 450$ °C), puede generar procesos de difusión en estado sólido, además de propiciar cambios en las propiedades mecánicas de las partículas de polvo, haciéndolas más dúctiles y por lo tanto confiriéndoles una mejor capacidad de deformación plástica con cargas inferiores. Lo anterior está asociado a que los procesos de difusión, deslizamiento y ascenso de dislocaciones (deslizamientos entre límites de grano), están favorecidos por el incremento en temperatura, debido a que los átomos de cualquier material sólido, cuando supera un valor umbral de temperatura (generalmente $\frac{3}{4}$ la temperatura de fusión), sus átomos poseen la energía de activación suficiente como para iniciar el movimiento a nivel atómico (saltos a través de mecanismos de vacancia e intersticial), fenómeno que no se presenta a temperatura ambiente, comportándose mas dúctilmente [28].

Una gráfica comparativa del comportamiento de la compresibilidad frente a la temperatura se muestra en la Figura 4.12, en la cual se puede apreciar de una manera mas clara que existe una gran diferencia en el comportamiento como consecuencia de emplear calor durante el prensado, pero que no afecta significativamente la temperatura por encima de 150°C.

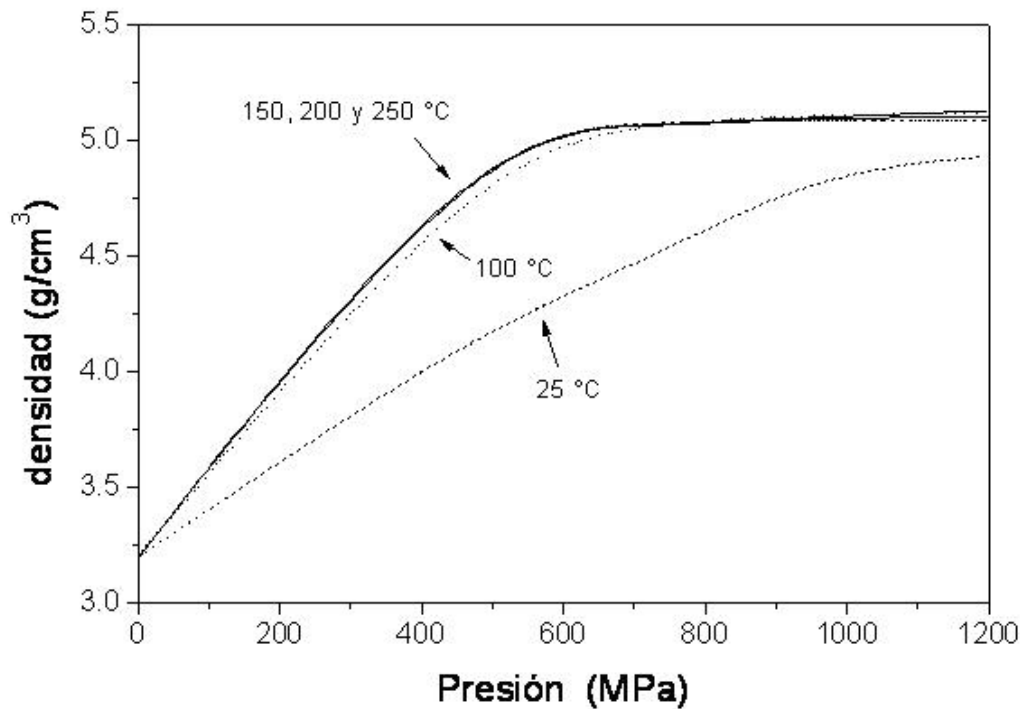


Fig. 4.12. Gráfico comparativo de la compresibilidad en función de la Temperatura de compactación, desde 25 °C hasta 250 °C.

En la figura 4.13 se muestra una visión alterna de la compresibilidad, mostrando la relación entre la densidad alcanzada por el compacto respecto a la temperatura de compactación, para cada presión. En este caso se hace más evidente el notable efecto que tiene la temperatura sobre la densidad de los compactos. Del mismo modo que en el caso anterior, se concluye que el efecto de la temperatura es extraordinario por debajo de 150°C, por encima de este valor las variaciones de densidad del compacto no son destacables, siendo este efecto más agresivo a bajas temperaturas de compactación. Por ejemplo, para una temperatura de 25 °C, se detectan diferencias de $\pm 1 \text{ gcm}^{-3}$ de densidad en función de la presión de compactación, desde 480 a 1200 MPa respectivamente, mientras que a 150 °C la diferencia de densidades obtenida es de $\pm 0.2 \text{ gcm}^{-3}$ para los mismos valores de presión.

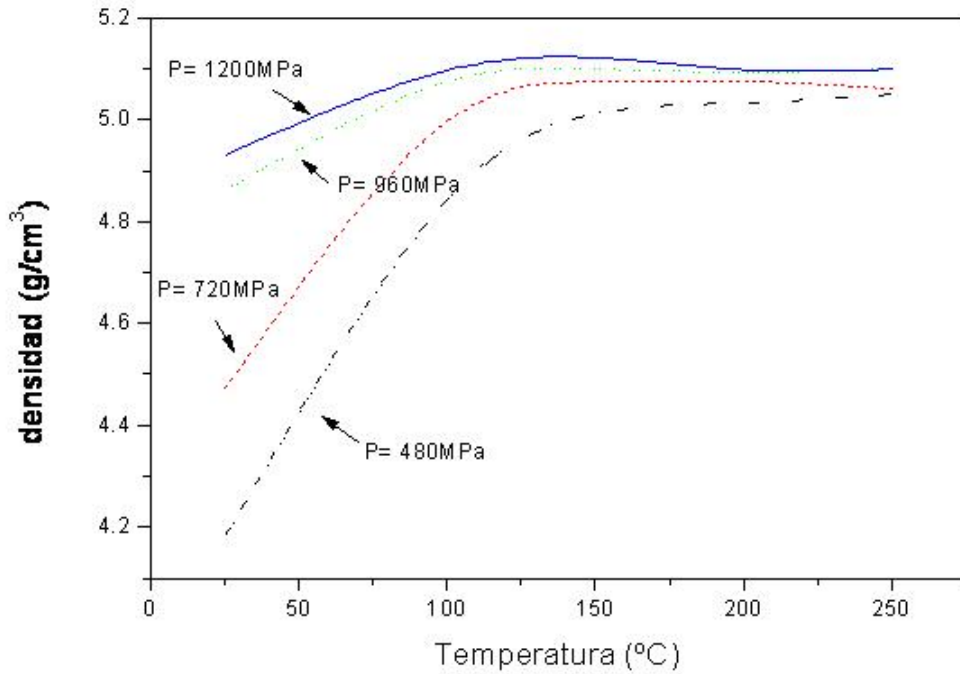


Fig. 4.13. Gráfico comparativo de densidad frente a la Temperatura en función de la presión, 480 hasta 1200 MPa.

4.2.2 Efecto de la Temperatura sobre la porosidad.

Al igual que en el caso de la compresibilidad, la temperatura también tiene un efecto similar sobre la porosidad de los compactos, debido a que son parámetros dependientes [29]. En la figura 4.14 se muestran los resultados obtenidos, los cuales se extraen del análisis de imagen realizado sobre micrografías obtenidas mediante microscopía óptica.

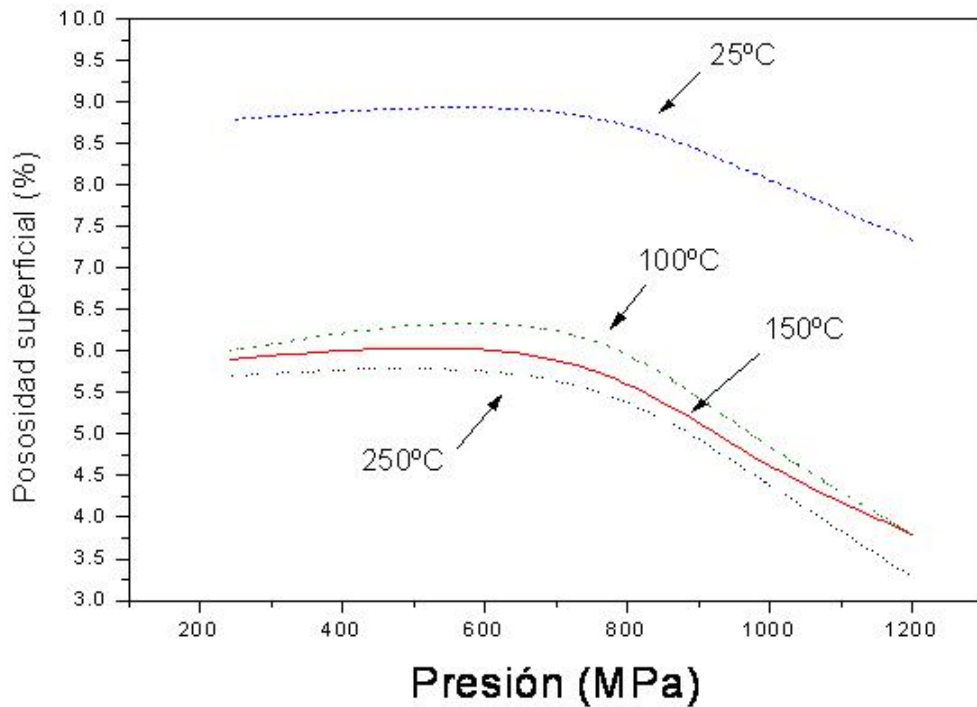


Fig. 4.14. Efecto de la Temperatura sobre la porosidad superficial, desde 25 °C hasta 250 °C.

Las curvas de porosidad mostradas en la figura 4.14 muestran en forma evidente que existe una gran disminución de la porosidad asociada al incremento de la temperatura de compactación, en concordancia con el aumento de densidad de los compactos que se mencionó previamente, encontrando una diferencia de comportamiento muy grande entre las probetas a temperatura ambiente, y aquellas en las que se empleó calor para su obtención. Nuevamente la temperatura presenta un efecto muy beneficioso (en aplicaciones donde la porosidad no es deseable) para la compactación del polvo de Zinalco^{MR}, evidenciando que la porosidad es reducida sustancialmente cuando se calienta el polvo hasta los 150 °C.

Este hecho hace presuponer que los compactos con menor porosidad tendrán una mayor resistencia mecánica lo cual será analizado más adelante, cuando se

presentan los resultados de las curvas de ensayos de compresión de los compactos y su dureza.

Se muestran en la Figura 4.15 algunas de las micrografías obtenidas de microscopía óptica, a partir de las cuales se realizó el análisis de imagen. Se aprecia claramente que los incrementos de temperatura hacen disminuir la porosidad, presente en forma de manchas oscuras, es notoria la gran disminución de manchas oscuras en la superficie de los compactos obtenidos a 150 y 250 °C, frente a la obtenida a temperatura ambiente, 25°C.

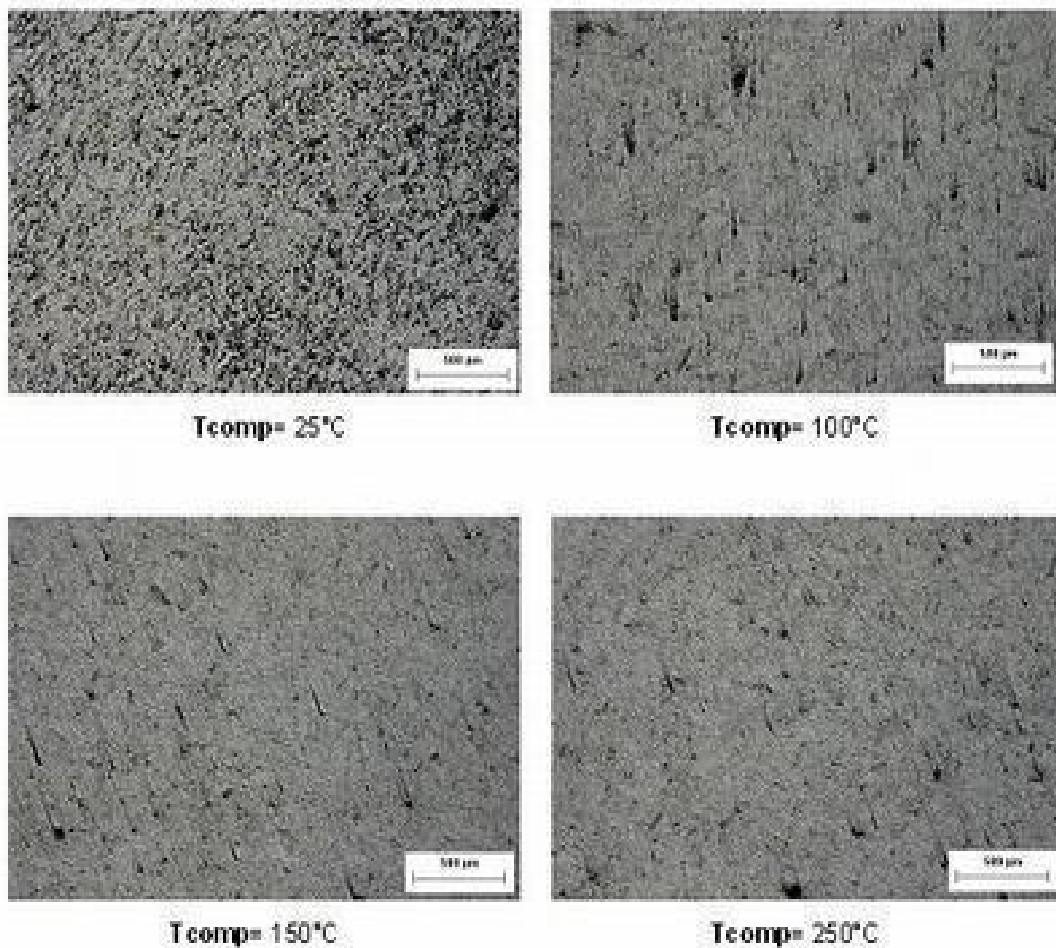


Fig. 4.15. Micrografías que muestran el aspecto superficial de los compactos en función de la temperatura de compactación, prensadas a 960 MPa de Presión.

4.2.3 Efecto de la Temperatura sobre la microestructura.

En la Figura 4.16 se presenta la microestructura de compactos de Zinalco^{MR}, obtenidos a diferente temperatura y presión, con el fin de elucidar si existe algún efecto de la temperatura de compactación sobre la misma.

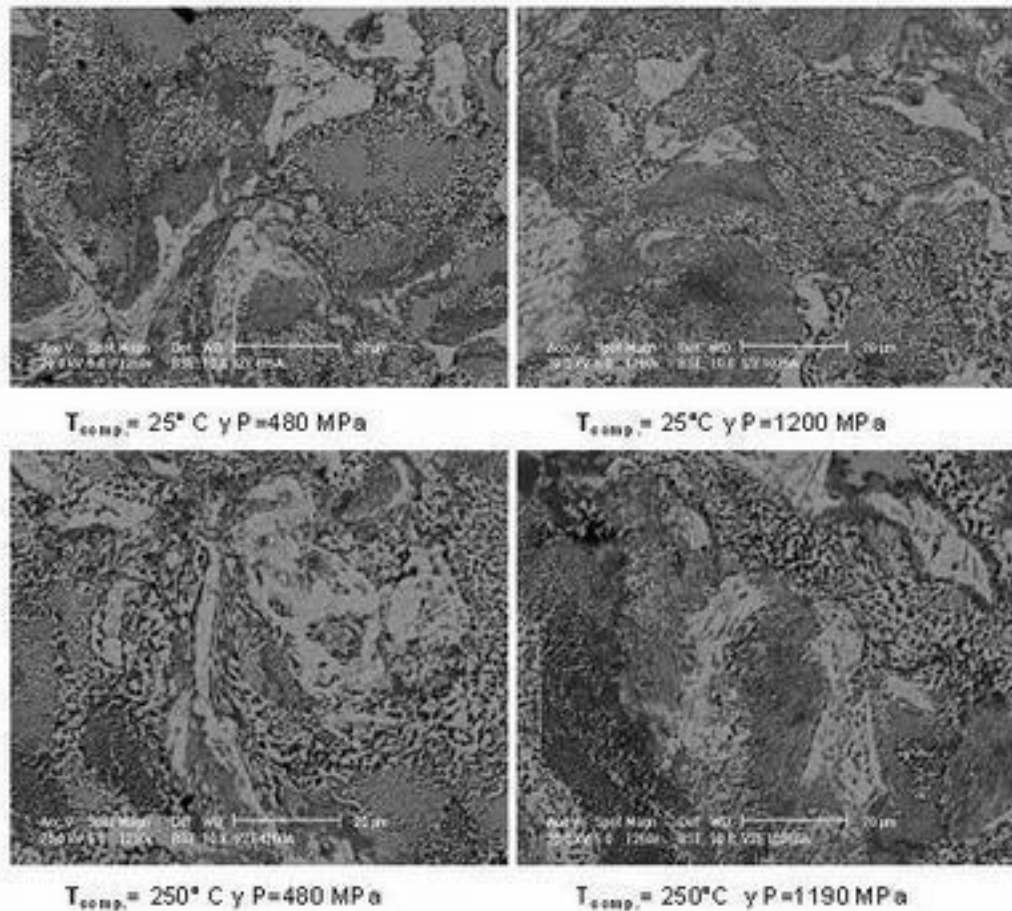


Fig. 4.16. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido que muestran la microestructura de los compactos obtenidos a diferentes temperaturas.

La microestructura que se observa en la imágenes captadas, en todos los casos, independiente de la presión y temperatura empleadas para su consolidación, corresponden claramente a una mezcla de componente bifásico ($\alpha+\eta$) en combinación de pequeñas zonas blancas, correspondientes a fase η , microestructura idéntica a las que presentaba el material de partida. Lo anterior implica que el suministro de calor hasta alcanzar la temperatura

de 250 °C, para la compactación de polvo de Zinalco^{MR}. no afecta a su microestructura. Adicionalmente este hecho se puede justificar considerando que el tiempo de calentamiento del polvo es muy breve, alrededor de 10 minutos, lo cual no es suficiente para generar transformaciones de fase apreciables.

4.2.4 Efecto de la temperatura sobre la dureza.

En la Figura 4.17 se muestra el efecto de la temperatura y la presión de compactación sobre la dureza, expresada en términos de dureza Vickers (VHN). Tal como se puede observar en esta figura, al incrementar la presión de compactación, a una temperatura dada, incrementa la dureza. Para el caso de las temperaturas mayores o igual a 100 °C y bajas presiones ($T < 500$ MPa), se tienen pendientes muy pronunciadas pero por encima de este valor, se suavizan, necesitando incrementos de presión muy grandes para provocar cambios significativos en la dureza.

Lo anterior se asocia al hecho de que al incrementar la temperatura de compactación se incrementa la densidad del compacto y se reduce la porosidad, fomentando la unión entre las partículas de polvo durante el proceso de compactación como consecuencia de una gran deformación plástica y la ruptura de la capa superficial de óxido que cubre a las partículas. De este modo, para el caso de máxima temperatura y presión aplicadas se están obteniendo durezas similares a las del material macizo [30], en estos casos puede considerarse que se está promoviendo la difusión en estado sólido, similar a lo que ocurre durante la sinterización. Es por ello que a pesar de que la densidad (porosidad) de los compactos obtenidos por compactación en caliente a $T > 100^{\circ}\text{C}$ sea muy similar, su dureza supera como mínimo 10 unidades de HVN, lo cual es muy interesante para sus posibles aplicaciones, donde se requiere resistencia al desgaste.

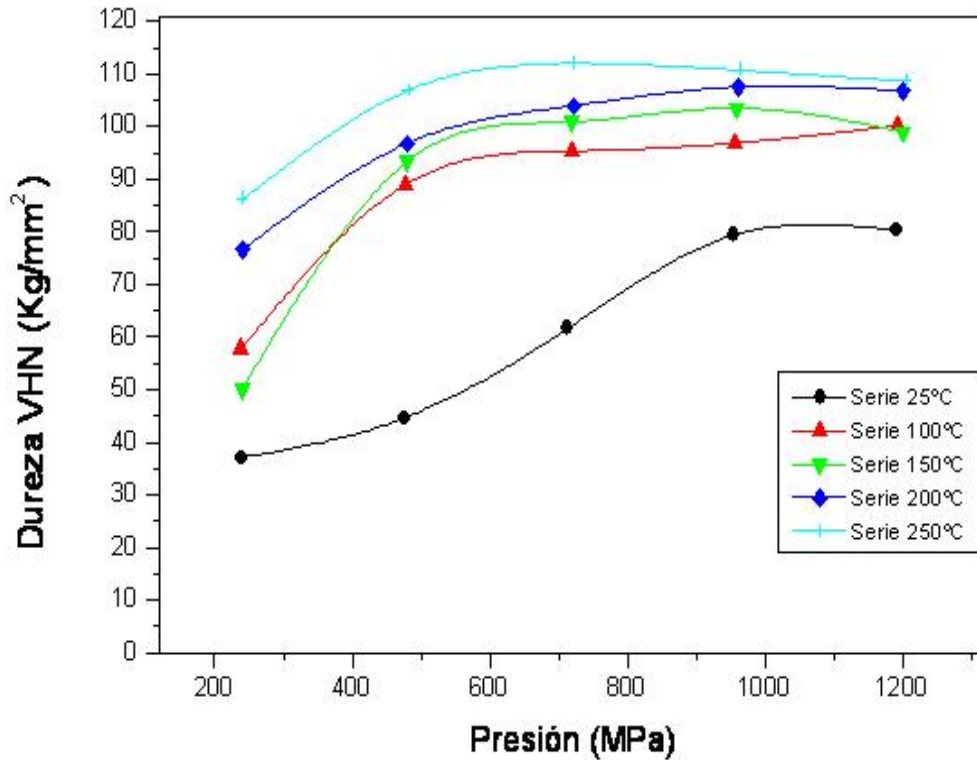


Fig.4.17. Efecto de la temperatura y presión sobre la dureza, HVN.

4.2.5 Efecto de la temperatura sobre la resistencia mecánica en ensayo de compresión.

Finalmente, se presentan en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 las curvas del comportamiento mecánico de los compactos en ensayo de compresión obtenidas mediante ensayo E0009-89AR00 en función de la temperatura y presión de compactación.

Las curvas de compresión muestran que las probetas de Zinalco^{MR} fabricadas mediante metalurgia de polvos, sin empleo de sinterización, tan sólo mediante compactación en caliente, presenta un comportamiento dúctil, es decir gran deformación plástica antes de la ruptura, este comportamiento se ve favorecido

cuando es menor la cantidad de poros y con mayor densidad del compacto, señalando que los poros actuarían como exaltadores de esfuerzos y mermarían mucho el comportamiento plástico del material, produciendo ruptura a esfuerzos muy bajos.

Aunado a lo anterior, se observa un comportamiento general de incremento de la resistencia a la compresión al incrementar la presión y temperatura de compactación, nuevamente consecuencia del mismo efecto en fomentar la difusión atómica entre las partículas que se encuentran en contacto durante la compactación, especialmente por aquellas zonas en las que no hay capa de óxido o ésta capa ha sido destruida durante la compactación en caliente, y por lo tanto se ha generado una unión más íntima entre las partículas.

Cualitativamente se advierte que este comportamiento es aplicable también para el módulo de elasticidad a compresión (equiparable al módulo de Young para ensayos de tracción) y el esfuerzo máximo a rotura. La pendiente de la curva de compresión en la zona elástica, aumenta al incrementar la temperatura de compactación. Lo mismo ocurre con el esfuerzo máximo a rotura en compresión, que incrementa al incrementar la temperatura de compactación.

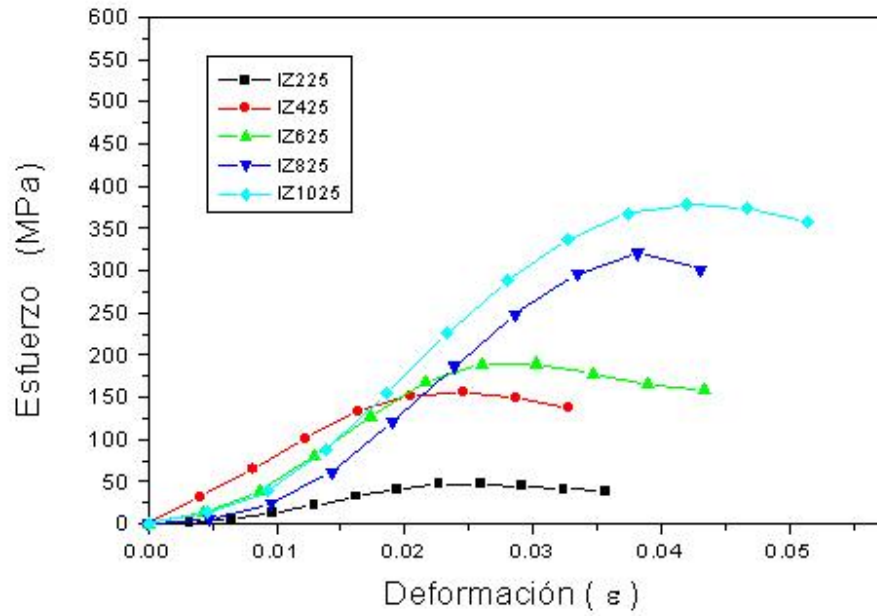


Fig. 4.18. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 25°C a diferentes presiones.

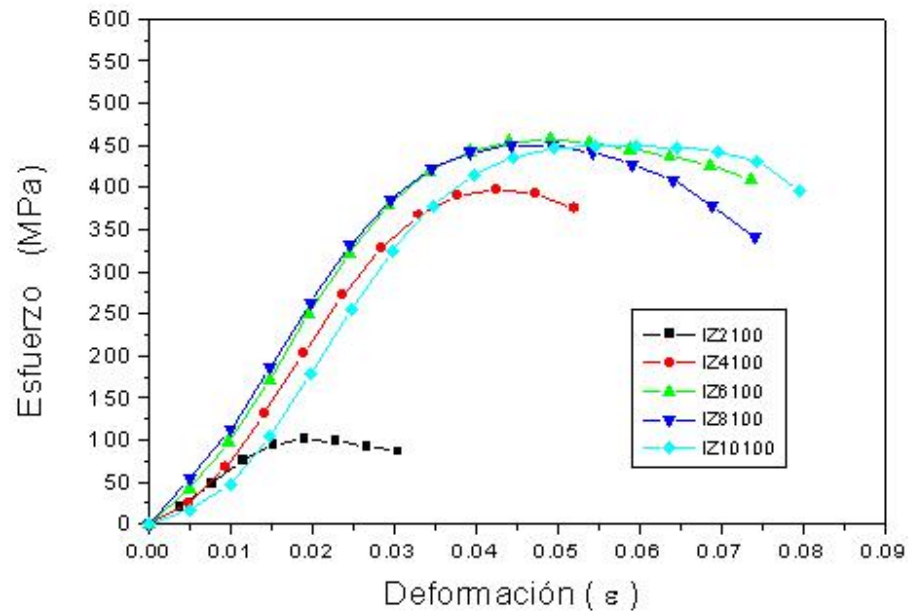


Fig. 4.19. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 100°C a diferentes presiones.

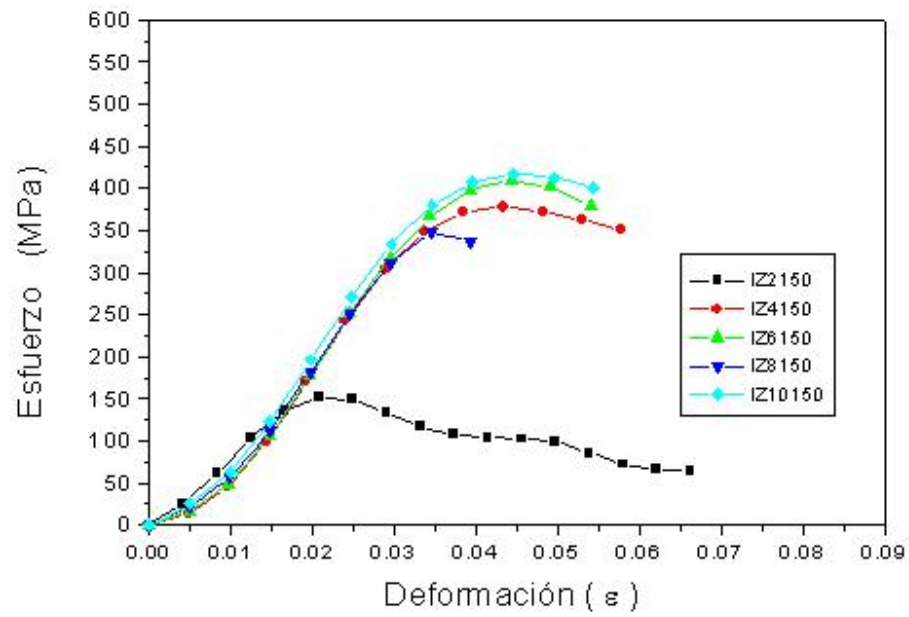


Fig. 4.20. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 150°C a diferentes presiones.

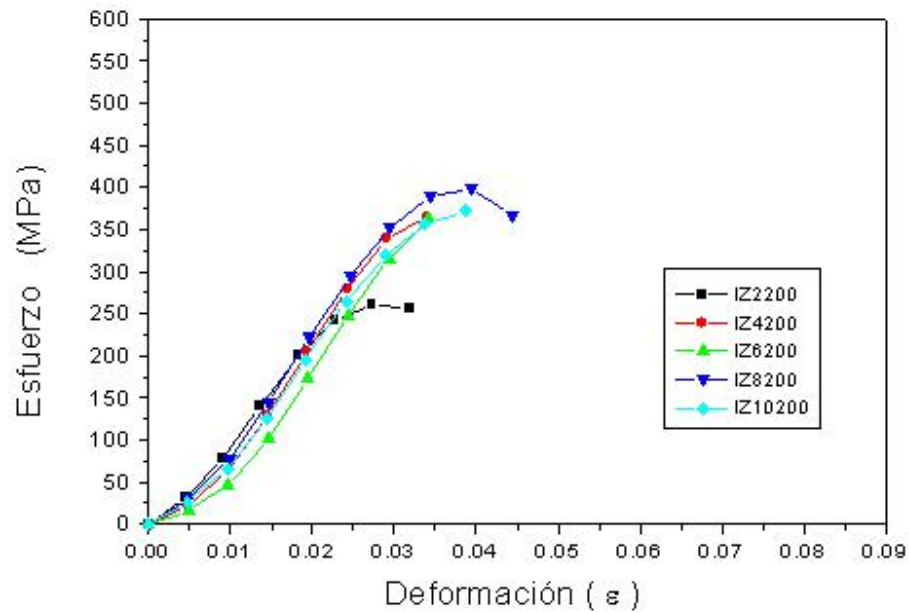


Fig. 4.21. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 200°C a diferentes presiones.

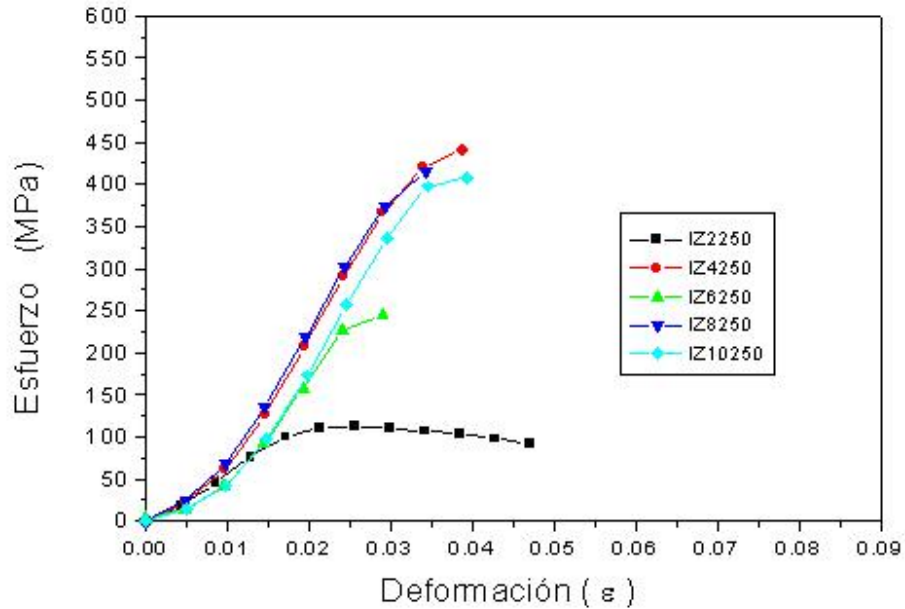


Fig. 4.22. Ensayos de compresión de probetas compactadas a 250°C a diferentes presiones.

Cabe destacar que es mayor el efecto de la temperatura que el de la presión, de acuerdo a las curvas de compresión obtenidas. Los compactos consolidados a temperatura superiores a 150°C, todos presentan un comportamiento frente a la compresión muy similar, hay variaciones de 20 a 50 MPa en el esfuerzo máximo a ruptura. Por el contrario, a bajas temperaturas, inferiores a 150°C, el efecto de la presión está muy marcado, llegando a encontrar diferencias en el esfuerzo máximo de 170 MPa.

Para facilitar la observación del efecto comentado en el párrafo anterior, se muestran en la Figura 4.23, la relación entre el esfuerzo máximo a ruptura con la presión y temperatura de compactación, en el cual se comprueba lo comentado anteriormente.

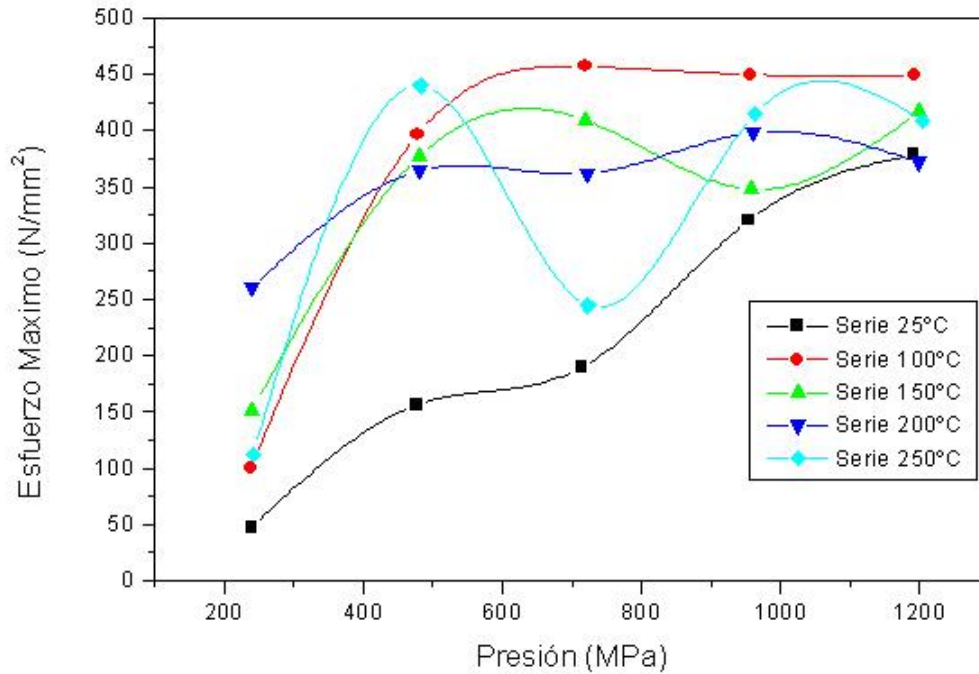


Fig. 4.23. Efecto de la presión y temperatura de compactación sobre el esfuerzo máximo a ruptura.

El esfuerzo máximo a compresión para todos los compactos presenta la misma tendencia, este incrementa su valor con incrementos de presión y temperatura, especialmente a bajas temperaturas, como se comentaba en párrafos anteriores.

Excepcionalmente sale un punto fuera del comportamiento, que corresponde al compacto prensado a 720 MPa y 250°C, el cual presenta un esfuerzo a rotura muy inferior a lo esperado. Lo anterior se atribuye a que en este caso, fortuitamente las partículas de polvo no se acomodaron adecuadamente, generando huecos lo suficientemente grandes como para propagar una grieta y generar la rotura del material antes de tiempo. Se muestran en la Figura 4.24, el tipo de grietas que pueden generar la rotura anticipada del material, por propagación de la misma cuando es sometida a un esfuerzo.

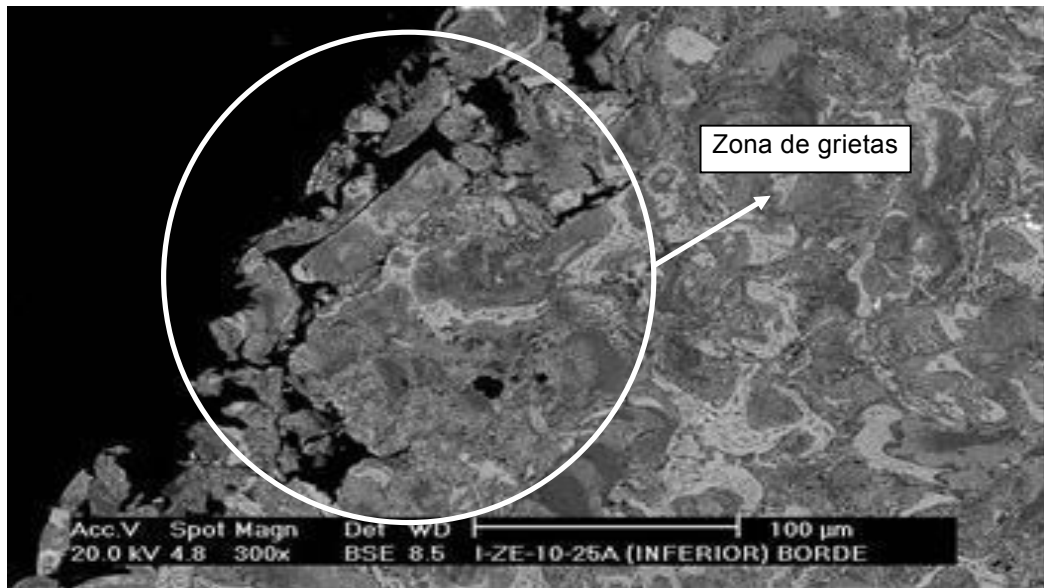


Fig. 4.24. Micrografía de un compacto prensado a 250°C y 720 MPa, en el que se pueden ver la presencia de grietas superficiales.

CONCLUSIONES

De la actualización bibliográfica, análisis teórico, desarrollo experimental así como análisis y discusión de los resultados llevados a cabo en esta tesis, cuyo objetivo en términos generales fue estudiar el comportamiento del Zinalco^{MR} en polvo frente a la compactación en caliente se concluye lo siguiente:

1. La molienda mecánica de baja energía, permite obtener polvo de Zinalco^{MR} de 80 μm de tamaño medio de partícula, con una estructura bifásica perlítica, $\alpha+\eta$ en su mayor parte, mezclada con pequeñas proporciones de η , fase rica en Zn. La molienda mecánica modifica la morfología de las fases, transformándola de perlítica a granular en algunas zonas.

2. Se ha determinado mediante análisis químico por EDS la presencia de una capa de óxidos de Al y Zn superficial, la cual de acuerdo a la bibliografía, dificulta el proceso de sinterización y justifica el empleo de la compactación en caliente.

3. El empleo de la compactación en caliente mejora notablemente la compresibilidad, especialmente a temperaturas que oscilan alrededor de 150°C. Por encima de este valor, su efecto es poco relevante. Así para una temperatura de 25 °C, se detectan diferencias de $\pm 1 \text{ gcm}^{-3}$ de densidad en función de la presión de compactación, desde 480 a 1200 MPa respectivamente, mientras que a 150 °C la diferencia de densidades obtenida es de $\pm 0.2 \text{ gcm}^{-3}$ para los mismos valores de presión.

4. Se produce una gran disminución de la porosidad superficial con el incremento de temperatura de compactación, en concordancia con el aumento de densidad de los compactos.

5. La microestructura que presenta los compactos, independientemente de la presión y temperatura empleadas para su consolidación, corresponde claramente una mezcla de componente bifásico ($\alpha+\eta$) en combinación de pequeñas zonas blancas, correspondientes a fase η microestructura idéntica a las que presentaba el material de partida, por lo tanto la temperatura usada durante la compactación no afecta a su microestructura.

6. Al incrementar la presión de compactación, a cualquier temperatura, incrementa la dureza. Este incremento es agresivo a bajas presiones ($T < 500$ MPa), pero por encima de este valor, se suaviza, necesitando incrementos de presión muy grandes para provocar cambios en la dureza. La temperatura. Del mismo modo, al incrementar la temperatura, también incrementa la dureza, pero en este caso, no se puede generalizar el comportamiento, puesto que al incrementar la presión disminuyen las diferencias entre los valores de dureza.

8. Los compactos de Zinalco^{MR} obtenidos mediante metalurgia de polvos, sin empleo de sinterización, tan sólo mediante compactación en caliente, presentan un comportamiento plástico, típico de materiales dúctiles, incrementando su resistencia a la compresión al incrementar la presión y temperatura de compactación, como consecuencia del mismo efecto en fomentar la difusión atómica entre las partículas que se encuentran en contacto durante la compactación, especialmente por aquellas zonas en las que no hay capa de óxido o ésta capa ha sido destruida durante la compactación en caliente, y por lo tanto se ha generado una unión más estrecha entre las partículas.

PROBLEMÁTICA PENDIENTE

1. Realizar estudios de resistencia al desgaste y propiedades mecánicas de tracción a los compactos elaborados en este trabajo.
2. Efectuar la sinterización a los compactos obtenidos mediante compactación en caliente y cotejar si es posible el mejoramiento de las propiedades de los mismos.
3. Evaluar de que manera afecta la granulometría del polvo en las propiedades mecánicas de los compactos.
4. Cuantificar el modo en que afecta la velocidad de compactación en las propiedades generales de los compactos.
5. Agregar partículas de refuerzo a los compactos obtenidos mediante M/P convencional para generar materiales compósitos de matriz de Zinalco^{MR} y determinar el efecto sobre sus propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Torres Villaseñor G. "Zinalco". Trabajos de investigación realizados en la UNAM-IIM de 1970 – 1990.
- 2.- www.jornada.unam.mx. "Los Universos ocultos en la Ciencia de Materiales", Mirna Servin, 20 de agosto del 2001.
- 3.- Sampere López J. Carlos, Zinalco: "Una visión económica de la vinculación y la innovación". Tesis de licenciatura en Economía UNAM 2001,
- 4.- G. Torres Villaseñor and Negrete. "zinalco a new alloy for extrusion" Advances in science, Technology and Applications of Zn-Al alloy. Edited by G. Torres Mexico, 1994
- 5.- Jonathan Efrén Mendoza Espino. "obtención y caracterización de compactos de zinalco obtenidos mediante metalurgia de polvos", Tesis de Licenciatura en Ing. en Ciencia de los Materiales Centro de investigaciones en Materiales y Metalurgia UAEH 2004.
- 6.- H Islas Vazquez "Caracterizacion de Compuestos de Matriz Metalica (CMM) base Zinalco" Tesis de Ingenieria en Materiales. Centro de investigaciones en Materiales y Metalurgia UAEH 2006
- 7.- Ing. Víctor Hugo Brocado Guerrero. "Estudio de las propiedades mecánicas de la aleación Zn-21%Cu reforzada con el intermetálico γ_2 del sistema Cu-Al". Tesis de Maestría en Metalurgia e Ingeniería de Materiales Instituto de Materiales UASLP 2004.
- 8.- Maria Teresa Martínez Martínez. "Efecto de la adición del intercambio δ (Cu-Sn) sobre las propiedades mecánicas de materiales compuestos base Zn-21%Al-2%Cu". Tesis de Maestría en Metalurgia e Ingeniería de Materiales Instituto de Materiales UASLP 2003.
- 9.- www.caterpillar.com. OEM Solution, "Powder Metal Parts".
- 10.- Randall M.German. "*Powder Metallurgy Science*", MPIF, 2 ED. New jersey, 1994.
- 11.- Bose, Animesh. "Advances in Particulate Materials". Butterworth-Heinemann, 1995.

- 12.- B.A. WILLIS. "Tecnología de Procesamiento de Minerales". ED. Limusa Noriega Editores 1994.
- 13.- G. Kelly, David J. Spottiswood. "Introducción al Procesamiento de Minerales". ED. Limusa Noriega Editores, pp. 87-95, 1990.
- 14.- ASM Handbook. Volumen 7, "Powder Metal Technologies and Applications". USA 1998.
- 15.- Joel S. Hirschhorn. "Introducción to Powder Metallurgy" APMI(American Powder Metallurgy Institute) 1969.
- 16.- Raymond A. Higgins. Tomo 1 Ingeniería Metalúrgica. "Metalurgia Física Aplicada" ED. Continental 1982.
- 17.- A.U. Seybolt, J.E. Burke. "Técnicas de Metalurgia Experimental" ED. Limusa Noriega Editores, pp. 302-313, 1969.
- 18.- John E. Nelly. "Metalurgia y Materiales Industriales" ED. Limusa Noriega Editores, pp. 303-313, 2002.
- 19.- Sydney H. Avner. "Introducción a la Metalurgia Física" ED. Mc Graw Hill 1994.
- 20.- Carl. A. Keyser. "Ciencia de Materiales para Ingeniería" ED. Limusa Noriega Editores, pp. 599-625, 1979.
- 21.- James P. Shaffer, Thomas H. Sanders Jr., Stephen D. Atolovich, Stephen B. "Ciencia y Diseño de Ingeniería de los Materiales" ED. Continental 2000.
- 22.- ASM Handbook. Volumen 4 9ª edición, "Heat Treating Metals" Metals Park, pp. 660-664, 1981.
- 23.- A. Bolarín, F. Sanches, A. Martínez, O. Coreño, J.A. Bas, J. Coreño. "STUDY OF THE LUBRICANT ELIMINATION PROCESS IN P/M COMPACTS: THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS AND CALORIMETRIC". EURO PM Valencia España 2003.
- 24.- www.epma.com About P/M, "An Introduction to P/M".
- 25.- A. A Muños Lasso "Estudio de las propiedades mecánicas de un compuesto con matriz Metálica (zinalco^{MR})" Tesis de Maestría en ciencias. Facultad de Ciencias. UNAM 1992.

- 26.-Elizabeth E. Martínez Flores. "Caracterización de compuestos zinalco-grafito y zinalco- hidroxiapatita, preparados por metalurgia de polvos." Tesis de Doctorado en Ciencias. Facultad de Ciencias. UNAM 1996.
- 27.- J. Negrete Sanchez."Extrusión en aleaciones Zn-Al-Cu." Tesis de doctorado en Ciencias. Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada, B.C. 1994
- 28.-Donald R, Askeland, Pradeep P. Phule. "Ciencia e Ingeniería De Los Materiales" , pp 292 2004
- 29.- Ana Maria Bolarín M. "Efecto de Variables Pulvimetalúrgicas en el Proceso de Compactación de Polvos Metálicos base Hierro" Tesis Doctoral Universidad de Barcelona 1999.
- 30.- G. Torres Villaseñor "Microestructura y propiedades mecánicas del Zinalco." Ciencia 1988.
- 31.- Martínez-Flores E, "Estructura y propiedades de compuestos de matriz de zinalco reforzado con partículas", Tesis de doctorado en ciencias UNAM-IIM, 1998.