



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

**FoDAMI**

## SINTERIZADO DE VIRUTA DE ALEACIÓN AZ91D

Milne R.<sup>\*1</sup>, Grinschpun L.<sup>1</sup>, Oldani C.<sup>1</sup>, Prudencio R.<sup>1</sup> y Schneiter M.<sup>1</sup>

<sup>\*1</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional del Córdoba  
Av. Vélez Sársfield 1611 Córdoba Argentina  
correo-e: rodrigomilne@hotmail.com

### RESUMEN

La viruta proveniente de los procesos de mecanizado de autopartes para la industria automotriz, fabricadas con aleaciones de magnesio AZ91D, presenta un problema de contaminación ambiental debido a los aceites refrigerantes adheridos a la viruta. El magnesio y sus aleaciones además, está declarado como material de alto riesgo debido a su alta inflamabilidad, dificultando su almacenamiento para procesos posteriores. En este trabajo proponemos un reprocesado de la viruta mediante técnicas de pulvimetalurgia, buscando la obtención de un material con características similares a la aleación de origen. Los ensayos mecánicos realizados a los materiales obtenidos, mostraron que los mejores resultados son obtenidos para temperaturas de sinterizado en fase sólido + líquido. A esta temperatura se produciría un cambio volumétrico de las partículas de polvo de la aleación que facilita la rotura de la capa de óxido que cubre a las mismas y que de otra manera, impide o dificulta la unión partícula--partícula.

Las muestras obtenidas fueron caracterizadas metalográfica y mecánicamente, determinando la resistencia a la compresión del material. Los tratamientos de sinterizado se realizaron a temperaturas de 500, 600 y 650°C, variando los tiempos de permanencia a las distintas temperaturas entre 1 y 4 horas. Se alcanzaron valores de resistencia mecánica de 115,7 MPa para las muestras sinterizadas a 600°C durante una hora, valor cercano al 30% de los valores de la aleación original (400 MPa) y un 50% en relación a la aleación refundida (325 MPa). La caracterización metalográfica muestra que el sinterizado a las menores temperaturas utilizadas en este trabajo, presenta un alto grado de porosidad el cual se traduce en pobres propiedades mecánicas.

**Palabras Claves:** *Magnesio, Aleación AZ91D, Viruta de mecanizado, Pulvimetalurgia, Sinterizado.*



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

En los años recientes, se está incrementando la demanda de magnesio especialmente en aplicaciones aeroespaciales y automovilísticas, básicamente debido a su bajo peso. La reducción de peso se considera la mejor opción para conseguir una disminución importante en el consumo de combustible y en la emisión de CO<sub>2</sub> [1].

Hoy ya se comercializan aleaciones livianas de magnesio para componentes automovilísticos y aeroespaciales como poleas automotrices, ruedas dentadas a cremallera de dientes, recubrimientos de bombas de aceite, camisas de cilindros y carcasas de motores de aeronaves [2]. Un estudio reciente revela 60 tipos diferentes de componentes en donde el magnesio es usado o se ha desarrollado para su uso, desde paneles de instrumentos hasta componentes de motores. Se ha predicho que el uso del Mg en partes de automóviles se incrementará globalmente a una tasa promedio del 15 % anual [3] en los próximos años.

Dentro de la amplia gama de aleaciones de magnesio, la aleación AZ91 D es uno de los materiales basados en Mg más utilizados porque exhibe excelentes propiedades mecánicas, muy por encima del magnesio puro [4]. Esta aleación contiene un 9 % nominal de aluminio y un 1 % de cinc. Una industria argentina de autopartes utiliza esta aleación para la fabricación de carcasas de cajas de cambio para automóviles. Del proceso de mecanizado se obtiene una gran cantidad de viruta contaminada con aceites refrigerantes de maquinado y que debido a su alta inflamabilidad, está declarada como material de alto riesgo, dificultando su almacenamiento.

Una forma de reciclar la viruta es utilizar procedimientos de fusión. Sin embargo, el mayor problema en la fundición de las aleaciones de magnesio es la baja o nula solubilidad de los elementos de aleación en Mg líquido. Así, cuando el material en forma de viruta se refunde, se modifican los contenidos de los elementos principales de aleación haciendo que la composición química de la aleación salga de norma [5].

En este trabajo se estudia otra manera de reciclar esta viruta, esto es, mediante técnicas de pulvimetalurgia. Se aprovecha la fragilidad característica del magnesio para moler la viruta a un polvo de granulometría muy fina y mediante prensado y sinterización, se busca obtener un material con propiedades mecánicas similares a la aleación original.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 2. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

En el presente estudio, el material de partida se presenta en forma de viruta, producto derivado de los procesos de mecanizado que se realizan en la industria automotriz para la fabricación de carcasas de cajas de velocidad.

Como primer paso, la viruta de aleación AZ91D se limpió por inmersión en baños con acetona, repitiendo la operación hasta lograr superficies libres de aceites y líquidos refrigerantes. Una vez limpia la viruta y previo a la operación de molienda, la viruta se colocó en desecador durante 24 horas con silica-gel para eliminar humedad de la superficie de la viruta. El proceso de molienda se realizó en atmosfera controlada (Argón de alta pureza), durante un tiempo de 1 hora de molienda para cada fracción de viruta, utilizando una relación de molienda de 400 a 1. El polvo resultante fue tamizado para separar las partículas de material con granulometrías en el rango de 177  $\mu\text{m}$  - 250  $\mu\text{m}$ . Los verdes para sinterizado se obtuvieron por compactación de los polvos. El proceso se realizó usando una matriz cilíndrica de 8 mm de diámetro. Para la compactación se utilizaron dos métodos de aplicación de carga: 1.- Cargas uniaxiales aplicadas en el material mediante un embolo (efecto simple) y 2,- Cargas uniaxiales aplicadas mediante dos émbolos (efecto doble). Las presiones de compactación de las probetas en verde utilizadas en todo el estudio fueron de 293 MPa a 586 MPa. Para la determinación de las variables del proceso de sinterizado se adoptó primeramente una presión de compactación de 488 MPa. El tratamiento térmico de sinterizado se llevó a cabo en atmosfera de argón de alta pureza con tres temperaturas de tratamiento: 500°C, 600°C y 650°C. Para los ensayos a 500 °C se varió el tiempo de ensayo de 1 a 4 hs, mientras que para las otras temperaturas se adoptó un tiempo de sinterizado de 1 hs. Las pastillas sinterizadas fueron ensayadas en compresión con velocidad de aplicación de carga de 0.5 mm/min con el fin de determinar los valores de tensión de rotura ( $\sigma_{\text{Max}}$ ). Por último se realizó el estudio de porosidad remanente mediante análisis digital de imágenes metalográficas.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la serie de probetas obtenidas por sinterizado con una presión de compactación de 488 Mpa, utilizando polvos con tamaño de partículas en el rango de 177 a 250  $\mu\text{m}$  el ensayo de compresión de las distintas probetas, arrojó los resultados mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resistencia a la compresión para probetas sinterizadas en distintas condiciones

Tamaño de partícula: 177 – 250 $\mu\text{m}$ Compactación: 488 MPa (Fuerza aplicada 24500N).		
Temperatura de sinterizado [°C]	Tiempo [hs]	Resistencia mecánica a la compresión [MPa]
500	1	33.3
	4	19.1
600	1	116.1
650	1	232.9

El modo de rotura en las probetas sinterizadas a 500 °C observado durante la realización de los ensayos de compresión, indica que en estas probetas no se completó el proceso de sinterizado en toda la masa de las mismas, ya que a pesar del aspecto brillante y de la consistencia al tacto que presentaban al ser retiradas del horno, durante el ensayo las probetas se desmoronaban y el material quedaba con una coloración y consistencia similar al del polvo antes de ser prensado.

En las probetas obtenidas por sinterizado realizados a 650 °C con 60 minutos de permanencia en el horno, cuando eran retiradas de la cámara del horno se observaron restos de material (polvo brillante) adherido a las paredes de la cámara y también sobre las probetas. Esto hace suponer que durante el proceso de sinterizado parte del material se habría sublimado modificando la composición de la aleación ya que serían los elementos de menor punto de fusión de la aleación los que primero volatilizarían (Ver diagrama de fase Mg-Al (6)). Esto motivó el descarte de esta temperatura de sinterizado a pesar de la buena performance mecánica observada en los ensayos de compresión.

La combinación de resultados obtenidos en los ensayos de compresión, realizados a probetas obtenidas en tratamiento térmico de sinterizado a 600°C y 60 minutos de permanencia a temperatura en horno, permitió determinar una técnica de obtención de material aprovechable para el reciclado de la viruta de aleación de magnesio AZ91D. En el proceso indicado se



obtuvo un material con propiedades mecánicas aptas para usos biomédicos. En la Figura 1, la gráfica muestra la variación en las propiedades mecánicas de los productos sinterizados donde se indican los valores promedio de los ensayos realizados, en cuanto a las resistencias mecánicas a compresión para cada grupo de probetas ensayadas.

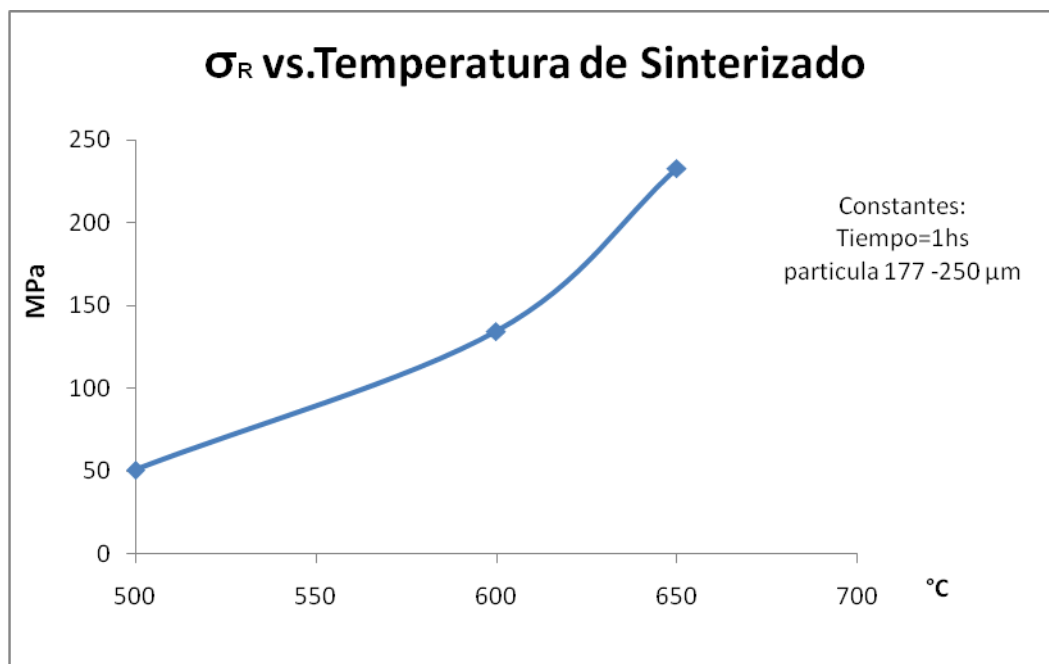


Figura 1. Resistencia a la compresión para las distintas temperaturas de sinterizado.

El estudio metalográfico mostró que en el sinterizado de muestras a 600 °C, las probetas poseen una porosidad intrínseca alta (30% a 40% en promedio). Para evaluar la dependencia de las propiedades mecánicas de las muestras obtenidas en estas condiciones de sinterizado, es que se estudió el modo en que afecta al material sinterizado el modo de compactación. Primeramente se modificó la presión de compactación, sinterizando las muestras a 600°C durante 60 minutos. Una vez sinterizadas se determinó la porosidad mediante métodos ópticos.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

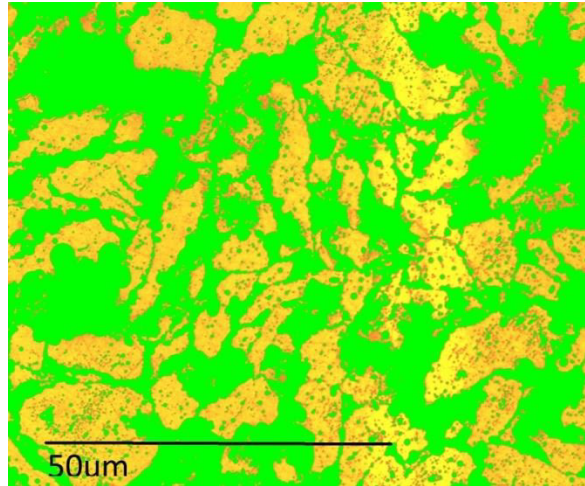


Figura 2. Probeta compactada a 390 Mpa. Aumento X100.  
Microscopio Óptico Leika con sistema de captación de imágenes.

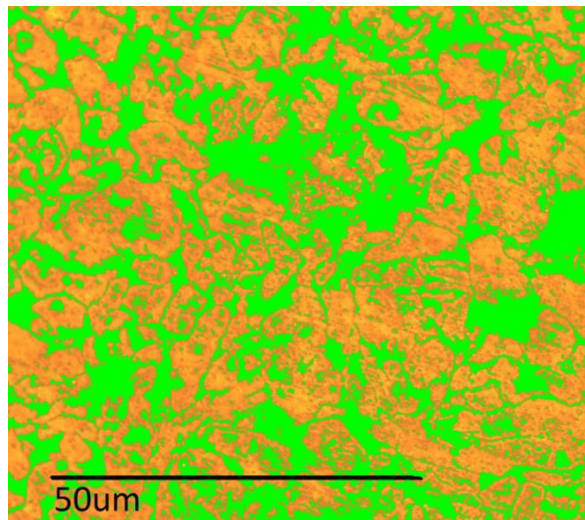


Figura 3: Probeta compactada a 488 Mpa. Aumento X100  
Microscopio Óptico Leika con sistema de captación de imágenes.

En la Figura 2 se muestra una micrografía de una probeta cuyo verde fue compactado con una presión de 390 MPa y en la figura 3 se muestra una probeta cuyo verde fue compactado con una presión de 488 MPa. El tratamiento digital de las imágenes de las micrografías permite resaltar en color verde el área ocupada por poros.

Los resultados obtenidos se indican en la Figura 4, donde se observa una disminución creciente del porcentaje de la superficie porosa en las muestras sinterizadas a medida que aumenta la presión de compactación, con valores de porosidad sin grandes modificaciones para las muestras obtenidas con presiones de compactación más elevados.

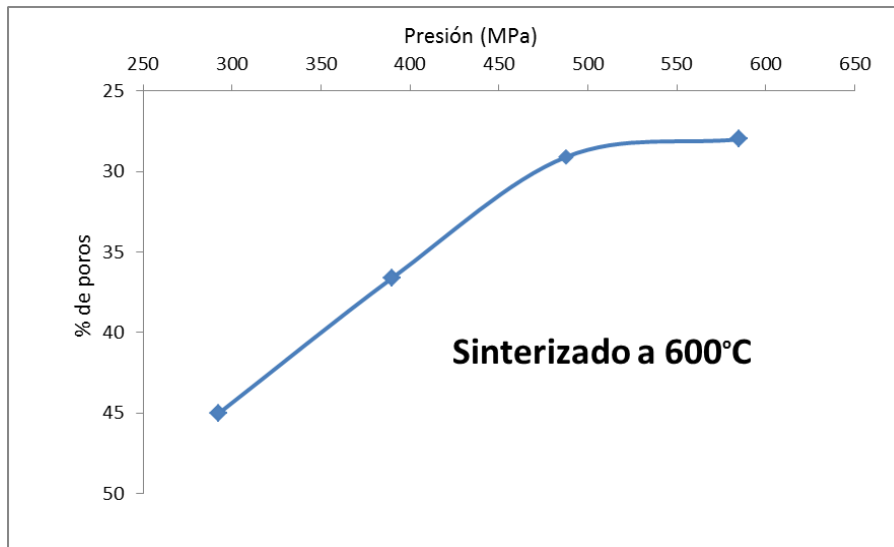


Figura 4. Variación de la porosidad luego del sinterizado para diferentes presiones de compactado

Otra de las variables estudiadas en las técnicas de compactación fue el modo de compactación utilizando matrices de simple efecto y de doble efecto, manteniendo las condiciones del tratamiento térmico: sinterizando a 600°C durante 60 minutos. La respuesta mecánica de las probetas a la compresión se indica en la Figura 5, la que muestra la variación en la resistencia a la compresión de las probetas obtenidas por uno y otro método de compactación. La tendencia de aumento lineal en la respuesta mecánica de las probetas sinterizadas aplicando cargas uniaxiales con doble efecto a medida que aumenta la fuerza de compactación, indica una homogeneidad en el material obtenido por sinterizado que podría atribuirse a una mejor distribución en las presiones de compactación de los polvos en el interior de la matriz.

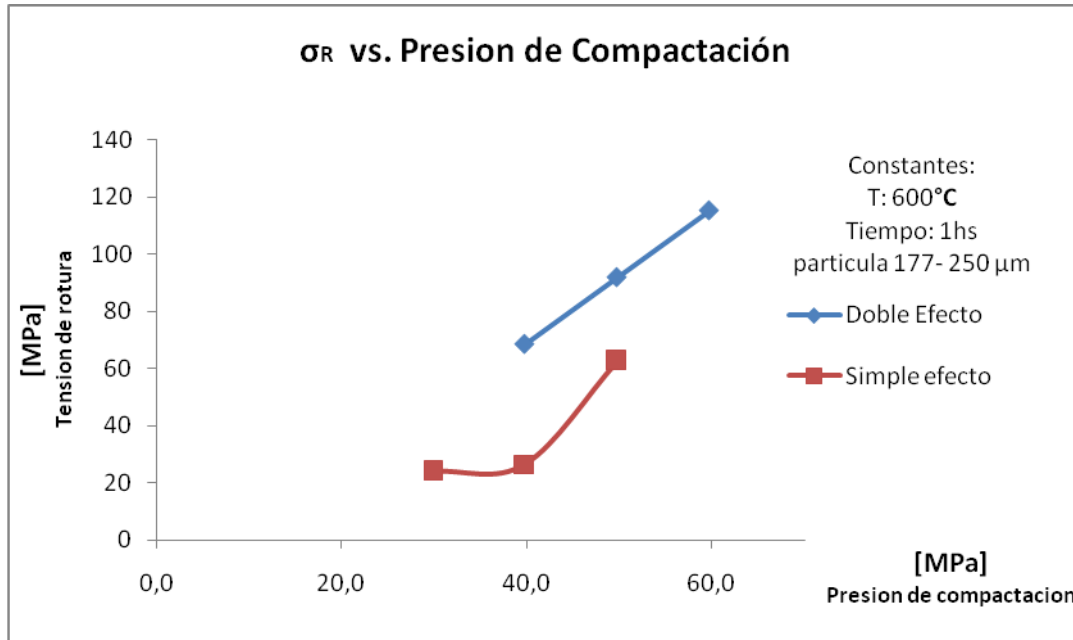


Figura 5. Resistencia mecánica de compresión para los distintos métodos de compactación

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de AZ91D reciclado de la industria automotriz en forma de viruta luego de sinterizados bajos diversas condiciones, con el fin de encontrar la temperatura, el tiempo, la presión de compactación y el método de prensado de la pastilla en verde necesarias para lograr mejoradas propiedades mecánicas. Encontramos, a partir de ensayos de compresión, que tiempos de sinterizado largo empeoraban la resistencia a la rotura. Con respecto a la temperatura de sinterizado, logramos fijar una temperatura de sinterizado a 600°C grados, donde una de las fases se encuentra en estado líquido. Temperaturas más bajas produjeron resistencias mecánicas significativamente más bajas, mientras que temperaturas altas arrojaron valores más altos de resistencias, pero fueron descartados debido a que se observó material sublimado y depositado en las paredes de la cámara. El análisis de la carga de compactación mostró, como era esperado, que mayores cargas producen incrementos de la tensión de rotura resultando un comportamiento lineal. Finalmente, a partir del análisis de las imágenes microscópicas se pudo determinar la porosidad superficial, demostrando la dependencia entre la tensión de rotura y la carga de compactación.





# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 4. REFERENCIAS

- [1] E. Aghion, B. Bronfin, D. Eliezer, The role of magnesium industry in protecting the environment, J. Mater. Process. Technol., 117, 381-385, 2001
- [2] Q. Guan, H. Wang, X. Li, Q. Jiang, Nanotoxicity from in vivo and in vitro models to health risks, J. Mater. Sci. 39, 5569-5575, 2004
- [3] D. Magers, J. Brussels, Magnesium Alloys and Their Applications, Mordike B., Kainer K. (Editores), Germany 1998, 105
- [4] X. Zhang., H. Wang, L. Liao, X. Teng, N. Ma, The mechanical properties of magnesium matrix composites reinforced with (TiB<sub>2</sub> + TiC) ceramic particulates, Materials Letters 59, 2105-2108, 2005
- [5] R. Lucci, Reciclado de magnesio: recuperación de la aleación AZ91D a partir de virutas de mecanizado y evaluación de sus propiedades, Tesis Doctoral, FCEfYN – Universidad Nacional de Córdoba, 2014
- [6] ASM Handbook Committee (1986). Binary alloys phase diagrams, Metals Park, ISBN: 0-87170-261-4, Ohio

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la SECyT de la Universidad Nacional de Córdoba por financiar el Proyecto mediante el Subsidio Res.N° 162/12