

# Diseño experimental para evaluar la influencia del aleante en la resistencia mecánica de una aleación de magnesio

---

## **Tania Montoya**

Estudiante Ingeniería Industrial, estudiante del Semillero sobre nuevos materiales (Sinuma).  
tania.montoya@upb.edu.co

## **Kelly Carmona**

Estudiante Ingeniería Industrial.

## **Leydi Sarmiento**

Estudiante Ingeniería Industrial.

## **Laura Lotero**

Ingeniera industrial, M.Sc. en Ingeniería de Sistemas área Investigación de Operaciones, Ph.D. en Ingeniería. Docente asociada de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UPB sede Medellín. Docente investigadora adscrita al grupo de investigación de Sistema Aplicados a la Industria, Gisai.

## **Patricia Fernández-Morales**

Ingeniera metalúrgica, M.Sc. en Ingeniería área Materiales, Ph.D. en Ingeniería área Energía y Termodinámica. Docente titular de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UPB sede Medellín. Docente investigadora adscrita al grupo de investigación sobre Nuevos Materiales, Ginuma.

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

## Resumen

---

El diseño de experimentos permite analizar el efecto de los diferentes niveles de una variable de entrada de un proceso en la variable respuesta o de salida. En este estudio se hace un diseño de experimentos para evaluar los efectos del aleante de una aleación de magnesio en su resistencia mecánica. Para esto, se hace un diseño de un solo factor y se prueban tres aleantes con respecto a la aleación madre. Los resultados muestran que, contrario a lo supuesto inicialmente, aleantes como el estroncio disminuyen estadísticamente la resistencia mecánica de la aleación de magnesio. Finalmente, se discuten los resultados y la validez del modelo.

## Palabras clave

Aleación de magnesio, diseño experimental, resistencia mecánica.

## Abstract

---

The design of experiments allows to analyze the effect of the different levels of an input variable of a process in the response variable. In this study, it is presented a design of experiments to assess the effect of the alloying in the mechanical resistance of a magnesium alloy. In order to do so, a one single factor design is proposed and 3 alloying besides the mother alloy are tested. Results show that, contrary to the initial belief, alloying such as strontium reduce statistically the mechanical resistance of the magnesium alloy. Finally, the results and the validity of the model are discussed.

## Keywords

Magnesium alloy, experimental design, mechanical resistance.

## Introducción

Se denominan aleaciones ligeras a aquellas que tienen como elemento base el magnesio. Estas tienen como característica principal un bajo peso específico de  $1,74 \text{ g/cm}^3$ , lo que las hace indispensables en aplicaciones donde se necesiten materiales muy ligeros con una resistencia mecánica mínima (específicamente en el campo de la aeronáutica y la automoción).

Dicha resistencia mecánica puede aumentarse sensiblemente mediante aleaciones adecuadas, dando como resultado una alta relación resistencia - peso. Entre los aleantes más comunes se encuentran el aluminio (Al) y el zinc (Zn). (Ordoñez J. José, 2012).

Actualmente, el principal problema en el sector del transporte, es el elevado consumo de combustible debido al uso de materiales muy densos, generando así un mayor consumo por peso. Por ello se plantea la necesidad de desarrollar nuevos materiales que cumplan con características de bajo peso y alta resistencia mecánica, ya que su aplicación requiere esencialmente de esta condición (F. Czerwinski, 2007).

El desarrollo de la industria del magnesio se ha incrementado en las últimas dos décadas en países como China, ya que las nuevas aleaciones poseen resistencia mecánica, propiedades térmicas y propiedades eléctricas similares a las aleaciones de aluminio, lo que ha conducido a la implementación de piezas fabricadas de aleaciones de magnesio, sustituyendo así las de metales tradicionales. En la actualidad la fabricación de piezas en aleaciones de magnesio se dificulta debido a la obtención de un proceso de conformación plástica que garantice tener óptimas propiedades mecánicas (Ordoñez J. José, 2012).

En la sección 2 de este artículo se presentan los antecedentes reportados en la literatura; luego en la 3 los materiales y métodos, donde se hace una breve explicación del diseño de experimentos usado para realizar la investigación y se describe brevemente el ensayo de tracción usado para medir la resistencia mecánica. La sección 4 presenta los resultados y el análisis del diseño de experimentos. Finalmente, la sección 5 muestra las principales conclusiones de este estudio.

## Antecedentes

En la literatura no se encontraron estudios que investiguen, en concreto, la influencia de aleantes secundarios en la aleación de magnesio por medio de un diseño experimental, sin embargo, existen algunas investigaciones relacionadas con el tema en cuestión.

Con respecto al reforzamiento de aleaciones de Mg, Hassan y M. Gupta (2001) reportaron el desarrollo de un material compuesto a base de magnesio con refuerzo de cobre, donde se correlaciona el efecto del cobre en las propiedades microestructurales y mecánicas del magnesio. En este estudio se logró un aumento en la dureza, el módulo elástico y la resistencia a la fluencia, gracias a la presencia del cobre, aunque la ductilidad se vio afectada de manera adversa.

En otro estudio, Hassan y M. Gupta (2002), crearon materiales compuestos de magnesio dúctil utilizando refuerzo de titanio, con el objetivo de correlacionar el efecto del titanio como refuerzo y sus cantidades cada vez mayores con las propiedades microestructurales, físicas y de tracción del magnesio. La adición de titanio como refuerzo mejoró la estabilidad dimensional del magnesio puro y condujo a una mejora de la resistencia a la fluencia y la ductilidad, mientras que la resistencia última fue afectada de manera contraria.

Por otro lado, se ha discutido la recristalización y la textura de la aleación de magnesio, zinc y cerio, por medio de la caracterización de las microestructuras y las texturas de bruto de laminación y recocido de Mg-1Zn y Mg-1Zn-XCE, donde el Mg-1Zn exhibió texturas basales con la adición de cerio.

De lo anterior, el objetivo principal de la investigación es determinar en las aleaciones Mg-Al-Zn como aleación madre, cual es la influencia del Si, Mn o Sr como aleante secundario en la resistencia mecánica o, en otros términos, la capacidad del material metálico para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse (Timoshenko, 1976).

Para determinar el efecto del tipo de aleante se hará uso del análisis de varianza (Anova), en el cual se utilizará un modelo de efectos fijos. Este tipo de información sobre la aleación de Mg se requiere específicamente para la fabricación de piezas metálicas estampadas o embutidas, usadas en la industria aeronáutica y automotriz de nuestro país.

## Materiales y métodos

El diseño de experimentos puede definirse como una prueba o una serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida y así determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia sobre dicha respuesta. El diseño de experimentos está basado en el análisis de varianza (Anova, del inglés *Analysis of Variance*), se usa para estudiar el desempeño de procesos y sistemas. (Montgomery, 2004)

Para la realización de un diseño de experimentos se deben tener en cuenta los factores que influyen en el proceso o sistema y la interacción entre estos, dependiendo de la cantidad de factores influyentes y la interacción entre estos se escogerá el diseño de experimentos que mejor se ajuste al proceso o sistema. Entre los principales diseños de experimentos están los diseños de un solo factor, los factoriales y los diseños  $2^k$  (Montgomery, 2004).

En este estudio se realizó un diseño de efectos fijos, ya que se tiene como único factor el tipo de aleante, el cual cuenta con cuatro niveles definidos, que son silicio (Si), manganeso (Mn) y estroncio (Sr), además de la aleación madre. Se usa este tipo de diseño experimental ya que solo es de interés analizar el efecto del aleante en la resistencia mecánica y no se tendrán en cuenta otras variables.

Para realizar el experimento, se fabricaron en total 12 microprobetas, tres microprobetas de la aleación madre (Mg, Al y Zn) y tres microprobetas de la aleación madre con cada uno de los aleantes secundarios: Si, Mn y Sr. Las dimensiones de las microprobetas (en mm) se muestran en la figura 1, y están dadas como una escala de una probeta bajo norma ASTM E8 (Ver figura 1)

Para la medición de la resistencia mecánica de las microprobetas de Mg, se realizó un ensayo de tracción utilizando la máquina universal de ensayos Instron 5582, a una velocidad de carga de 5mm/min. Se realizaron las mediciones de la resistencia mecánica en MPa para cada microprobeta de determinada composición y se obtuvieron los datos que se observan en la Tabla 1.

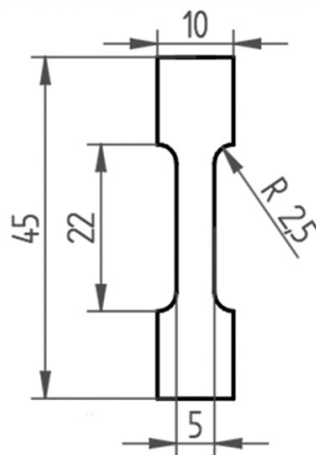


Figura 1. Dimensiones de las microprobetas en mm.

Tabla 1. Resistencia mecánica medida en MPa.

Aleación	Probetas		
	1	2	3
Madre (Al-Zn-Mg)	155,19	164,51	151,6
Silicio (Si)	137,42	128,11	127,34
Manganeso (Mn)	174,49	142,37	152,33
Estroncio (Sr)	117,17	134,17	108,07

Para el análisis de varianza (Anova) se usó el programa estadístico R. (R Core Team, 2012). Se complementa el análisis de varianza (Anova) con pruebas de Tukey, diagramas de caja y validación de supuestos, para finalmente concluir sobre los efectos de los aleantes en la aleación de Mg-Al-Zn.

## Resultados y discusión

Para poder realizar un análisis adecuado de los datos, es necesario realizar diferentes pruebas de diagnóstico, tales como: prueba de normalidad de Shapiro Wilk,

medias y desviaciones de los datos. El análisis de varianza (Anova) y gráficos de estadística descriptiva como los diagramas de caja o *boxplot* que hacen parte del análisis.

En la Figura 2 se muestran los diagramas de caja de la resistencia mecánica según el tipo de aleante. Se puede ver que los tipos de aleante estroncio y silicio, presentan una disminución estadísticamente significativa de la resistencia mecánica del material, con respecto a la aleación madre.

Dentro de las pruebas de normalidad que se realizaron, para validar el uso de un diseño de efectos fijos, están los gráficos de probabilidad normal cuantil-cuantil (Q-Q) en la figura 3 y la prueba de *Shapiro-Wilk*.

A partir de la Figura 3 se puede decir que los puntos están muy cercanos a la línea de normalidad, así que los datos y sus residuos se pueden asumir normales. Siendo así, se valida el supuesto de normalidad. Adicionalmente, se corrobora usando la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk*. (Montgomery, 2004).

A un nivel de significancia de 0,05 se realiza una prueba *Shapiro-Wilk* en la que la hipótesis nula  $H_0$  es que los datos son normales. Se obtiene un estadístico  $W=0.9868$  con un valor  $p$  de 0.9984, por tanto, con base en los datos no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que quiere decir que los datos provienen de una población normal con un nivel de confianza del 95%.

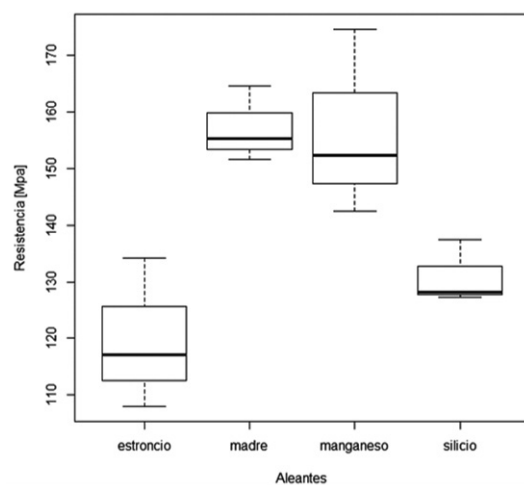


Figura 2. Diagrama de caja de la resistencia mecánica por tipo de aleante.

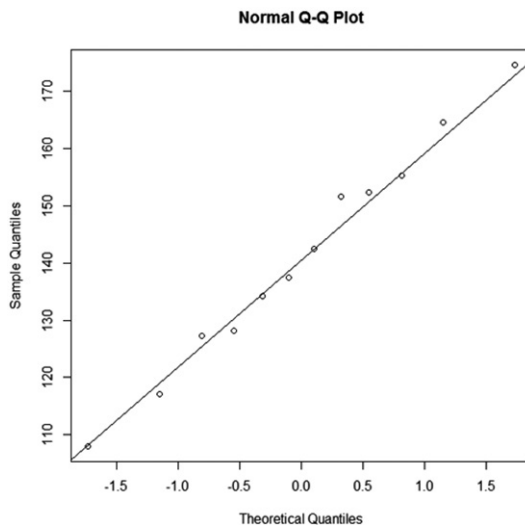


Figura 3. Gráfico de probabilidad normal.

En la Tabla 2 se presentan la media y desviación estándar de la resistencia mecánica medida para las diferentes réplicas por cada tipo de aleante. De la Tabla 2 se concluye que las medias para la resistencia mecánica más parecidas son las de la aleación madre y aleación con manganeso. Esto quiere decir que la resistencia mecánica posiblemente sea muy parecida para las dos aleaciones. En general, la aleación con estroncio presenta menor resistencia mecánica promedio.

Además, se presentan los datos de desviación estándar que indican la dispersión de los datos con respecto a la media. El aleante silicio muestra menor dispersión de los datos, seguido de la aleación madre. Esto quiere decir que los resultados acerca de la resistencia mecánica, tomados en el ensayo de tracción, se encuentran en un intervalo menor y se puede saber con más certeza cuál es el valor verdadero de la resistencia mecánica para estos aleantes.

Tabla 2. Estadísticas de resistencia mecánica.

Aleante	Promedio(MPa)	Desviación estándar (MPa)
Madre	157.100	6.663
Silicio	130.957	5.611
Manganeso	156.397	16.442
Estroncio	119.803	13.248

Se realiza el Anova de un solo factor para la variable respuesta y el factor, mostrados en la Tabla 3. Con la hipótesis  $H_0$ : la resistencia mecánica promedio es igual para todos los aleantes vs  $H_1$ : algún par de medias de la resistencia mecánica son diferentes, con un nivel de significancia de 0.05 y un valor p de 0.00852, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , es decir, que existe una diferencia significativa en la resistencia mecánica promedio entre algún par de aleantes, por ende el tipo de aleante sí tiene efecto en la resistencia mecánica de la aleación ligera de magnesio.

Tabla 3. Análisis de varianza de un factor (tipo de aleante) para la resistencia mecánica.

Fuente	SS	GL	MS	Fo	Valor P
<b>Aleante</b>	3139	3	1046,4	8,023	0,00852
<b>Error</b>	1043	8	130,4		

Como se concluyó que hay diferencias entre los efectos del factor, ahora se quiere conocer qué tratamientos en concreto son diferentes entre sí. Se realiza la prueba de Tukey al 95% de confianza con el objetivo de saber cuáles tratamientos difieren significativamente.

En la Tabla 4 se observa que a un nivel de confianza del 95% para las diferencias de medias entre madre-estroncio y silicio-manganeso, las medias son diferentes, ya que como se puede observar en la Tabla 4 el valor p es menor que el nivel de significancia, por lo que se rechaza la hipótesis de que la resistencia mecánica promedio es igual para estos pares de aleantes. Por tanto, con un 95% de confianza, según la prueba Tukey (Tabla 4) se puede decir que las medias que son significativamente diferentes entre sí son aleación madre-estroncio (madre-Sr) y manganeso-estroncio (Mn-Sr).

Tabla 4. Resultados de la prueba Tukey para diferencia de medias.

Aleantes	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p
Madre-Sr	37,296	7,435	67,157	0,0166
Mn-Sr	36,593	6,732	66,454	0,0184
Si-Sr	11,153	-18,707	41,014	0,645
Mn-Madre	-0,703	-30,564	29,157	0,999
Si-Madre	-26	-56,004	3,717	0,087
Si-Mn	-25	-55,301	4,421	0,097

Finalmente, se hace la validación de supuestos con gráficos de diagnóstico del modelo para verificar que las conclusiones del diseño experimental sean válidas.

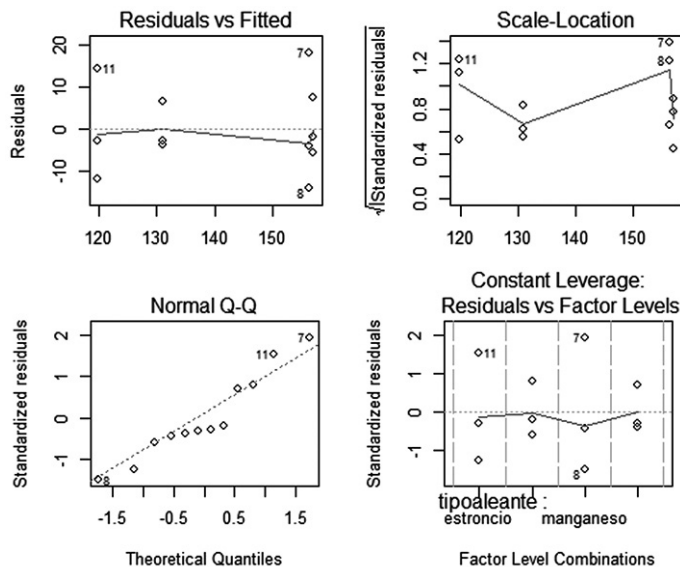


Figura 4. Gráficas de diagnóstico del diseño experimental.

Se puede observar en el Gráfico de normalidad de la Figura 4 (panel Normal Q-Q), una desviación en la distribución de los residuales, pero esto requiere ser comprobado con la prueba de normalidad Shappiro Wilk, la cual acepta la hipótesis nula, por lo tanto, se trata de una distribución normal. Respecto al gráfico de residuales vs ajustados (primer panel), se puede decir que no existe un patrón específico. Además, se observa una pequeña tendencia a la expansión de los residuales, lo que podría indicar la existencia de una varianza no constante en los datos. Este resultado debe analizarse con más detalle porque puede afectar la validez de los resultados.

Esta investigación, en teoría, arrojó resultados no esperados, ya que el objetivo de agregar cada uno de los aleantes era aumentar la resistencia mecánica y esto no fue lo observado en el análisis de varianza. Lo anterior también pudo verse afectado por la forma de fabricación de las microprobetas y los elementos traza que pueden contener estas; después de realizar el ensayo de tracción, las microprobetas fueron caracterizadas metalográficamente, donde se pudieron observar poros e impurezas en cada una de las aleaciones obtenidas, lo cual influye de manera determinante en la resistencia mecánica.

Otra razón para que aumente el error del modelo y se presente una varianza no constante en la validación de supuestos, puede estar relacionado con las pocas mediciones de resistencia mecánica realizadas (cuatro por cada tipo de aleante), por lo que queda planteado como trabajo futuro obtener un mayor número de datos, en lo posible, para reducir el error y aumentar la confiabilidad y validez de los resultados. Sin embargo, es de anotar que obtener muestras adicionales es difícil debido al alto costo del magnesio y sus aleaciones, así como el de la obtención de las probetas necesarias para el experimento.

## Conclusiones

---

Se concluye que en materiales metálicos base magnesio-aluminio-zinc aleados con silicio, manganeso o estroncio, la resistencia mecánica no aumenta, por el contrario disminuye e incluso llega a ser menor que los valores de resistencia de la aleación madre.

Los tipos de aleantes utilizados no son los adecuados para conformar el material que se quiere obtener para la aplicación específica, por lo que se sugiere buscar otro tipo de aleantes.

## Agradecimientos

---

Al profesor Emigdio Mendoza de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana por facilitar la información y toda la recolección de datos de forma organizada y concreta.

## Referencias

---

1. F. Czerwinski. (2007). Magnesium Injection Molding. Ontario Canada: Husk Injection Molding systems Ltd.

2. Hassan y M. Gupta. (2001). Development of a novel magnesium – copper based composite with improved mechanical properties, *Materials research bulletin* **37**, 377-389.
3. Hassan y M. Gupta. (2002). Development of ductile magnesium composite materials using titanium as reinforcement, *Journal of Alloys and Compounds* **345**, 246–251.
4. L.W.F Mackenzie y M.O. Pekguleryuz. (2008). The recrystallization and texture of magnesium-zinc-cerium alloys. *Scripta Materialia* **59**, 665–668.
5. Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*, segunda edición., Limusa, México.
6. Ordoñez J. José (2012) Magnesio: El Material más Ligero de la Metalmecánica, metal actual, 25, 22-26.
7. R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, recuperado de <http://www.R-project.org/>.
8. Timoshenko, S. (1976). *Strength of Materials*, 3rd ed., Krieger Publishing Company.