

## Caracterización, control y mejoramiento de un proceso de fabricación de balatas

Héctor Bautista<sup>1</sup>, Manal Shaker<sup>2</sup>, Noé Alba Baena<sup>1</sup>, Lázaro Rico<sup>1</sup>, Rodrigo Ríos Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

<sup>2</sup>Drexel University

### Resumen

Este proyecto fue realizado con la intención de estructurar y aplicar una metodología basada en el método de ingeniería para la reducción de desperdicio (scrap) en un proceso de manufactura de balatas. Se llevaron a cabo cambios de proceso y formulación basados en una ideología de mejora continua. La metodología fue diseñada con la particularidad de la situación tratada, sin embargo a su vez la hace flexible para aplicarse a situaciones con un corte distinto. Se realizó la caracterización de cada situación, para entenderla mediante su medición, analizarla y al final generar una propuesta de solución, empleando herramientas estadísticas, morfología de materiales, dinamómetro, técnicas informáticas y de procesos. Logrando con ello particularmente la reducción del porcentaje de desperdicio, generando un mayor impacto positivo en el flujo monetario. Este proyecto logró conseguir el objetivo base, pero adicionalmente los cambios realizados generaron un mejoramiento del producto. En conclusión se cumplió con el objetivo propuesto sabiendo que el principal defecto es de carácter cosmético, sin embargo es imperativo minimizarlo.

**Palabras clave:** Balatas, mejora continua, dinamómetro, morfología, formulación.

### Introducción

A lo largo de este artículo se muestra el desarrollo escrito que justifica el proyecto realizado en un proceso de manufactura inmerso en el área automotriz, de manera directa y particular en el sistema de frenado. El producto que se manufactura son pastillas de freno (balatas) y son moldeadas mediante un proceso llamado “Moldeo positivo”. La problemática abordada está estrechamente relacionada a la ideología de

manufactura esbelta, los ocho desperdicios, prestando especial atención a la calidad que presenta el proceso y a la serie de acciones derivadas en consecuencia. En un comienzo se realizó un análisis para ponderar las principales consecuencias de la baja calidad. En la figura 1 se aprecia que el defecto que impacta mas es Porosidad Superficial y este proyecto va conducido a reducirlo.

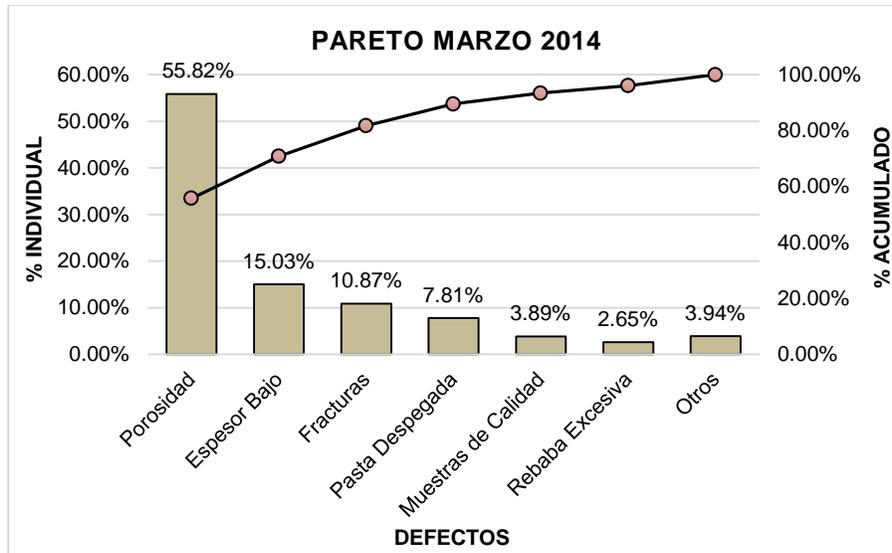


Figura 1. Diagrama de Pareto del periodo Marzo 2014.

El proceso cuenta con materia de transformación para consolidar el producto, esta materia se conoce como formulación la cual puede ser de dos tipos, cerámica y semi-metálica, donde el defecto que se buscó reducir se encuentra presente en

ambas formulaciones. En la figura 2 se muestra el comportamiento inicial del desperdicio con un porcentaje estimado promedio de 6.1% (1.68% ~ 9.11%) equivalente a \$5,280.00 (\$1606.25~\$21,668.50) USD diarios.

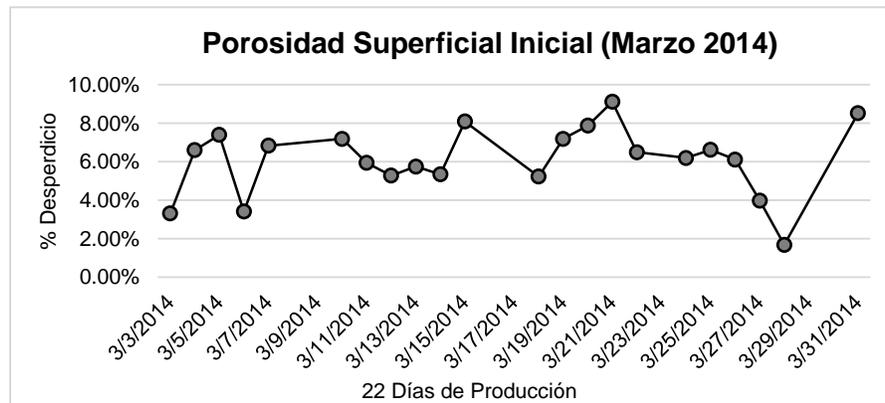


Figura 2. Comportamiento Porcentual del Defecto Principal.

La principal diferencia interna entre la fórmula cerámica y semi-metálica es la fibra de cobre y de acero respectivamente. Las fibras se encargan de reforzar mecánicamente el material de fricción,

disminuyendo el desgaste e incrementando la estabilidad termal (Chan & Stachowiak, 2004), por otro lado el tipo de fibra, la morfología y dureza pueden afectar la fricción y desgaste del material (Solomon &

Berhan, 2007). El concepto de Porosidad se entiende como el volumen relativo de la proporción de cavidades en el material, sin embargo este defecto es visual y se considera como rugosidad superficial excesiva. Autores establecen que los poros incrementan la rugosidad de los materiales y decrece el área real de contacto entre dos superficies de deslizamiento, consecuentemente incrementa la presión de contacto y promueve el desprendimiento de las partículas durante el deslizamiento (Gyimah, Chen, & Huang, 2013). La rugosidad influye el daño superficial mostrando algunos agujeros (falta de material), y en consecuencia se obtiene distintos resultados en rugosidad como también el factor de desgaste se ve influenciado por la topografía superficial (Razimi, Lazim, Kameil, & Hamid, 2012)

Tabla 1. Desglose Monetario de Defectos.

Periodo	Defecto	Pérdida Monetaria.
Marzo	Porosidad.	\$63,540.00
	Espesor Bajo.	\$17,105.00
	Fracturas.	\$12,378.00

Pasta Despegada.	\$ 8,890.00
Muestreo de Proceso.	\$ 4,423.00
Rebaba Excesiva.	\$ 3,020.00
Otros.	\$ 4,480.00

Debido a lo antes mencionado el problema es relevante para desarrollarse, ya que existe pérdida monetaria importante, esto puede constatarse a través de los datos históricos obtenidos y resumidos en la tabla 1.

El objetivo es reducir el porcentaje de residuo (Scrap) en balatas que presentan porosidad superficial de 6.1% a un 1.1%.

$H_0$ : No es posible reducir el porcentaje de residuo (Scrap) en balatas que presentan porosidad superficial de 6.1% a 1.06%.

$H_1$ : Es posible reducir el porcentaje de residuo (Scrap) en balatas que presentan porosidad superficial de 6.1% a 1.06%.

$$H_0: \mu_1 = 6.1\%$$

$$H_1: \mu_2 < 6.1\%$$

## Metodología

La metodología propuesta consta de un análisis de la situación inicial describir en términos claros el problema desde una perspectiva general avanzando hasta lo específico y concluir con el objetivo. Una

vez concluido lo anterior se inició formalmente actividades de metodología con un ciclo de mejora ubicado en la sección izquierda del diagrama presentado en la figura 3.

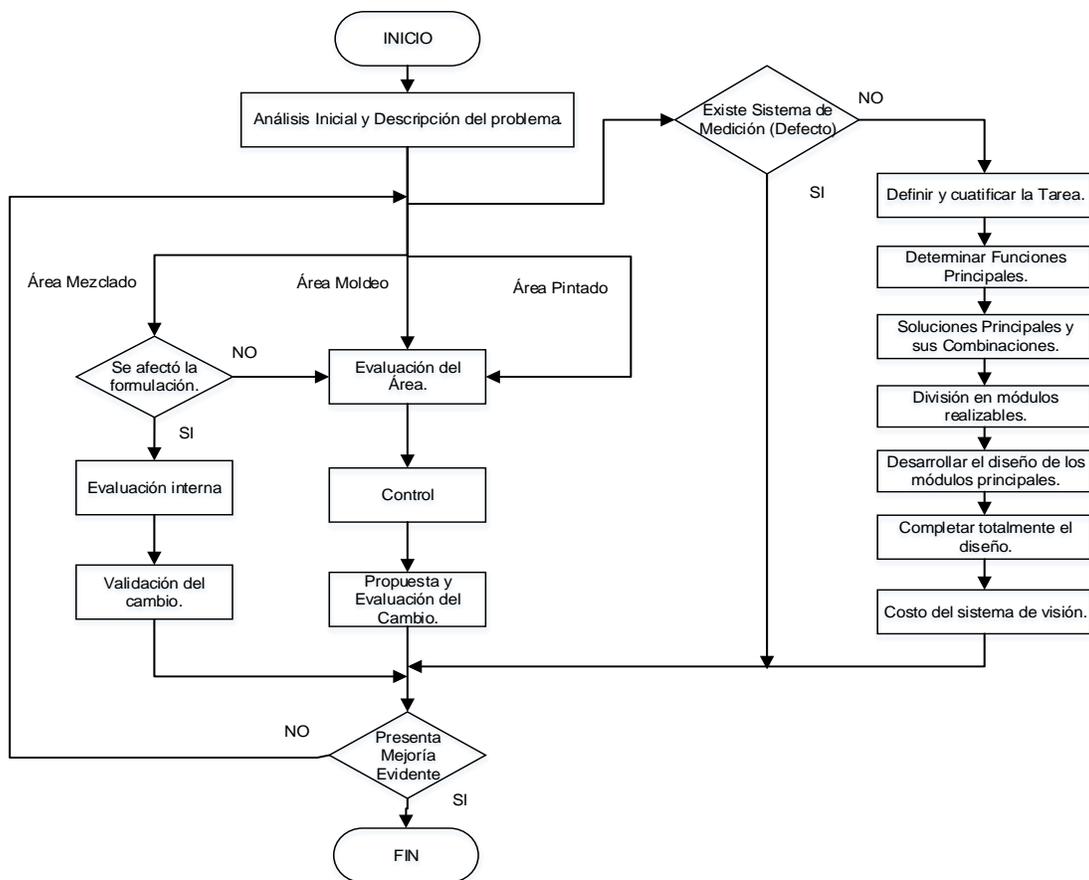


Figura 3. Diagrama de Flujo de la Metodología Propuesta.

Se realizó una ubicación de áreas de oportunidad para evaluarse en base a un diagrama causa y efecto del cual se obtuvieron las acciones que se llevaron a cabo. La metodología está diseñada para seguir una ideología de mejoramiento continuo comenzado con un análisis para caracterizar la problemática a evaluar, seguido de su control para después establecer una propuesta de mejora y terminar el ciclo con una evaluación del cambio realizado. En específico el área de mezclado requiere de un tratamiento distinto, evaluando los cambios realizados en el compuesto de materiales bajo un procedimiento interno que se complementa con pruebas de laboratorio vía externa con

el fin de determinar el desempeño y rendimiento del producto a través de la caracterización de su coeficiente de fricción.

### Inspección de Materiales de Entrada

Antes de haberse adentrado al proceso se realizó una evaluación a los controles de entrada, específicamente a los químicos empleados en formulaciones con el fin de asegurar que se introduce al proceso materiales en condiciones adecuadas, ya que de no tener control desde la entrada de material permite la adición de variación al proceso desde un inicio.

### **Objetivo**

Con el fin de establecer un control previo al inicio del proceso de mezclado se establecieron 2 pruebas de carácter físico (Análisis de tamaño de partícula y Contenido de humedad), se buscó evaluar el impacto que ellas generan en la reducción del porcentaje de desperdicio.

### **Control de Materiales de Entrada**

- Análisis de tamaño de partícula

La importancia de esta prueba radica en que si no se controla el tamaño de partícula a nivel de desempeño del producto se puede incrementar o decrementar drásticamente el coeficiente de fricción lo que lo hace crítico para la seguridad del producto.

### **Método Propuesto**

1. Tomar 5 muestras aleatorias del material a evaluar.
2. Se continúa con el procedimiento OETP-1.
3. Se calcula Media y Desviación Estándar.
4. La media antes calculada se compara con el rango establecido por el proveedor en cada tamiz.
5. Se concluye si el producto ha sido aceptable cuando se comporta dentro de los límites de especificación, observe el

ejemplo en la tabla 2 de un material aceptable.

Tabla 2. Cálculo y comparativo del Material # 54

Mean	Desv. Estándar	Especificación
0%	0.0%	0%
1%	0.8%	0% - 5%
51%	2.3%	30% - 60%
29%	1.3%	25% - 40%
11%	1.1%	8% - 16%
5%	0.9%	0% - 8%
2%	0.4%	0% - 6%

- Contenido de Humedad

La importancia de esta prueba radica en si el porcentaje de humedad de los materiales se encuentra fuera de especificación puede causar rechazos en el área de molde, específicamente fracturas (cerámica). Ver figura 4

### **Método Propuesto**

1. Tomar 5 muestras aleatorias del material a evaluar.
2. Se continúa con el procedimiento OETP-3.
3. Al finalizar el procedimiento anterior se concluye si el producto ha sido aceptable cuando se comporta dentro de los límites de especificación, como se muestra en la tabla 2.

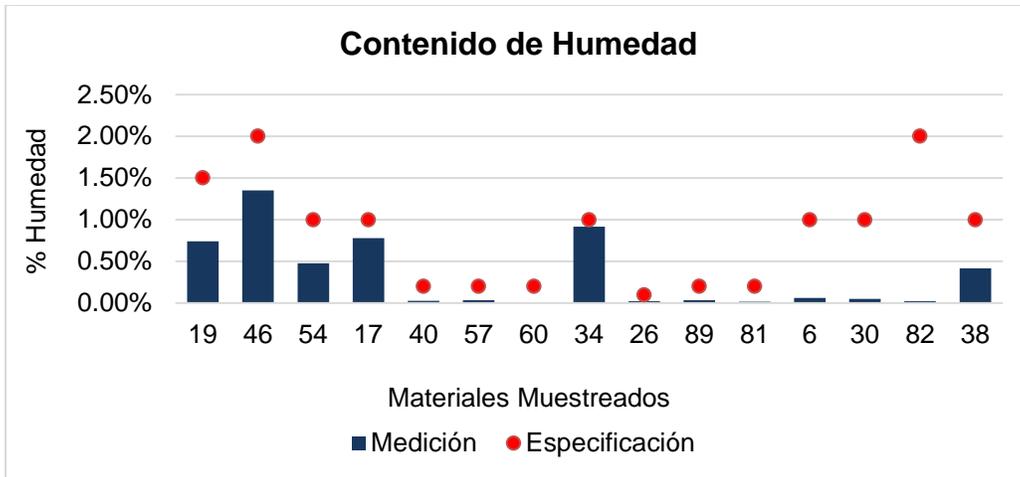


Figura 4. Gráfico de contenido de humedad.

### Densidad Aparente

La prueba física de densidad aparente es otra prueba física destinada a la materia prima de entrada con la cual se comprueba que el material posee la relación aparente de masa/volumen característica intrínseca del material. Sin embargo debido a que este método ha sido ya implantado se requiere su

validación mediante un estudio de Repetibilidad & Reproducibilidad.

### Objetivo

Se desea validar el método de medición a través de un estudio R&R, e identificar si existe mejoría en el porcentaje del desperdicio.



Figura 5. Izq. Estructura previa a cambio, Der. Estructura Modificada

Al comenzar con la evaluación se encontraron las siguientes discrepancias:

- La hoja en la cual se encuentran determinados los valores de densidad utiliza como base de cálculo un recipiente de volumen distinto al que se muestra en la figura 5 (izquierda).
- Existe un procedimiento de medición descrito en el patrón de densidades (hoja) que no se lleva a cabo a consecuencia del idioma

- No se tiene estandarizado el método de medición.

Con el fin de liberar el método se llevó a cabo el estudio previamente mencionado, obteniendo en los siguientes resultados que aunque el método propuesto tiene menor variabilidad no se encuentra dentro de los rangos recomendados, sin embargo debido al carácter del producto puede liberarse con restricciones ya que se encuentra en un rango de (20%-30%). Ver figura 6.

Gauge R&R Método Inicial.	
Fuente	\$Var. del estudio (\$VE)
R&R del sistema de medición total	38.25
Repetibilidad	29.71
Reproducibilidad	24.09
Operator	24.09
Parte a parte	92.40
Variación total	100.00

Número de categorías distintas = 3

Gauge R&R Método Propuesto.	
Fuente	\$Var. del estudio (\$VE)
R&R del sistema de medición total	22.10
Repetibilidad	13.70
Reproducibilidad	17.34
Operator3	17.34
Parte a parte	97.53
Variación total	100.00

Número de categorías distintas = 6

Figura 6. Comparativo de R&R (Antes y Después)

Una vez liberado el sistema de medición podemos observar el comportamiento del método propuesto, donde con respecto a la especificación aumentó la densidad, de manera que si la formulación semi-metálica en la evaluación

previa estaba fuera de especificación, este cambio la corrigió. Caso contrario sucedió con la densidad en la formulación semi-metálica, donde la está fuera de especificación y acciones deberán ser tomadas. Ver figura 7 y 8

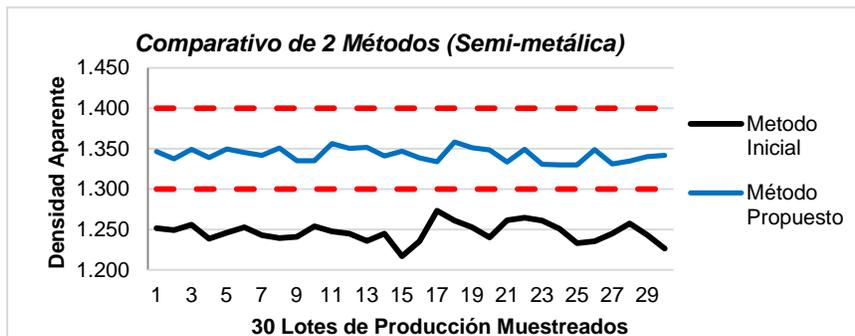


Figura 7. Densidad Aparente Semi-metálica.

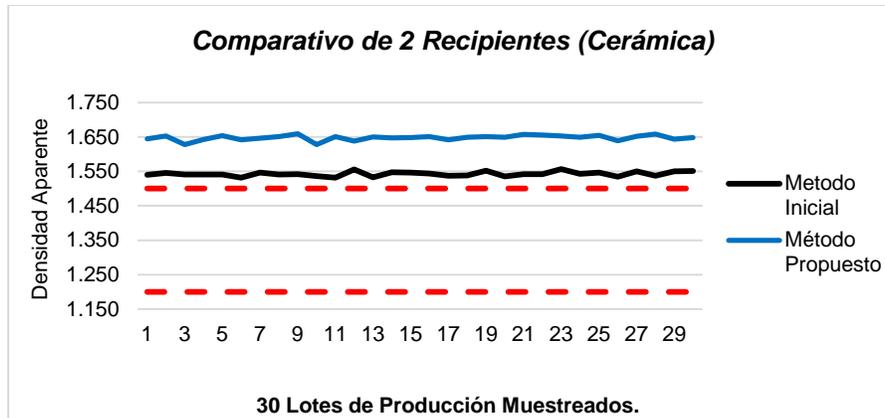


Figura 8. Densidad Aparente (Cerámica)

***Evaluación del cambio (Control de Materiales de Entrada y Densidad Aparente)***

Una vez realizado el cambio se procede a evaluar estadísticamente, según el cálculo del tamaño de muestra requerimos de 103

datos, sin embargo no nos es posible recabar esta información debido que equivale aproximadamente a 3 meses de espera. Por otro lado al realizar la prueba de hipótesis nos ha sugerido que el cambio no ha sido significativamente bueno.

Prueba e IC para dos proporciones			
Muestra	X	N	Muestra p
Antes	46903	781564	0.060012
Después	33462	460140	0.072721
Diferencia = p (Antes) - p (Después)			
Estimado de la diferencia: -0.0127096			
Límite inferior 95% de la diferencia: -0.0134789			
Prueba para la diferencia = 0 vs. > 0: Z = -27.18 Valor P = 1.000			
Prueba exacta de Fisher: Valor P = 1.000			

Figura 9. Resumen estadístico de prueba de hipótesis.

**Área de Mezclado Semi-metálico**

Una vez que en la etapa anterior se ha logrado controlar el comportamiento de la densidad a causa del método se prosigue con otras las causas que fueron principalmente enlistadas como: mezclado no homogéneo y variación significativa en la longitud de las fibras.

**Objetivo**

En términos generales el mezclado en esta área solo emplea una máquina, el proceso se lleva cabo mezclando tres lotes de materiales distintos. Se procede a realizar un comparativo de parámetros provenientes de competidores con el fin de analizar qué impacto tienen en nuestro proceso. Para ello se cuenta con la tabla 3, en donde se observa que las principales diferencias que

se tienen son el ciclo individual a las fibras de acero y el número de cortadores

utilizados.

Tabla 3. Comparativo de arreglo mecánico y procesamiento.

	OEQF	Competidor 1	Competidor 2
<b>Flecha Principal</b>	Si	Si	Si
<b>Número de cortadores</b>	2	3	2
<b>Capacidad de Mezclado</b>	1600 lb	1800 lb	750 lb
<b>Ciclo individual (Fibras de Acero)</b>	No	Si	Si
<b>Tiempo de Ciclo Individual</b>	-	3 min	3 min

Al tener como causa un mezclado no-homogéneo, salta a la vista la posibilidad de adicionar un motor extra y el ciclo individual a las fibras de acero, este último fue decidido debido a la condición morfológica del acero (Diferentes longitudes de fibra). Una vez que se aplicaron estos cambios se sometieron 2 números de parte a pruebas de

compresibilidad, donde los resultados que muestran a continuación denotan mejoría en el mezclado ya que a menor compresión ( $\mu\text{m}$ ), el producto es más compacto lo que habla de una distribución más uniforme de la mezcla y sus componentes. Las siguientes pruebas de hipótesis soportan lo antes afirmado.

Prueba T e IC de dos muestras para Figura 1.					Prueba T e IC de dos muestras para Figura 2.				
	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media		N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
3 Motores	10	240.4	26.5	8.4	3 Motores	10	261.8	42.6	13
2 Motores	10	267.5	30.4	9.6	2 Motores	10	322.4	21.4	6.8
Diferencia = $\mu$ (3 Motores) - $\mu$ (2 Motores)					Diferencia = $\mu$ (3 Motores) - $\mu$ (2 Motores)				
Estimado de la diferencia: -27.1					Estimado de la diferencia: -60.6				
Límite superior 95% de la diferencia: -4.9					Límite superior 95% de la diferencia: -34.0				
Prueba T de diferencia = 0 (vs. <): Valor T = -2.12 Valor P = 0.025					Prueba T de diferencia = 0 (vs. <): Valor T = -4.03 Valor P = 0.001				

Figura 10. Datos de compresibilidad.

Se decidió hacer un comparativo con dos diferentes tipos de fibra de acero, donde a través de microscopio se observó la morfología de ambas como lo muestra la

figura 11 y se puede concluir mediante la prueba de tamizado que hay más consistencia en la fibra del Tipo II.

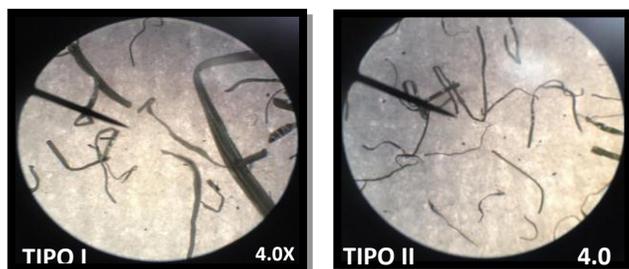


Figura 11. Izq. Tipo I (Fibra Inicial)-Der. Tipo II (Fibra Final).

En el caso en que la formulación es afectada por un nuevo material, es necesaria su validación mediante una prueba

dinámica, bajo el procedimiento SAEJ2522 donde se evalúa el coeficiente de fricción, como se muestra en la figura 12.

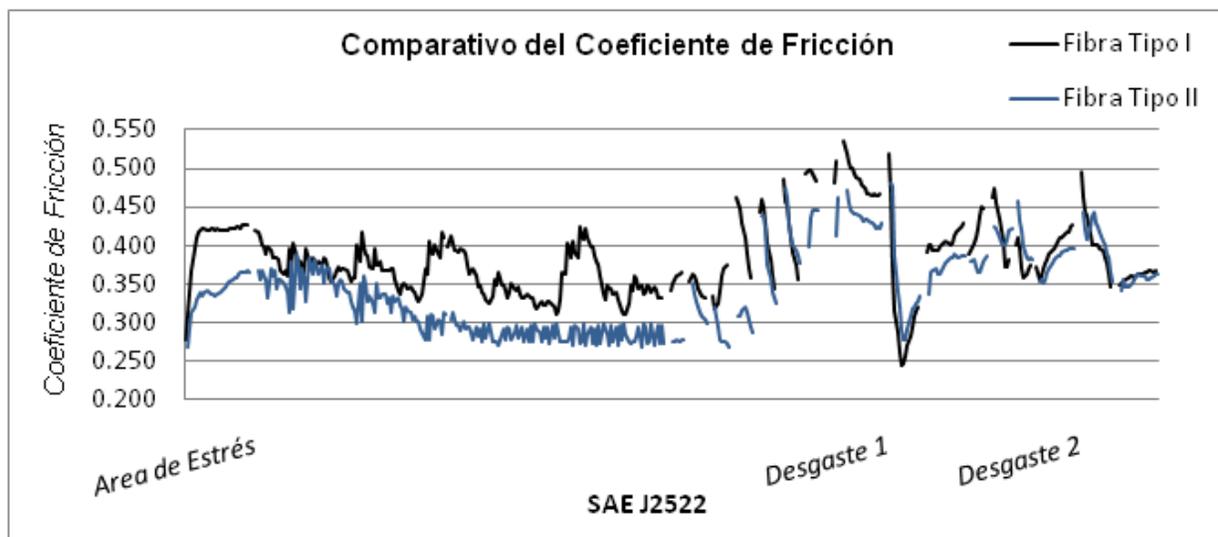


Figura 12. Comparativo del coeficiente de fricción Tipo I vs Tipo II.

A manera de interpretación existen tres principales secciones de la prueba que son de interés al juzgar el desarrollo de una pastilla de freno. Primeramente el área de estrés, este nos brinda la reacción del producto al estrés previo del análisis consecutivo, siendo la sección más larga del procedimiento, en ella se puede observar la consistencia que se tiene con la fibra Tipo II comparada con la inicialmente empleada. Lo anterior trae como beneficios un coeficiente de fricción estable y un producto

que produce menor cantidad de decibeles en su desempeño debido a la estabilidad comparándolo con la fibra del Tipo I. Así también las secciones de Desgaste 1 y Desgaste 2 en donde el contenido orgánico disminuye debido a las condiciones de temperatura, han sido mejoradas, incrementando el coeficiente de fricción.

***Evaluación del cambio (Procesamiento de Mezcla y Adición de Fibra Tipo II).***

A continuación se procede a evaluar estadísticamente. Según el cálculo del tamaño de muestra requerimos de 22.68 datos, lo que representa 23 aproximados, nos habla de un mes de producción, periodo

que ha sido evaluado, aunado a esto la prueba de hipótesis ha sugerido que el cambio al cabo de un mes confirma un decremento en los niveles de desperdicio.

Prueba e IC para dos proporciones			
Muestra	X	N	Muestra p
Antes	29915	514980	0.058090
Después	11837	753068	0.015718
Diferencia = p (Antes) - p (Después)			
Estimado de la diferencia: 0.0423713			
Límite inferior 95% de la diferencia: 0.0417856			
Prueba para la diferencia = 0 vs. > 0: Z = 118.99 Valor P = 0.000			
Prueba exacta de Fisher: Valor P = 0.000			

Figura 13. Resumen estadístico de prueba de hipótesis

#### Área de mezclado Cerámico.

En la sección donde se abordó el tema de densidad aparente, se muestra que el comportamiento de esta, específicamente la formulación cerámica es elevada. Para poder realizar una actividad de mejora es necesario ajustar BD en primera instancia y consecutivamente realizar la mejora.

#### Objetivo.

Se realizó un diseño de experimentos 2k para determinar los parámetros ideales que permitan centrar el proceso a la especificación tomando las variables controlables. La tabla 4 muestra la matriz de diseño de la experimentación, como también la respuesta obtenida en esos niveles.

Los resultados de la experimentación arrojaron como variable significativa el

aglutinante (CMC), el ANOVA de la corrida muestra una correlación aceptable. Utilizando la herramienta de optimización de un software estadístico se obtuvieron los siguientes parámetros para obtener una BD=1.35 gr/cm<sup>3</sup>: CMC=3.0, Temperatura: 65 y Agua: 140.3. El comparativo de proceso se muestra en el gráfico.

Aunque los parámetros hayan resultado en un cambio positivo para la densidad, es necesario determinar la causa que origina en la formulación cerámica esos defectos.

Como explicación breve del proceso de mezclado, consta de dos mezcladoras, la primera realiza la integración de materiales polvosos, la segunda genera granulación utilizando un aglutinante (CMC) que a su vez agrega de 1% a 5% de humedad. El problema se puede apreciar de manera visual en la figura 15.

Tabla 4. Matriz de Diseño 23

Orden Estadístico	Orden Corrida	CMC (lb)	Temperatura (°C)	Agua (ml)	BD
2	1	3.2	60	100	1.47
3	2	2.8	70	100	1.21
5	3	2.8	60	150	1.22
4	4	3.2	70	100	1.50
1	5	2.8	60	100	1.01
6	6	3.2	60	150	1.48
8	7	3.2	70	150	1.51
7	8	2.8	70	150	1.24

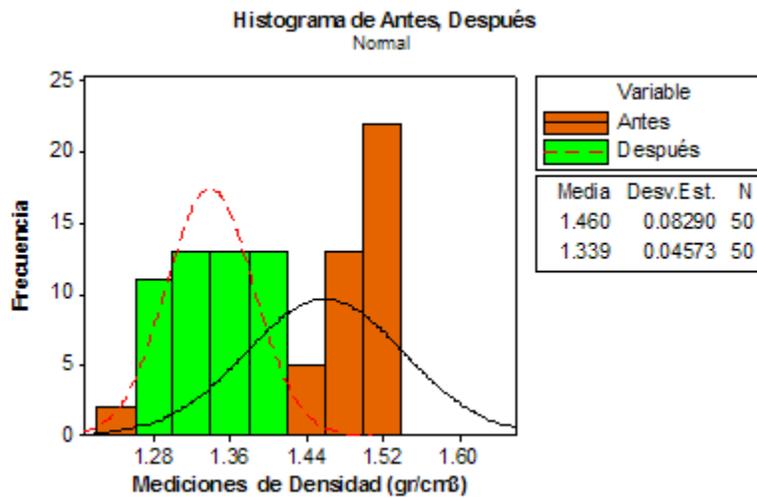


Figura 14. Comparativo Antes y Después de Parámetros para Mezcladora



Figura 15. Izq. Pieza Defectuosa (2 Mezcladoras) – Der. Pieza Aceptable (1 Mezcladora)

En resumen:

La prueba de retención promedio de 1647 psi (2 mezcladoras) incremento su valor promedio a 3467 psi (1 Mezcladora).

Las pruebas de validación (AMECA) bajo el procedimiento SAE J661 para las piezas

hechas con una sola mezcladora incrementaron notablemente el coeficiente de fricción en las etapas de interés.

Reducción de costos aproximados de 200,000 USD anuales a consecuencia de no utilizar aglutinante y maquinaria.

## Resultados y Conclusiones

Es posible reducir el porcentaje de residuo (Scrap) en balatas que presentan porosidad superficial de 6.1% a 1.06%.

$H_0: \mu_1 = 6.1\%$

$H_1: \mu_2 < 6.1\%$

Una vez terminados los ciclos de mejora se puede concluir a través de la siguiente prueba de hipótesis que existe una reducción notable del desperdicio que se buscaba minimizar.

Prueba e IC para una proporción						Prueba e IC para dos proporciones					
Prueba de $p = 0.0106$ vs. $p_{no} = 0.0106$						Muestra	X	N	Muestra p		
						Inicio	46903	78564	0.597004		
						Final	7089	670176	0.010578		
Muestra	X	N	Muestra p	IC de 95%	Valor P						
Final	7089	670176	0.010578	(0.010334, 0.010826)	0.863						
						Diferencia = $p$ (Inicio) - $p$ (Final)					
						Estimado de la diferencia: 0.586426					
						Límite inferior 95% de la diferencia: 0.583540					
						Prueba para la diferencia = 0 vs. > 0: Z = 334.26 Valor P = 0.000					
						Prueba exacta de Fisher: Valor P = 0.000					

Figura 16. Izq. Prueba de Hipótesis para probar  $\mu_1 = 1.06$  – Der. Prueba de hipótesis que confirma que hubo decremento

## Recomendaciones

Reducir la variación presente en el método de medición actual de densidad aparente mediante una solución automatizada.

Mejorar el sistema de visión para aumentar su eficiencia en las tareas propias de medición.

Eficientizar la manipulación del compuesto en el área de moldeo con el fin de reducir el volumen de este.

Trabajar en una re-estructuración de porcentajes en los materiales, específicamente en aquel que realiza la unión de estos, ya que al modificar el procesamiento cerámico es probable que la cantidad en lugar de ser suficiente después del cambio esta resulte ser excedente.

## Referencias

Castilla, Nuria, Blanca Vicente, y Pastor Rosa Martínez Alicia. (2004). Cálculo según el método de los lúmenes. *Construcciones Arquitectónicas*, 17.

Castro, Alfredo, y Kuchen Benjamín Schugurensky Carlos. (2006). Detección de Anomalías en Envase de Vidrio Mediante Visión Artificial. *Instituto de Automática*, 6.

Chan, D, y G W Stachowiak. (2004). Review of automotive brake friction materials. *Automobile Engineering*, 953-966.

Gyimah, Glenn Kwabena, Dong Chen, y Ping Huang. (2013). Dry Sliding Studies of Porosity on Sintered Cu-based Brake Materials. *Transaction on control and mechanical systems* 2(5), 219-224.

Jaafar, Talib Ria, Mohamad Soib, Selamat, y and Ramlan Kasiran. (2012). Selection of Best

Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development. *Powder Metallurgy*.

Razimi, A., Lazim, M., Kameil, M., y Hamid. A. (2012). Effects of Pad Surface Topography on Disc Brake Squeal.» *Applied Mechanics and Materials*, 58-62.

Ruzaidi, C.M. Kamarudin, H. Shamsul, J.B. Mustafa, A. Bakri, A. y Alida, A. (2011). Morphology and Wear Properties of Palm Ash and PCB Waste Brake Pad. *International Conference on Asia Agriculture and Animal* 13.

Solomon, Darius, y Mohamad Berhan. (2007). Characterization of Friction Material. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 1-6.