

# DOE para selección de adhesivos estructurales sobre diferentes sustratos utilizados para revestido exterior en autobuses urbanos

<sup>1</sup> Ing. Edgar Hernández Juarico

<sup>2</sup> M.I. Jesús Villagómez

<sup>3</sup> Ing. Roberto Miranda Fernández

[1] Alumno del Posgrado, [2] Asesor Académico, [2] Asesor de Planta

[edgar.juarico@gmail.com](mailto:edgar.juarico@gmail.com)

## RESUMEN.

En este artículo se muestra la investigación realizada en una empresa ensambladora de autobuses 100% mexicana en Ciudad Sahagún, Hidalgo, México; dicha investigación se enfoca al estudio y aplicación de herramientas de WCM (World Class Manufacturing), específicamente el Diseño de Experimentos (DOE), con la finalidad de establecer nuevos métodos de manufactura en el revestimiento exterior de autobuses a fin de disminuir costos de producción y mejorar tiempos de ensamble, se observa una oportunidad de mejora en la alternativa de diferentes adhesivos estructurales (diferentes costos) para ello se identifica como variable importante la máxima resistencia a la tensión de acuerdo al tipo de adhesivo estructural utilizado para asegurar la fijación de elementos del revestido en carrocería. Se consideran 3 adhesivos estructurales de diferentes marcas aplicados sobre 3 sustratos distintos, a través del planteamiento y rechazo o no rechazo de hipótesis se logra determinar el mejor adhesivo para cada uno de los sustratos, teniendo fundamentos teóricos y demostrables para elegir la mejor combinación (marca/sustrato).

**Palabras Claves:** WCM, DOE, Autobús

## 1 INTRODUCCIÓN.

La importancia de realizar un estudio detallado sobre variables que influyen en un proceso de manufactura es una de las bases del WCM (World Class Manufacturing), lo que permite establecer de forma certera y paralela los efectos individuales e interacciones de diversos factores que determinan los resultados de la salida esperados (proceso de manufactura). Dicha salida, se reflejará indiscutiblemente en mejoras al proceso o bien en conocimiento de nuevos elementos que permitan establecer bases de estudio futuras.

Un enfoque del WCM aplicable para la industria automotriz pesada es generar mejoras en primer lugar a través del máximo aprovechamiento de recursos disponibles al momento y posteriormente la aplicación de nueva tecnología, tomando como punto de re-orden que la tecnología con la que se cuenta actualmente ya no es suficiente para lograr las especificaciones y demandas de los procesos y que el mercado exigen.

Tomando para este artículo como herramienta primordial del WCM el DOE, será posible considerar las fuentes de variación de un proceso específico a fin de [2] [3]:

- Elegir de manera adecuada nuevos materiales
- Identificar condiciones de operación ideales para el proceso
- Disminuir la vulnerabilidad del proceso de manufactura (considerando variables del mismo)

## 2 FUNDAMENTOS

Al seleccionar el modelo de DOE a utilizar es necesario verificar que se cumple con los 3 principios básicos para su validación:

1. Aleatorización: el orden en que se realizan los ensayos y corridas del experimento no deben seguir un orden predeterminado, deberán ser completamente al azar.
2. Repetición: correr más de una vez las combinaciones entre factores a fin de determinar una estimación del error experimental, la cual se convierte en una unidad de medición básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son en realidad estadísticamente diferentes.
3. Formación de bloques: es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés. La formación de bloques se emplea para reducir o eliminar la variabilidad transmitida por factores perturbadores, que son aquellos que pueden influir en la respuesta experimental pero en los que no hay un interés específico.

Existe una clasificación para diseños experimentales, la cual se muestra en la siguiente figura:

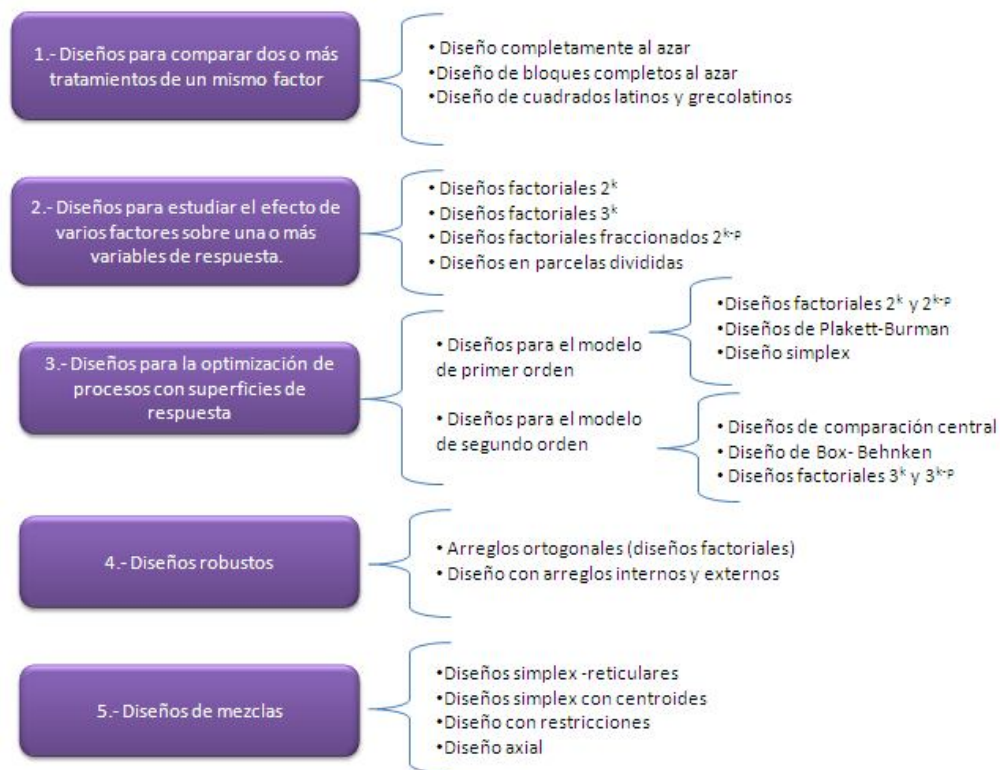


Figura 1. Clasificación y selección de diseños experimentales

A continuación se describe el análisis estadístico para un diseño de bloque aleatorio, suponiendo que un solo factor con “a” niveles es de interés, y que el experimento se ejecuta en “b” bloques, las observaciones pueden representarse por medio del modelo estadístico lineal[1]:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a, \\ j = 1, 2, \dots, b, \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

$\mu$ =media general

$\tau_i$ = efecto del tratamiento i-ésimo

$\beta_j$ = efecto del bloque j-ésimo

$\epsilon_{ij}$  = término del error aleatorio normal

A su vez, es de interés probar la igualdad de los efectos del tratamiento, como se expresa a continuación:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (2)$$

$$H_2: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

A fin de tener parámetros estadísticos para evaluar las hipótesis planteadas, se utiliza el método de Análisis de Varianza (ANOVA), con cálculo de estadígrafos de acuerdo lo indicado en la siguiente tabla[1]:

Tabla 1. Análisis de Varianza para el diseño de bloque completamente aleatorio

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F <sub>0</sub>
Tratamiento	$\sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{b} - \frac{y^2}{N}$	a - 1	$\frac{SS_{Tratamiento}}{a - 1}$	$\frac{MS_{Tratamiento}}{MS_E}$
Bloque	$\sum_{j=1}^b \frac{y_j^2}{a} - \frac{y^2}{N}$	b - 1	$\frac{SS_{Bloque}}{b - 1}$	
Error	SS <sub>E</sub> (Por sustracción)	(a - 1)(b - 1)	$\frac{SS_E}{(a - 1)(b - 1)}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y^2}{N}$	ab-1		

Para efectos de optimización en los cálculos se utiliza el software para estadística Minitab 16, basado en los desarrollos matemáticos mostrados anteriormente.

### 3 PROCEDIMIENTO

Para el planteamiento de un DOE, es necesario definir las entradas y salidas del proceso que se estudia, a fin de elegir el modelo de DOE que más afin sea al proceso de manufactura. A continuación se muestra de forma esquemática, las principales variables que intervienen en el proceso de revestimiento exterior de autobuses.



Figura 2. Esquema de variables identificadas en el proceso de revestimiento exterior

Identificación de variable de respuesta y bloques del experimento:

- Variable de respuesta: Resistencia a la tracción del adhesivo N/mm<sup>2</sup>
- Bloques del experimento:
  1. Marca adhesivo estructural 1
  2. Marca adhesivo estructural 2
  3. Marca adhesivo estructural 3
  4. Sustrato A
  5. Sustrato B
  6. Sustrato C

Número de réplicas = 2

Modelo: Diseño de bloques completos al azar (DCA)

Hipótesis planteadas:

Hipótesis para bloque 1:

H<sub>0</sub>: La marca del adhesivo NO influye en la resistencia a la tracción del adhesivo

H<sub>1</sub>: La marca del adhesivo influye en la resistencia a la tracción del adhesivo

Hipótesis para factor 2:

H<sub>0</sub>: El tipo de material NO afecta la resistencia a la tracción del adhesivo

H<sub>1</sub>: El tipo de material afecta a la resistencia a la tracción del adhesivo

Hipótesis General:

H<sub>0</sub>: El tipo de material y marca de adhesivo NO afectan la resistencia a la tracción del adhesivo

H<sub>1</sub>: El tipo de material y marca de adhesivo afectan a la resistencia a la tracción del adhesivo

A continuación se muestra la tabla ANOVA, con lo cual se analizarán los niveles de significancia para evaluar las hipótesis planteadas:

Tabla 2. Análisis de Varianza para el diseño propuesto

**Two-way ANOVA: RESISTENCIA A LA TRACCION versus MARCA. SUSTRATO**

Source	DF	SS	MS	F	P
MARCA	2	210,324	105,162	118,08	0,000
SUSTRATO	2	7,989	3,995	4,49	0,045
Interaction	4	13,998	3,499	3,93	0,041
Error	9	8,015	0,891		
Total	17	240,327			

S = 0,9437 R-Sq = 96,66% R-Sq(adj) = 93,70%

Para validación de condiciones de experimentación, se evalúan los supuestos de residuos, en los cuales se observa que los mismos asumen un comportamiento normal, por lo cual se valida la condición de aleatoriedad del experimento, como se observa en la Figura 3.

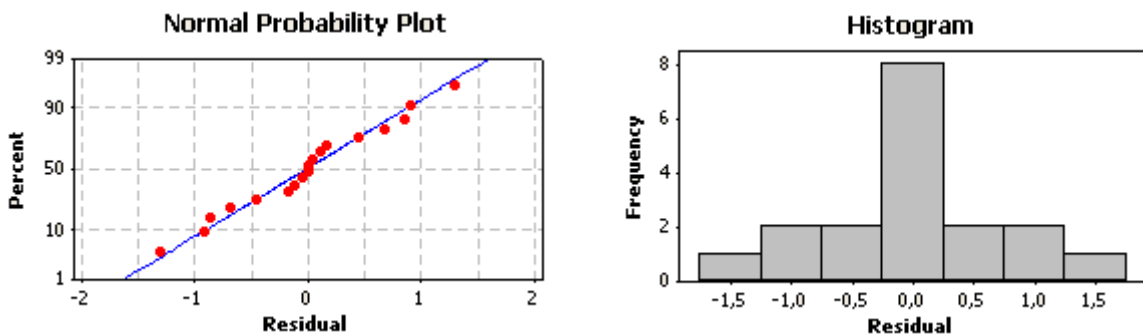


Figura 3. Supuestos de aleatoriedad

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El nivel de significancia es igual a  $\alpha=0,05$ . (Nivel de confianza = 95%)

Para evaluar las hipótesis planteadas en un inicio se usara el valor de p, y se observa lo siguiente:

- Para el bloque Marca, se observa que  $p=0,000 < \alpha=0,050$  por tanto se rechaza la hipótesis Nula  $H_0$ , por lo tanto se tiene que:

*La marca del adhesivo influye en la resistencia a la tracción del mismo*

- Para el bloque Sustrato, se observa que  $p=0,045 < \alpha=0,050$ , por lo tanto se rechaza también la hipótesis Nula  $H_0$ , y se tiene que:

*El sustrato afecta a la resistencia a la tracción del adhesivo*

- Para la interacción entre la marca y el sustrato se cumple que la combinación de ambos factores influye en la resistencia a la tracción del adhesivo,  $p=0,041 < \alpha=0,050$ ,

Sin embargo la marca del adhesivo es el factor que más aporta a la respuesta de resistencia a la tracción

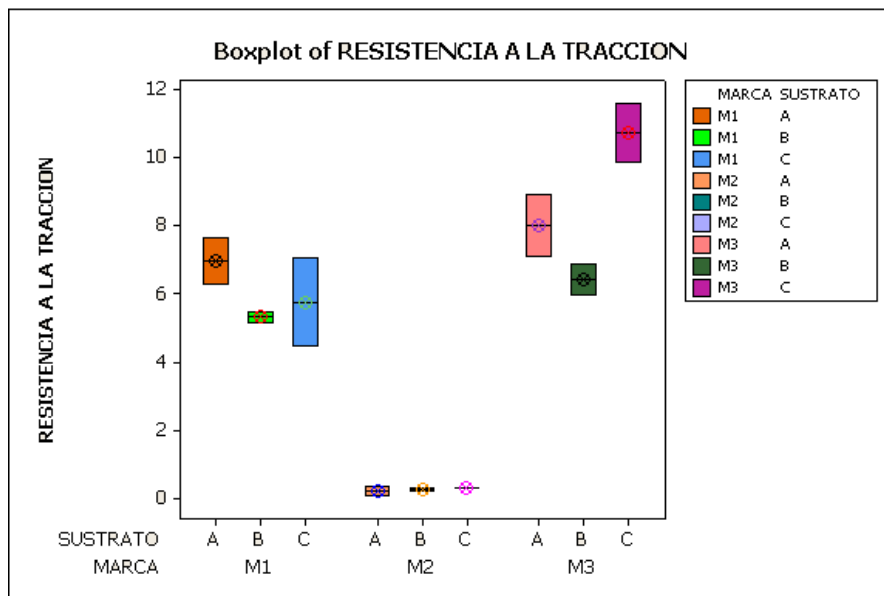


Figura 4. Gráfica de Cajas para DOE

Como se observa en la Figura 4, la marca de adhesivo que mayor resistencia a la tracción presenta sobre los tres tipos de sustratos es la marca: M3.

## 5 CONCLUSIONES

La aplicación de la herramienta diseño de experimentos (DOE) permite tomar decisiones en la industria con mayor certidumbre. Es claro que el DOE, se considera como parte del WCM dado que se relaciona con la mejora en los procesos de manufactura

Directamente la aplicación del DOE en la industria pesada (camiones y autobuses) es de gran utilidad, ya que permite establecer relaciones entre variables identificadas como críticas en el proceso, permitiéndolo hacer más robusto y con más controles que permitan garantizar un proceso centrado de acuerdo a especificaciones.

Es importante señalar que el Diseño de Experimentos, no es un tema exclusivo del área de calidad, si no que su alcance es aplicable prácticamente para todos los departamentos y sectores de las industrias.

Para el caso expuesto en este artículo, el DOE planteado fue completamente funcional y permite demostrar matemáticamente los sucesos que plantados a través de variables ocurren en un proceso de manufactura.

## 5 REFERENCIAS

[1] William W. Hines, Douglas C. Montgomery, David M. Goldsman, Connie M. Borrór, Probabilidad y Estadística para Ingeniería, 4<sup>ta</sup>. Edición. CECSA 2006, pp 409-414.  
ISBN: 0-471-24087-7.

[2] FLYNN, B., B., SCHROEDER, R., G., FLYNN, E., J. World class manufacturing: an investigation of Hayes and Wheelwright's foundation. *Journal of Operations Management*. 1999, vol. 17, p. 249 – 269.  
ISSN 69630050.

[2] EID, R. Factors affecting the success of world class manufacturing implementation in less developed countries. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2009, vol. 20, no. 7, p. 989 - 1008.  
ISSN 1741-038X.