



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
**“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE
SOPLADO DE CAJA FRÍA EN LA DEFORMACIÓN DE CORAZONES DE
ARENA UTILIZANDO RESINAS ORGÁNICAS”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

PRESENTA:
BRAIAN MARIANO BERNAL HERNÁNDEZ
No. CONTROL:
M23281633

DIRECTOR(a) DE TESIS:
DR. CARLOS ALFONSO GARCÍA IBARRA

CODIRECTOR(a) DE TESIS:
**DR. SALVADOR VALTIERRA
GALLARDO**

Vo. Bo.

Vo. Bo.

M5 Mayra Matamoros G.

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO DE 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

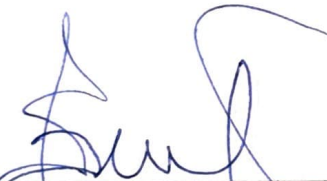
Metepec, Edo. de México, 07/agosto/2025

DEPI-3200-338/2025

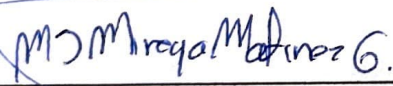
JORGE SÁNCHEZ JAIME
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **"ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE SOPLADO DE CAJA FRÍA EN LA DEFORMACIÓN DE CORAZONES DE ARENA UTILIZANDO RESINAS ORGÁNICAS"**, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la publicación del trabajo final a través del repositorio institucional. Lo anterior como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias de la Ingeniería que presenta el **C. BRAIAN MARIANO BERNAL HERNÁNDEZ** con número de control **M23281633** para sustentar el acto de Recepción Profesional.

ATENTAMENTE


CARLOS ALFONSO GARCÍA IBARRA
DIRECTOR DE TESIS


SALVADOR VALTIERRA GALLARDO
CODIRECTOR DE TESIS


MARÍA SONIA MIREYA MARTÍNEZ GALLEGOS
REVISOR DE TESIS


FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTÍNEZ
REVISOR DE TESIS

ccp. Archivo
mdh



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
Comunicación y Difusión

Metepec, Edo. de México, 20/agosto/2025

DEPI-3200-447/2025

C. BRAIAN MARIANO BERNAL HERNÁNDEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

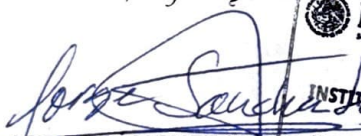
De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones de este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado **"ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE SOPLADO DE CAJA FRÍA EN LA DEFORMACIÓN DE CORAZONES DE ARENA UTILIZANDO RESINAS ORGÁNICAS"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la autorización para proceder a la publicación del trabajo final a través del repositorio institucional.

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Educación, integridad y ciencia"


JORGE SANCHEZ JAIME
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
Educación
Secretaría de Educación Pública
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

JSJ/fvo.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Teis. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



Agradecimientos

Primeramente agradezco a Dios por la salud, sabiduría y paciencia que me ha otorgado a lo largo de este tiempo. También a mis padres Mario y Claudia, quienes me han apoyado incondicionalmente en todo mi desarrollo personal, académico y profesional, y que siempre me han alentado para cada día ser mejor y superarme.

A mi pareja Paola, quien ha estado en momentos complicados durante este proceso, y sobre todas las cosas me ha brindado su amor para sobrellevar cualquier situación.

A mis asesores, el Dr. Carlos Ibarra, el Dr. Salvador Valtierra y el Dr. Javier Illescas, quienes poco a poco me han guiado para tener un mejor desarrollo y concluir de manera satisfactoria este proyecto.

Al Ing. Marco Ríos quien me ha enseñado, aconsejado, guiado y me ha acompañado para realizar un trabajo destacable, porque más que un jefe o responsable ha sido un amigo más en este proyecto.

Al Dr. Alberto Esquivel, quien me ha brindado su tiempo, su apoyo, me ha compartido de su conocimiento y ha tenido la paciencia a la hora de enseñarme.

A mi buen amigo Job Domínguez, quien también desde un inicio tuvo la paciencia de enseñarme y que sus enseñanzas han sido cruciales para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de la maestría Julio, Emmanuel, Pepe y Alex quienes han hecho más amenos estos dos años de maestría.

A Bocar, al Instituto Tecnológico de Toluca y a CONHACYT por el financiamiento para el desarrollo de este proyecto.

Dedicatorias

A mi madre Claudia, por ser la luz constante en mi camino, por su amor incondicional, su paciencia infinita y por enseñarme que con esfuerzo todo es posible. Gracias por cada sacrificio silencioso y por creer en mí incluso cuando yo lo dudaba. Esta meta también es tuya.

A mi padre Mario, por su ejemplo de trabajo, honestidad y fortaleza. Gracias por mostrarme con acciones lo que significa la responsabilidad y por motivarme con tu destacable “amor apache” a nunca rendirme. Esta tesis es un reflejo del carácter que me enseñaste a forjar.

A mi tía Yoya, por ser una segunda madre, por tu cariño y tus consejos sabios. Gracias por apoyarme sin condiciones y por estar presente en este camino. Tu amor y cercanía siempre han sido importantes en este proceso.

A mi hermano Brandon, a mi compañero de vida y cómplice en muchas cosas, porque ha sido una inspiración en mi vida con un gran ejemplo silencioso de fortaleza.

A mi pareja Paola, por acompañarme con amor, comprensión y paciencia en este proceso. Tu apoyo constante, tus palabras de ánimo y tu presencia fueron clave para alcanzar esta meta. Gracias por estar, incluso en los momentos más difíciles.

A mi tía Car y a Don Chucho, quienes a pesar de ya no estar presentes, su amor, sus enseñanzas y su ejemplo seguirán vivos en mí. Esta tesis también es para ustedes, los llevo siempre en el corazón y en cada paso de mis logros.

A todos ellos que han sido un apoyo para mí en este proceso y que me han dado su amor incondicionalmente, les agradezco y les dedico con mucho cariño todo mi esfuerzo puesto en este trabajo.

Resumen

El presente trabajo analiza el efecto de múltiples variables del proceso de soplado de caja fría sobre la deformación de corazones de arena fabricados con resinas orgánicas. Se estudiaron factores como tipo de resina, porcentaje de resina y el tipo de arena. La metodología empleada fue experimental, bajo los lineamientos de la Sociedad Americana de Fundición (AFS por sus siglas en inglés), incluyendo pruebas del número de finura del grano, resistencia a la flexión, vida de banco, distorsión en caliente.

Los resultados evidencian que a partir de 0.2% de humedad presente, la resistencia de los corazones disminuye significativamente, sin alcanzar valores de especificación, incluso en combinaciones más favorables como con la resina Tipo B y arena nueva. En cuanto a la proporción de resina, la combinación 50/50 demostró el mejor desempeño en resistencia para ambos tipos de resina, destacando al tipo B. En cuanto a los estudios de distorsión en caliente, la resina Tipo B presentó una distorsión más controlada al igual que el tiempo total a la fractura.

Se realizaron diseños factoriales completos para identificar los factores con mayor influencia. En el análisis de humedad, el tipo de arena fue el factor más significativo, seguido por el tiempo de curado y el tipo de resina. En distorsión en caliente, tanto la arena como la resina influyen en la distorsión, mientras que el tiempo total a la fractura depende principalmente del tipo de arena.

Estos hallazgos permiten optimizar la selección de materiales y parámetros del proceso para mejorar la calidad dimensional de los corazones.

Abstract

This study analyzes the effect of multiple variables in the cold box blowing process on the deformation of sand cores made with organic resins. Factors such as resin type, resin percentage, and sand type were studied. The methodology employed was experimental, following the guidelines of the American Foundry Society (AFS), and included tests such as grain fineness number, bending strength, bench life, and hot distortion.

The results show that from a moisture content of just 0.2%, core strength decreases significantly, failing to meet specification values, even under more favorable combinations such as Type B resin with new sand. Regarding resin proportion, the 50/50 blend demonstrated the best strength performance for both types of resin, with Type B showing superior results. In the hot distortion studies, Type B resin exhibited more controlled distortion, as well as a longer time fracture.

Full factorial designs were conducted to identify the most influential factors. In the moisture analysis, sand type proved to be the most significant factor, followed by curing time and resin type. In the case of hot distortion, both sand and resin type had an impact on the deformation, while the total time to fracture depended primarily on the type of sand.

These findings allow for the optimization of material selection and process parameters to improve the dimensional quality of sand cores.

Índice

Índice de Tablas.....	13
Índice de Ilustraciones.....	14
Introducción	17
1. Fundamentos	19
1.1. Tipos de arenas para corazones	23
1.1.1. Clasificación de la arena por su composición	23
1.1.2. Clasificación de la arena por su forma de grano	24
1.1.3. Clasificación de la arena por su origen	25
1.2. Características físicoquímicas de la arena	25
1.2.1. Número de finura del grano.....	26
1.2.2. Forma del grano	26
1.2.3. Densidad.....	26
1.2.4. Humedad	26
1.2.5. Temperatura.....	27
1.3. ¿Qué son los corazones de arena?	28
1.4. Proceso de fabricación de corazones en caja fría	28
1.5. Características de un buen corazón	29
1.6. Clasificación de los corazones para fundición.....	30
1.7. Distorsión.....	31
1.8. Proceso de desarenado	32

1.9.	Resinas	32
1.10.	Tipos de resinas utilizadas en el proceso de caja fría	33
1.11.	Diseño de experimentos (DOE)	33
1.11.1.	Introducción a DOE.....	33
1.11.2.	Tipos de Diseño de Experimentos	38
1.12.	Herramientas Centrales de la Calidad (Quality Core Tools).....	49
1.12.1.	Análisis del Modo y Efecto de Falla (FMEA)	51
1.12.2.	Plan de Control (CP)	54
2.	Método	57
2.1.	Análisis de las pruebas experimentales	57
2.1.1.	AFS GFN	57
2.1.2.	Resistencia a la flexión.....	58
2.1.3.	Distorsión en caliente	58
2.1.4.	Humedad	59
3.	Resultados	60
3.1.	Análisis de humedad	60
3.2.	Análisis de resistencia modificando el porcentaje de resina	62
3.2.1.	Desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina y arena recuperada.....	63
3.2.2.	Vida de banco para ambos sistemas de resina y arena recuperada	64
3.3.	Análisis de Distorsión	65
3.3.1.	Comparación de los sistemas de resina: Resina Tipo A vs. Tipo B	65
3.4.	Discusión	66

3.4.1.	DOE para la Resistencia a la flexión vs. Humedad.....	66
3.4.2.	DOE para el estudio modificando el porcentaje de resina	69
3.4.3.	DOE para el estudio de distorsión en caliente	75
4.	Conclusiones	80
5.	Recomendaciones	82
	Referencias.....	83
	Anexos	87

Índice de Tablas

Tabla 1 ANOVA para DBCA.....	39
Tabla 2 LSD para comparación de tratamientos.	40
Tabla 3 Tratamientos para DCL.....	41
Tabla 4 ANOVA para DCL.....	41
Tabla 5 Tratamientos para DCGL.....	43
Tabla 6 ANOVA para DCGL.	43
Tabla 7 Notación de Yates.	45
Tabla 8 ANOVA 2k.	46
Tabla 9 Estimación de efectos del DOE.	49
Tabla 10 Referencia de efectos ignorables para el DOE.	49

Índice de Ilustraciones

Figura 1 Geometría de los granos de arena.....	25
Figura 2 Corazones de Arena	28
Figura 3 Ejemplificación de curva del test de distorsión	31
Figura 4 Cuadros latinos estándar 4x4	42
Figura 5 Efecto de interacción lineal y no lineal.	47
Figura 6 Generadores para DOE fraccionado.....	48
Figura 7 DOE fraccionado.	48
Figura 8 Herramientas Core Tools.....	50
Figura 9 Cuarteadora.....	57
Figura 10 Ro-Tap.	57
Figura 11 Báscula.....	57
Figura 12 Máquina Gaylord.	58
Figura 13 Equipo para Resistencia.	58
Figura 14 Tester de Distorsión en Caliente.....	58
Figura 15 Mezcladora.....	59
Figura 16 Distribución por mallas de arena AFS GFN 40 y 55.	60
Figura 17 Morfología de arena nueva.....	60
Figura 18 Morfología de arena recuperada.	60
Figura 19 Gráfica de desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina con arena nueva en distintas condiciones de humedad.	61
Figura 20 Gráfica de desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina con arena recuperada en distintas condiciones de humedad.....	62
Figura 21 Gráfica de desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina con arena recuperada para el análisis de porcentaje de resina.	63

Figura 22 Gráfica de vida de banco para ambos sistemas de resina con arena recuperada para el análisis de porcentaje de resina.	64
Figura 23 Comparación de los sistemas de resina tipo A vs. B para el análisis de distorsión.	65
Figura 24 Gráfica de efectos principales para el análisis de humedad.	66
Figura 25 Gráfica de interacción para el análisis de humedad.	67
Figura 26 Diagrama de efectos estandarizados para el análisis de humedad.	69
Figura 27 Gráfica de efectos principales de desarrollo de resistencia para el análisis de porcentaje de resina.	70
Figura 28 Gráfica de efectos principales de vida de banco para el análisis de porcentaje de resina.	71
Figura 29 Gráfica de interacción de desarrollo de resistencia para el análisis de porcentaje de resina.	72
Figura 30 Gráfica de interacción de vida de banco para el análisis de porcentaje de resina.	73
Figura 31 Diagrama de efectos estandarizados de desarrollo de resistencia para el análisis de porcentaje de resina.	74
Figura 32 Diagrama de efectos estandarizados de vida de banco para el análisis de porcentaje de resina.	75
Figura 33 Gráfica de efectos principales para el análisis de distorsión.	76
Figura 34 Gráfica de efectos principales para el análisis de tiempo total a la fractura.	76
Figura 35 Gráfica de interacción para el análisis de distorsión.	77
Figura 36 Gráfica de interacción para el análisis de tiempo total a la fractura.	78
Figura 37 Diagrama de efectos estandarizados para el análisis de distorsión.	78
Figura 38 Diagrama de efectos estandarizados para el análisis de tiempo total a la fractura.	79
Figura 39 ANOVA de análisis de humedad.	87
Figura 40 Modelo del análisis de humedad.	87
Figura 41 Gráfica de residuos para el análisis de humedad.	88
Figura 42 ANOVA de DR para el análisis de porcentaje de resina.	88

Figura 43 Modelo de DR para el análisis de porcentaje de resina.	88
Figura 44 Gráfica de residuos para el análisis de porcentaje de resina.	89
Figura 45 ANOVA de VB para el análisis de porcentaje de resina.	89
Figura 46 Modelo de VB para el análisis de porcentaje de resina.	90
Figura 47 Gráfica de residuos para el análisis de porcentaje de resina.	90
Figura 48 ANOVA del análisis de distorsión en caliente.	90
Figura 49 Modelo del análisis de distorsión en caliente.	91
Figura 50 Gráfica de residuos del análisis de distorsión en caliente.	91
Figura 51 ANOVA del análisis de tiempo total a la fractura.	91
Figura 52 Modelo del análisis de tiempo total a la fractura.	92
Figura 53 Gráfica de residuos del análisis de tiempo total a la fractura.	92
Figura 54 Certificado de participación en Congreso POLYMAT 2024.....	93

Introducción

El presente proyecto de investigación se desarrolla bajo un acuerdo de colaboración entre la Empresa Bocar y el Laboratorio de Investigación de Ingeniería Ambiental (LIIA), del Instituto Tecnológico de Toluca (ITT).

Para esto, es importante conocer de manera correcta el proceso de caja fría (cold box) ya que con esto se puede identificar el comportamiento de las arenas y resinas que se utilizan, de la mano de la revisión de literatura para conocer antecedentes similares a los que se presentan en la empresa, gracias a esto, se determinaron las variables que se trabajaron y estudiaron para el proyecto.

Los factores principales que se tomaron en cuenta para el diseño experimental son el porcentaje de humedad presente en la mezcla de arena, el tipo de resina, el porcentaje de resina (parte 1 y parte 2) y tipo de arena, todas estas con un método de estudio estándar de acuerdo con la AFS, tales como las pruebas de número de finura de grano (AFS GFN por sus siglas en inglés) resistencia a la flexión, vida de banco y distorsión en caliente.

En cuanto a la arena, se seleccionaron dos tipos de arena con granulometrías distintas; la arena recuperada AFS GFN 55 y la otra es arena nueva AFS GFN 40, ambas son arenas de sílice.

En cuanto a los sistemas de resina que utiliza la empresa, son de dos tipos, la resina Tipo A y la resina Tipo B. Al trabajar con ambos sistemas, se desea realizar un análisis y ver las condiciones óptimas, debido a que suelen utilizarse distintos por la geometría superficial que requiere cada tipo de corazón de arena.

Una vez realizada la experimentación, después de haber analizado y definiendo correctamente los parámetros del proceso, se realizaron las recomendaciones acopladas a las mejores condiciones para realizar los corazones.

A lo largo de esta investigación se irá explicando la importancia de realizar los métodos de análisis de cada una de las variables, al igual que el uso que tiene cada uno de los equipos para la experimentación, asimismo se muestran todas las actividades realizadas que llevaron a concluir con este proyecto.

1. Fundamentos

Antecedentes

Regularmente en los procesos donde se lleva a cabo el moldeo mediante fundición en arena, la cantidad de residuos generados dependerán tanto del tipo de metal, como de la tecnología usada para el proceso. Es posible que el problema sea generado por variables presentadas en el proceso de fundición como lo son; la presión, tiempo de vaciado, altura de vaciado, fluidez, entre otras. Así como también aquellas derivadas del momento en que se moldean los corazones, tales como; presión, tipo de arena, tipo aglutinante, temperatura, entre otras.

En 2001, López realizó un estudio respecto al efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de moldes y corazones producidos por el proceso de fenol-uretano en caja fría, basándose únicamente en la chaqueta de enfriamiento de las cabezas de motor y monoblock de aluminio. La finalidad del estudio fue para conocer y evaluar el comportamiento que tenían las arenas y resinas utilizadas y cuál de estas era mejor, sometiéndolas a distintas condiciones; temperatura ambiente y alta temperatura. Utilizando el intervalo estándar de resina que van de 0.8% a 1.15%, granulometría Wedron AFS GFN 70 y la US Sílica AFS GFN 50, y en el caso del sistema de resina, se utilizaron 2 tipos de resinas (Tipo A, Tipo B), y a estas se les realizaron pruebas para determinar su índice de refracción, viscosidad, peso molecular promedio, índice de polidispersidad y un análisis termogravimétrico.

Con esto logro determinar que el sistema de resina A el cual fue utilizado con la arena Wedron AFS GFN 70, dando a los dos sistemas de resinas una mayor vida de banco y una mayor resistencia a la penetración a diferencia de los sistemas con arena US Sílica AFS GFN 50.

Aunque también se pudieron determinar algunas ventajas del sistema de resina B, ya que este generaba menor cantidad de gas y por el lado sus desventajas, tenían una baja resistencia inmediata, afectando a los corazones que se utilizaban en un menor tiempo posterior a su fabricación.

Por otro lado, Rodríguez (2001), en su estudio, se enfocó en el efecto de los componentes de una mezcla de arena utilizada en la fabricación de moldes y corazones sobre el fenómeno de la distorsión, este de igual forma en un proceso de caja fría. La finalidad de la investigación es analizar cómo afecta las propiedades físicas y químicas de las mezclas de arenas en la estabilidad dimensional de los moldes o corazones. Este autor realizó diferentes pruebas y dividió su proceso en 5 etapas:

- Pruebas de tensión en distintas temperaturas,
- Pruebas termogravimétricas,
- Pruebas de compactibilidad,
- Pruebas a la dilatometría,
- Pruebas de distorsión.

Los resultados obtenidos mostraron que la resina si tenía un efecto en la tensión desarrollada conforme a distintas mezclas (A y B) a una temperatura ambiente; en cuanto a la etapa dos, para las pruebas termogravimétricas, se obtuvo que la mezcla de resina B tiene mayor influencia en la distorsión y la termo-plasticidad; por parte de la compactibilidad, determino

que no tiene ninguna relación en cuanto a las diferentes mezclas; por otro lado, el aditivo utilizado para cada resina, si ejerce un fenómeno contra la dilatación siempre y cuando sea una cantidad menor o igual al 5% en peso total de la mezcla.

También, Rodríguez & Solís (2002) en su trabajo de tesis, estuvo dirigido hacia el diseño de propuestas de cambio en los elementos que intervienen en la fabricación de corazones de arena para la producción de cabezas de motor automotrices; principalmente su objetivo fue el estudio de la resistencia, tanto la que adquirirían los corazones después del curado, debido a que una buena resistencia permitiría su manejo por parte de los operadores, como también la obtenida después de una hora de haber preparado la mezcla.

Los elementos determinados que intervienen en la fabricación de dichos corazones de arena principalmente son la arena para fundición y alguna forma de aglutinante. En este caso, la arena es el elemento más importante en cuestión de peso, ya que, para 100 kilogramos de arena, se utilizan 800 gramos de resina, siendo aproximadamente el 98.5% del total del corazón.

Después de haber realizado tres experimentos, obtuvieron resultados donde se determinó que el porcentaje de resina y el tipo de arena utilizados en el proceso, son los factores que causan un mayor efecto en la resistencia de los corazones; en cuanto a los niveles propuestos para el tiempo de mezclado de la arena-resina y la temperatura en que reposa esta, tuvieron un mejor comportamiento, sin embargo, no fueron estadísticamente significativos en comparación al porcentaje de resina o el tipo de arena.

Dentro de los experimentos buscaron utilizar un área superficial menor para la arena, y con una disminución de la resina, esperando que fuera favorable el resultado, sin embargo, no

mostro gran diferencia al proceso normal. Por otra parte, en el último experimento hicieron uso de un tipo de arena más gruesa, obteniendo resultados favorables ante este cambio, sin embargo, eran resultados muy bajos para los estándares establecidos. Se realizaron pruebas también con arenas más finas, cubriendo mayor superficie, esto dio como resultado que, entre mayor número de uniones debido a la finura mejor era la resistencia del corazón, concluyendo que esta resistencia no está solo en función del área superficial, sino también de la forma del grano.

Con todo lo anterior, las propuestas que definieron son; la reducción del nivel de resina a un 0.60% respecto al peso de la arena, utilizando la arena normal del proceso, y con la arena P-57, se propuso el disminuir la resina a 0.65%, con el fin de lograr beneficios económicos, ahorro de materia prima, la facilitación en la remoción del corazón y la reducción de emisiones de gases al momento de vaciado.

Asimismo, Vallone & García (1999) realizaron una investigación con el fin de conocer la influencia de la composición de las resinas y su concentración en la resistencia a la tensión de corazones de arena, en donde consideraron variables como; tipo de resina, concentración de esta y la temperatura, para así, determinar los efectos en la resistencia de los corazones mediante un diseño de experimentos de tipo 2^k y tipo 3^k .

Llevo a cabo la experimentación mediante un equipo nuevo, para el cual, se maquinaron unas mordazas para adaptarlas al equipo tradicional ocupado en la empresa, con el fin de realizar pruebas de tensión, eligiendo el acero AISi 304 para realizar estas. La validación del equipo experimental se llevó a cabo mediante una prueba de 15 probetas en ambos equipos, debido a que los resultados debían ser estadísticamente iguales a temperatura ambiente, para después

realizar las pruebas de tensión, compresión a distintas temperaturas y las pruebas correspondientes de la dureza del corazón.

Con esto, se determinó que el tipo de resina no causa un gran efecto, sin embargo, por lo que se debía considerar otros tipos de factores como el económico, generación de gases, resistencia a la humedad. Por otro lado, se comprobó que la temperatura si tiene un mayor efecto en la variable de tensión, ya que la resistencia disminuía conforme se incrementaba la temperatura a 98°C y; por el contrario, aumentaba si se elevaba a 255°C.

Fundamentos Teóricos

1.1. Tipos de arenas para corazones

Podemos definir el concepto de arena como los granos sueltos de material mineral que varían de tamaño, desde aproximadamente 0.05 a 2.1 mm de diámetro. Estos son comúnmente generados por cambios en la superficie de la tierra a través del tiempo, por acción del viento, agua, nieve, etc. Su composición de esta arena dependerá de la naturaleza de los materiales que fueron erosionados y la manera en que estos se fueron depositando en dicho lugar. (Valdez, 2010)

Existen distintas formas de clasificar los tipos de arenas, estas pueden ser de acuerdo con su composición, forma del grano o su origen.

1.1.1. Clasificación de la arena por su composición

1. Arena de sílice: Este tipo de arena es de las más antiguas utilizadas para fundición, en donde el proceso de moldeo es por vaciado; la razón por la que se usa esta arena es debido a su disponibilidad, su costo en relación con otros materiales para el mismo

uso, su alta refractariedad, con un punto de fusión alrededor de los 1550 – 1650°C, es compatible con la mayoría de los aglutinantes inorgánicos u orgánicos, su número de finura de grano (AFS GFN) es de 25-180 y presenta un pH ácido-neutro.

2. Arena de zirconio: Esta arena presenta el doble de densidad que la arena de sílice, a diferencia de la anterior, esta presenta un alto punto de fusión de 2200 °C, tiende a ser altamente conductivo, cuenta con una baja expansión y con buena resistencia a ser mojado por el metal fundido. Tiene un AFS GFN de 95-160 y presenta un pH ácido-neutro.
3. Arena de Olivina: Esta presenta una forma de grano de tipo angular, tienen fractura concoidal, suele ser un color en distintos tonos de verde, su AFS GFN está en 40-160 y presenta un pH básico. Comúnmente este tipo de arena es utilizada en el proceso de cáscara y proceso en frío o fraguado a temperatura ambiente.
4. Arena de cromita: Tiene forma de grano angular, presenta un pH básico-neutro y su AFS GFN es de 50-90.
5. Arena sintética: Están formadas por partículas esféricas de mulita, tienen una buena estabilidad térmica y una baja expansión, el proceso para realizar una arena sintética es muy costoso y requieren mayor cantidad de resina para formar corazones, su AFS GFN es acorde a las especificaciones del cliente.

1.1.2. Clasificación de la arena por su forma de grano

1. Arena grano redondo: Tiene forma de canicas ásperas o rugosas.
2. Arena grano subangular: Presenta una forma entre redondo y angular.
3. Arena grano angular: Presenta una forma dentada o irregular.



Figura 1 Geometría de los granos de arena. (Nañez, 2011)

1.1.3. Clasificación de la arena por su origen

1. Arenas de moldeo aglutinadas naturalmente: estas son arenas que contienen arcillas minerales las cuales están depositadas en agua y que son arrastrados por las corrientes de los ríos.
2. Arenas de sílice: comúnmente son acumuladas por la sedimentación de la arena en los antiguos mares y que formaban capas de piedra arenisca, y debido a la fuerte erosión a la que se exponen, hace que se remueva la capa que cubre la piedra arenisca, formando este tipo de arena.
3. Arenas de banco: son producto de la desintegración de piedra arenisca, pero por la acción del tiempo, se expanden por el viento y cubren áreas extensas y se acumulan formando bancos, tienden a variar en su pureza debido a que suelen mezclarse con otros minerales o materiales.
4. Arenas de lago: son de origen geológico reciente, producida por la erosión de rocas a lo largo de las orillas de los lagos, donde se depositan para formar playas.

1.2. Características fisicoquímicas de la arena

La arena compone un aproximadamente un 98.5% del total de la mezcla utilizada para formar los corazones de arena, por esto es sumamente importante el conocer las características de

esta. Herrera (2003), nos comparte que las características que mayor influencia tienen en los corazones de arena son las siguientes:

1.2.1. Número de finura del grano

La granulometría indica el tamaño y la distribución del grano de la arena, y actualmente está se expresa de acuerdo con el AFS GFN, representado mediante un análisis de distribución de mallas de un determinado diámetro, como resultado se obtendrá si la arena es de tipo gruesa, mediana o fina, y sus principales características son la permeabilidad y el acabado superficial.

1.2.2. Forma del grano

Anteriormente ya hemos mencionado la clasificación de la forma del grano, esto en el apartado “Tipos de arenas”. Para la definición de la forma del grano de cada una de las arenas se utiliza el coeficiente de angularidad, refiriéndose a la relación de la superficie real del grano de arena a la superficie que tendría.

1.2.3. Densidad

Cuando mayor es la cantidad de granos que tienen la posibilidad de unirse en un volumen determinado, mayor densidad y más fuertes serán los corazones de arena. Entre las formas de grano, la esferoidal es la que mejor compactación tiene y mejor densidad proveen, entre 8 y 10% mayor que la que ofrecen las arenas de tipo angular.

1.2.4. Humedad

La presencia de humedad no es recomendable ya que esta reacciona con la parte 2 de la resina y causa una degradación en sus propiedades, lo que hará que el corazón presente una menor

vida de banco y menor resistencia. Existen fuentes principales por las cuales se contamina de humedad en esta parte de la resina, como lo son:

- Condensación en los serpentines del sistema de enfriamiento de la arena.
- Silos y tolvas mal sellados.
- Alta humedad relativa ambiental.
- Humedad del aire comprimido.
- Depósitos de resinas y aditivos destapados.

a) pH

Aquí se indica el grado de acidez o alcalinidad de la arena, este es un indicador de las posibles impurezas encontradas en la arena, por lo que es importante determinar si el pH de las arenas, debido a que arenas muy básicas o impuras tienden a influir negativamente en la vida de banco de la mezcla. Algunos de los factores que influyen en el aumento de su pH son:

- Alto contenido de finos.
- Acumulación de componentes alcalinos como óxido de calcio (CaO), alúmina (Al_2O_3), en la recuperación térmica.
- Presencia de contaminantes como partículas de aluminio, hierro y carbonato de calcio.

1.2.5. Temperatura

Debido a que puede que no se tenga un buen control sobre la temperatura de la arena, no puede realizarse un corazón de buena calidad, ya que esto afecta la reactividad y la viscosidad de las resinas. El rango ideal de la arena es de 18 a 26°C y el efecto que tiene sobre la arena al manejar una temperatura mayor es:

- Temperatura mayor a 30°C: La arena acelera la reacción de las resinas, acorta la vida de banco y disminuye la fluidez de la mezcla durante el soplado.
- Temperatura menor a 18°C: Retarda la reacción de las resinas, lo que provoca corazones crudos, disminuye la eficiencia del mezclado en molino al incrementar su viscosidad de la resina.

1.3. ¿Qué son los corazones de arena?

Los procesos de fundición de piezas que deben llevar una cavidad interna utilizan siempre elementos llamados corazones de arena, que al colarlos en los moldes, darán paso a ese hueco. Rodríguez & Solís (2002) nos definen que un corazón de arena es cualquier proyección de arena dentro de un molde las cuales sirven para dar formas internas que no forman parte de un molde como tal.

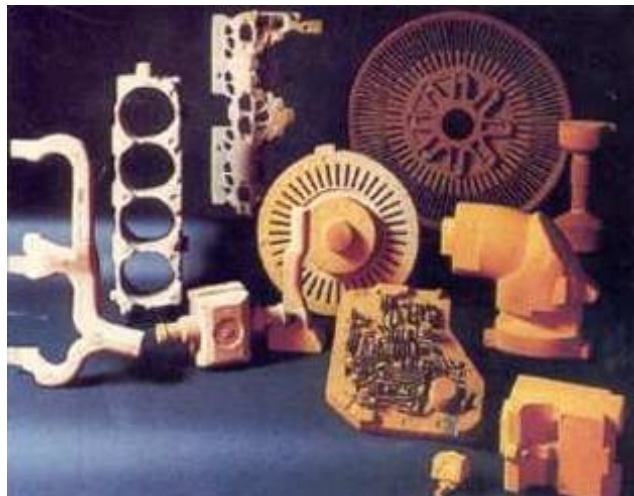


Figura 2 Corazones de Arena

1.4. Proceso de fabricación de corazones en caja fría

El proceso que se utilizó en este proyecto es el fenólico-uretano de caja fría. Lo que hace este proceso es acelerar la reacción entre la resina orgánica utilizada mediante un gas catalizador,

lo que hará que dicho corazón pueda llegar a su punto de curado de una manera más rápida, esto a una temperatura ambiente.

Este proceso se basa en un sistema de resinas dividido en tres partes; la primera se encuentra constituida por una resina fenólica, la siguiente se compone de un isocianato, y, por último, con una amina terciaria vaporizada.

Para lograr formar el corazón, la arena debe ser cubierta con la resina fenólica y el isocianato, un factor importante aquí es la proporción parte 1/parte 2 que se añaden, ya que la parte 1 se encuentra directamente ligada a la propiedad mecánica de la resistencia a la flexión y en cuanto a la parte 2, ésta se encarga de la vida de banco de la arena, es decir, el tiempo útil para usar la mezcla de arena, por lo que si aumentamos la proporción de la parte 1, tendremos mayor resistencia pero menor vida de banco, al contrario, si aumentamos la parte 2, tendremos mayor vida de banco pero menor resistencia.

Posteriormente esta mezcla se compacta dentro de un molde a una temperatura ambiente, después de que ya se tiene en el molde, la amina terciaria se introduce a través de orificios para poder lograr que dicha mezcla de endurezca, por último, se realiza un ciclo de purga para remover los residuos de ésta dentro del corazón. Este proceso constantemente está en actualización, ya que permite una mejor adaptación a los requisitos ambientales que las empresas están obligados a cumplir (Carey & Archibald).

1.5. Características de un buen corazón

Los corazones deben cumplir con ciertas características si queremos que estos cumplan su función de manera correcta, algunas de estas son:

- Contar con una resistencia inmediata suficiente después del proceso de curado para que pueda ser manejado.
- Ser permeable, para que el escape de gas sea correcto.
- Facilitar el desarenado para una sencilla remoción de la arena de la pieza.
- Generación mínima de gases.
- Ser altamente refractarios.

1.6. Clasificación de los corazones para fundición

González (2001), ofrece una clasificación para dichos corazones; primeramente, se menciona que estos pueden clasificarse por el material con el que es fabricado, pueden ser corazones metálicos y corazones de arena. Para ambos casos se pueden dividir en cinco distintas clases:

- Clase I: corazones de configuración complicada que crean en la pieza solidificada cavidades que no se podrían labrar; se aplican a cavidades en las que se requiere un excelente acabado superficial.
- Clase II: corazones de configuración complicada que, además de partes gruesas, tienen salientes delgadas.
- Clase III: corazones de complejidad media, sin partes muy delgadas. Estos corazones hacen cavidades en la pieza de elevadas características superficiales.
- Clase IV: corazones de configuración sencilla que crean en la pieza superficies de rugosidad considerable. Se aplican en condiciones donde el acabado superficial no requiera especial atención.
- Clase V: corazones gruesos que forman grandes cavidades en piezas de gran tamaño.

1.7. Distorsión

La distorsión de un corazón de arena se genera a partir de que la superficie de este suele ser larga, delgada y con pocos puntos de soporte. Para realizar el estudio de distorsión se realizan probetas de tamaño $\frac{1}{4}$ in. x 1 in. x 4 in.; estas se someten en un tester de distorsión en caliente el cual genera una gráfica en donde se pueden interpretar cuatro regiones. De acuerdo con Scott McIntyre y Scott M. Strobl (1998) estas regiones corresponden a:

1. Distorsión: Es la expansión preferencial máxima que tiene la probeta del lado opuesto al que se calienta, esta región suele ser afectada por el tipo de arena, forma y la densidad compactada de la arena y en la gráfica se presenta en números positivos
2. Relajación termoplástica: Área donde el calor empieza a derretir la resina y disminuye su viscosidad, la probeta se hunde a medida que la resina fluye midiendo esta relajación en números negativos.
3. Termo estabilidad: Esta región se encuentra asociada al curado de la resina en los sistemas que se aglutinan mediante calor, como Hot Box, Warm Box, Inorgánico, entre otros, ocurre durante el proceso de eliminación de la resina.
4. Degradación y falla: Después de haber quemado todo el aglutinante la probeta unida químicamente se romperá, esto también es conocido como tiempo total a la fractura.

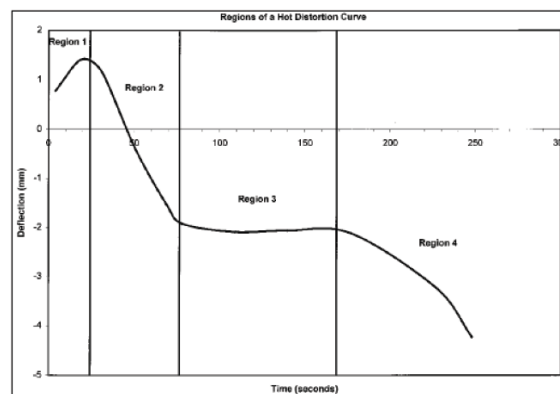


Figura 3 Ejemplificación de curva del test de distorsión

1.8. Proceso de desarenado

En el desarenado en sistemas de aluminio, comúnmente vaciado a 700°C, los corazones no alcanzan una temperatura tan alta que permita garantizar la degradación de los puentes de enlace de los polímeros que componen la mezcla de resinas fenólicas. Los problemas más comunes que se presentan en el proceso de caja fría se causan por los siguientes motivos:

- Insuficiente catalización: Para que el corazón sea eficazmente curado, el gas catalizador debe pasar por toda la masa de la arena, el corazón presentara debilidad en su superficie o espacios no curados si el gas no pasa correctamente por toda la caja de corazones.
- Mezcla de arena poco eficaz: Las partes I y II de la resina deben añadirse a la mezcla de arena en las cantidades y relaciones indicadas para conseguir el resultado deseado, evitando con esto corazones muy duros que no permitan correctamente el desarenado o muy débiles, haciendo que estos se fracturen desde el principio.
- Baja densidad de los corazones: Los corazones que no son compactados correctamente tienden a ser muy débiles, siendo susceptibles a la penetración del metal y la degradación por humedad ambiental.
- Mal mantenimiento de las cajas de corazones: Las cajas de corazones mal cuidadas o sucias, presentan superficies ásperas, dificultando el desmoldado y afectando a la resistencia del corazón.

1.9. Resinas

Las resinas o también conocidos como aglutinantes son componentes clave en la fabricación de corazones, éstas se integraron en el proceso de fabricación de corazones para fortalecer

estos, debido a que son la parte más frágil del moldeo. Estos aglutinantes son mezclados con la arena, dicha mezcla se comprime dentro del molde con la forma deseada del corazón y el aglutinante es curado por reacciones químicas o termales para obtener la forma, lo que proporciona la resistencia y estabilidad dimensional durante la manipulación y el moldeo. (Ballesteros, 2003)

1.10. Tipos de resinas utilizadas en el proceso de caja fría

Existe gran variedad de métodos y materiales los cuales son utilizados para hacer los corazones, Vallone & García (1999) nos brindan una clasificación de resinas para cada uno de los procesos existentes, en este caso, las resinas comúnmente utilizadas para el proceso de caja fría son las siguientes:

- Fenólico uretano / amina.
- Furano / SO_2 .
- (Acrílico/epóxido) / SO_2 (proceso libre de curado con radicales).
- Silicato de Sodio / CO_2 .
- Fenólico éster.

1.11. Diseño de experimentos (DOE)

1.11.1. Introducción a DOE

En la actualidad se ha vuelto común el realizar experimentos dentro de la industria para así poder encontrar una resolución ante cualquier problema y lograr mejorar los métodos que se ocupan dentro de los nuevos proyectos, también permite encontrar las mejores condiciones para lograr los objetivos de estos mismos. (Lean Six Sigma International, 2022)

Dichos experimentos suelen realizarse con base en la prueba y el error, a pesar de que la realización no asegura un resultado completamente certero, muchas veces se logran excelentes resultados. Este consiste en determinar cuáles son las pruebas que se deben de realizar, al obtener datos mediante estas pruebas, permite que estos mismos se analicen para llegar a una conclusión mediante evidencias objetivas, con las cuales podremos responder a cualquier interrogante que se tenga presente.

El libro “análisis y diseño de experimentos” nos da algunos ejemplos típicos que pueden resolverse mediante un diseño y análisis de experimentos, los cuales son:

- Comparar a dos o más materiales con el fin de elegir al que mejor cumple los requerimientos.
- Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.
- Determinar los factores de un proceso que tienen un impacto sobre una o más características del producto final.
- Reducir el tiempo de ciclo del proceso.
- Hacer el proceso insensible o robusto a oscilaciones de variables ambientales.
- Encontrar las condiciones de operación donde se reduzcan los defectos o se logre un mejor desempeño del proceso.
- Apoyar el diseño o rediseño de nuevos productos o procesos.
- Ayudar a conocer y caracterizar nuevos materiales. (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008)

Por otro lado, se puede realizar el diseño de experimentos en el campo de la investigación científica o aplicada, ya que al igual que en los procesos industriales y/o de servicios, siempre se busca encontrar nuevas alternativas en cuanto ideas y mejores respuestas a las interrogantes que tenga la investigación en la que se está trabajando.

En un diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés) se probarán combinaciones de las variables de entrada, los cuales son los factores de un proceso determinado para encontrar respuestas sobre la salida esperada. Dentro del tema de DOE, debemos tener claros varios conceptos los cuales son clave para llevar un correcto desarrollo en el experimento. Los conceptos son los siguientes:

- Experimento: Cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso con el fin de medir el efecto de cambio sobre una o varias propiedades del producto y resultado.
- Unidad experimental: Pieza o muestra que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento.
- Factores: Elemento que se considera que contribuye a producir un resultado.
- Entradas (x's): Es una variable del sistema tal que una modificación de su magnitud o condición puede alterar el estado del sistema y su salida.
- Salidas (y's): Es una variable del sistema cuya magnitud o condición se mide y es resultado de las variaciones que se presentan en las variables de entrada.
- Niveles: Los puntos donde se estudiará cada factor.
- Corridas: Una experimentación completa de todos los factores en todos los niveles posibles.
- Réplica: Segunda corrida de una misma combinación de niveles.

- Interacciones: Combinación de factores en cualquiera de sus niveles.
- Error aleatorio: Remanente de variabilidad que se debe a causas comunes o aleatorias.
- Error experimental: Errores que comete el experimentador en el estudio, en la planeación y ejecución del experimento.

Durante la experimentación también es posible encontrarnos barreras para lograr una experimentación efectiva, las cuales son:

1. Un problema no claro nos proporcionara objetivos no claros.
2. La lluvia de ideas inadecuadas proporcionase resultados del experimento no claros.
3. DOE puede ser muy costoso.
4. Puede consumir mucho tiempo.
5. Falta de entendimiento de las estrategias.
6. Falta de entendimiento de las herramientas.
7. No hay confianza en las primeras etapas de desarrollo.
8. Falta de apoyo de la administración.
9. Falta de soporte y entrenamiento adecuado. (Lean Six Sigma International, 2022)

Todos los experimentos los realizamos con el objetivo de comprobar una idea (hipótesis), aunado a esto, se requiere realizar un plan experimental y no basarlo siempre en el método de prueba y error, esto dependerá del proceso, proyecto o investigación sobre el que se realizará el experimento, si es necesario, se deberá proceder de una forma eficaz que garantice la obtención de respuestas claras a las interrogantes en un lapso corto de tiempo y mediante la utilización de pocos recursos.

Lo principal y necesario para dar inicio al diseño de experimentos es decidir que tratamiento se va a realizar y cuántas repeticiones se requerirán, esto permitirá que se obtenga la mayor información posible al menor costo, esto es conocido como la matriz de diseño.

La matriz de diseño, según el Manual de Certificación de Estadística Aplicada, es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a realizar, cuántas repeticiones, en que orden se van a ejecutar, cómo se va a medir la variable de respuesta. (International Lean Six Sigma, 2023)

El diseño de experimentos está compuesto por 9 etapas:

1. Entender y delimitar el problema u objeto de estudio.
2. Elegir la variable de respuesta que será medida en cada punto de diseño y validar que se mida correctamente.
3. Determinar cuáles factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo con la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta.
4. Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento.
5. Planear y organizar el trabajo experimental.
6. Realizar el experimento.
7. Realizar el análisis estadístico.
8. Interpretar resultados.
9. Sacar conclusiones y establecer métodos de control.

Durante todo el proceso de realización del experimento debemos tener presentes los 3 principios básicos de un experimento:

1. Aleatorización: Consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio y con material seleccionado aleatorio.
2. Repetición: Es correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. Permiten distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores.
3. Bloqueo: Consiste en nulificar o tomar en cuenta, en forma adecuada, todos los factores que pueden afectar la respuesta observada. Una variable que podría tener efecto en la respuesta pero que no es de interés en el estudio. (Decano, Voss, & Draguljic, 2017)

1.11.2. Tipos de Diseño de Experimentos

Existen distintos diseños experimentales para la solución de problemas sobre la práctica, por eso es necesario saber cómo elegir cual es el más adecuado para la situación que se presente, existen varios aspectos a considerar los cuales influyen para tomar la decisión sobre cual utilizar, como lo puede ser el objetivo del experimento, el número de factores a estudiar, el número de niveles que se prueban en cada factor, los efectos que interesa investigar, el costo, tiempo y precisión deseada sobre el experimento. Algunos de estos tipos son:

- Diseños de bloques: Dentro de este tenemos 3 tipos de diseños posibles, Diseño por bloques completos al azar, Diseño cuadro latino y Diseño cuadro grecolatino:
 - a. Diseño por bloques completos al azar: Este se utiliza cuando se quieren comparar ciertos tratamientos o estudiar el efecto de un factor, se espera que las posibles diferencias sean causa del factor de interés y no por otros factores que no estén considerados en el diseño. A estos factores adicionales al factor principal se tienen que incorporar de manera explícita dentro del experimento,

a estos se les llaman “Factores Bloque”, ya que estos no se incluyen porque no es de interés analizar el efecto que tienen y porque así, permitirá realizar el experimento de forma eficaz.

En este se consideran 3 fuentes de variabilidad; el factor de tratamientos, el factor bloque y el error aleatorio. En cada bloque se prueban todos los tratamientos, la aleatorización se hace en cada uno de los bloques.

En cuanto a su modelo estadístico, comúnmente se cree que cada medición será el resultado del efecto del tratamiento donde se encuentre, del efecto del bloque al que pertenece y de cierto error que se espere que sea aleatorio. El modelo determinado es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1, 2, \dots, k \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases}$$

Donde Y_{ij} es la medición que corresponde al tratamiento i y al bloque j ; μ es la media global poblacional; τ_i es el efecto debido al tratamiento i , γ_j es el efecto debido al bloque j , y ε_{ij} es el error aleatorio atribuible a la medición Y_{ij} .

Por otro lado, se debe de plantear la hipótesis a probar, la cual está dada por:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k = \mu \\ H_0: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j \end{aligned}$$

Esta se probará con el análisis de varianza con dos criterios de clasificación, porque se controla dos fuentes variación, el factor de tratamientos y el factor de bloque, esto mediante el ANOVA siguiente:

Tabla 1 ANOVA para DBCA.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor- p
Tratamientos	SC_{TRAT}	$k - 1$	CM_{TRAT}	$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Bloque	SC_B	$b - 1$	CM_B	$F_0 = \frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	SC_E	$(k - 1)(b - 1)$	CM_E		
Total	SC_T	$N - 1$			

Las fórmulas para obtener las sumas de los cuadrados son:

$$SC_T = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^k Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

$$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i.}^2}{b} - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j}^2}{k} - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

Y la del error:

$$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} - SC_B$$

Después de realizar el análisis ANOVA, se podrá determinar que se tiene evidencia estadística para aceptar o rechazar la hipótesis nula. Posterior a esto se puede realizar una comparación de parejas de medias de tratamiento en el diseño para ver cuáles de ellos son diferentes entre sí, esto si la hipótesis nula es rechazada, a lo cual se tiene establecida la siguiente fórmula:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{\frac{2CM_E}{n}}$$

Al obtener el resultado de LSD utilizando los valores de la Tabla de prueba t, podemos realizar la comparación correspondiente de los tratamientos y dar una conclusión respecto a la diferencia entre tratamientos.

Tabla 2 LSD para comparación de tratamientos.

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_A - \mu_B$	$ -1.5 < LSD$	No significativa
$\mu_A - \mu_C$	$ -5.25 < LSD$	Significativa
$\mu_A - \mu_D$	$ -3.25 < LSD$	Significativa
$\mu_B - \mu_C$	$ -3.75 < LSD$	Significativa
$\mu_B - \mu_D$	$ -1.75 < LSD$	No significativa
$\mu_C - \mu_D$	$2 < LSD$	No significativa

Con esto podemos definir el efecto de bloque, ya que la tabla ANOVA nos da los valores necesarios para verificar el rechazo o aceptación de la hipótesis, y así poder definir si es importante el factor bloque y si influye en el factor

principal de interés, para así poder controlarlo o descartarlo, esto se establece mediante la hipótesis siguiente:

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \dots = \gamma_b = 0$$

$$H_A: \gamma_j \neq 0 \text{ para algún bloque } j$$

- b. Diseño en cuadro latino: En este diseño se controlan dos factores de bloque y uno de tratamientos, los tres factores tienen la misma cantidad de niveles. Los tratamientos aquí se representarán por letras latinas y se distribuyen en forma adecuada en un cuadro.

Tabla 3 Tratamientos para DCL.

		Bloque II (columnas)				
Bloque I (renglones)	1	A = Y_{111}	B = Y_{212}	C = Y_{313}	...	K = Y_{k1k}
	2	B = Y_{221}	C = Y_{322}	D = Y_{423}	...	A = Y_{12k}
	3	C = Y_{331}	D = Y_{432}	E = Y_{533}	...	B = Y_{23k}
	...	...	...	...	...	...
	k	K = Y_{kk1}	K = Y_{1k1}	K = Y_{2k3}	...	K = Y_{jkk}

El análisis de diseño y modelo estadístico está dado por:

$$Y_{ijl} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \delta_l + \varepsilon_{ijl}$$

Donde Y_{ijl} es la observación del tratamiento i , en el nivel j del factor renglón y en el nivel l del factor columna; ε_{ijl} es el error atribuible a dicha observación.

Por lo cual podemos descomponer de la siguiente manera:

$$SC_T = SC_{TRAT} + SC_{B1} + SC_{B2} + SC_E$$

Y los grados de libertad correspondientes son:

$$k^2 - 1 = (k - 1) + (k - 1) + (k - 1) + (k - 2)(k - 1)$$

Con esto podemos presentar el ANOVA de la siguiente manera:

Tabla 4 ANOVA para DCL.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor- p
Tratamientos	SC_{TRAT}	$k - 1$	CM_{TRAT}	$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Renglones	SC_{B1}	$k - 1$	CM_{B1}	$F_0 = \frac{CM_{B1}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Columnas	SC_{B2}	$k - 1$	CM_{B2}	$F_0 = \frac{CM_{B2}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	SC_E	$(k - 2)(k - 1)$	CM_E		
Total	SC_T	$k^2 - 1$			

Posterior a esto se realiza una prueba LSD para investigar la diferencia entre cada bloque, luego se realiza una gráfica de medias entre tratamientos y bloques, en este caso si las medias de estos se traslapan, nos indica que no existe suficiente evidencia estadística para determinar que un bloque tiene efecto sobre otro.

Para finalizar se debe realizar la comprobación de supuestos, la cual recae en 3 supuestos; normalidad, varianza constante e independencia de los residuos. Para la selección y aleatorización de un cuadro latino el cual se utilizará en el diseño tiene como regla básica el que ninguna letra se encuentre más de una vez en cada renglón y cada columna, y existen 3 cuadros latinos estándar de dimensión cuatro:

A	B	C	D
B	A	D	C
C	D	B	A
D	C	A	B

,

A	B	C	D
B	D	A	C
C	A	D	B
D	C	B	A

y

A	B	C	D
B	A	D	C
C	D	A	B
D	C	B	A

Figura 4 Cuadros latinos estándar 4x4

La estrategia de selección y aleatorización recomendada es la siguiente:

1. Se construye el cuadro latino estándar más sencillo.
 2. Se aleatoriza el orden de los renglones (o columnas) y después se aleatoriza el orden de las columnas (o renglones).
 3. Por último, los tratamientos a comparar se asignan en forma aleatoria a las letras latinas.
- c. Diseño en cuadro grecolatino: Con este se controlan tres factores de bloque, además del factor de tratamientos. Al igual que el diseño en cuadro latino, este se encarga que los cuatro factores involucrados se prueban la misma cantidad

de niveles, y que cada letra debe de estar una sola vez en cada columna y renglón, con la pequeña diferencia que este se le añaden letras griegas.

Tabla 5 Tratamientos para DCGL.

		Columnas			
		1	2	3	4
Renglones	1	$A\alpha$	$B\beta$	$C\gamma$	$D\delta$
	2	$B\delta$	$A\gamma$	$D\beta$	$C\alpha$
	3	$C\beta$	$D\alpha$	$A\delta$	$B\gamma$
	4	$D\gamma$	$C\delta$	$B\alpha$	$A\beta$

El modelo estadístico para este diseño es el siguiente:

$$Y_{ijlm} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \delta_l + \varphi_m + \varepsilon_{ijlm}$$

Donde Y_{ijlm} es la observación del tratamiento i , en el renglón j , en la columna l , y en la m -ésima letra griega; τ_i es el efecto debido al tratamiento i , γ_j es el efecto del renglón j , δ_l representa el efecto de la columna l y φ_m representa el efecto de la m -ésima letra griega, los cuales son los niveles del tercer factor del bloque.

La variabilidad se representa como:

$$SC_T = SC_{TRAT} + SC_{B1} + SC_{B2} + SC_{B3} + SC_E$$

Para k tratamientos, los grados de libertad son los siguientes:

$$k^2 - 1 = (k - 1) + (k - 1) + (k - 1) + (k - 3)(k - 1)$$

En el caso del ANOVA para el diseño en cuadro grecolatino se desarrolla de la siguiente manera:

Tabla 6 ANOVA para DCGL.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad
Tratamientos (letras latinas)	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i...}^2}{k} - \frac{Y_{...}^2}{N}$	$k - 1$
Factor de bloque I (renglones)	$SC_{B1} = \sum_{j=1}^k \frac{Y_{.j..}^2}{k} - \frac{Y_{...}^2}{N}$	$k - 1$

Factor de bloque II (columnas)	$SC_{B2} = \sum_{l=1}^k \frac{Y_{..l}^2}{k} - \frac{Y_{....}^2}{N}$	$k - 1$
Factor de bloque III (letras griegas)	$SC_{B3} = \sum_{m=1}^k \frac{Y_{...m}^2}{k} - \frac{Y_{....}^2}{N}$	$k - 1$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} - SC_{B1} - SC_{B2} - SC_{B3}$	$(k - 3)(k - 1)$
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^k \sum_{m=1}^k Y_{ijlm}^2 - \frac{Y_{....}^2}{N}$	$k^2 - 1$

- Diseños factoriales: A diferencia de los diseños en bloques que solo se estudia un factor de tratamiento y los demás factores son secundarios para el experimento, en este tipo de diseño, se estudian los efectos que tienen varios factores sobre una o más respuestas, y todos los factores se toman en cuenta por igual.

Los factores que se toman en cuenta en este diseño pueden ser de tipo cualitativo, como lo son las máquinas, material, operadores, operaciones, métodos, etc. Y de la misma manera pueden ser cuantitativos, como lo es la humedad, temperatura, ruido, presión, etc. Para este diseño se necesitan al menos 2 niveles de prueba para cada factor, así se podrá definir de qué manera influye sobre la variable de respuesta. Para este diseño tenemos dos tipos; 2^k y 3^k .

- Diseño 2^k : Este diseño es de los más comunes en la industria y en la investigación, ya que son muy versátiles y eficaces, suelen utilizarse cuando el número de factores que se planean a estudiar es $2 \leq k \leq 5$. En dado caso de que el número de factores es mayor a 5, siempre lo recomendado es usar un diseño fraccionado. Dentro del diseño, para cada factor siempre se van a considerar 2 niveles en cada uno, y tiene 2^k tratamientos. Las k columnas y los 2^k renglones componen la matriz de diseño.

Se tiene determinada una familia de diseños factoriales 2^k siempre y cuando sea $k \leq 5$, la cual es:

Tabla 7 Notación de Yates.

Tratamiento	Notación de Yates	A	B	C	D	E
1	(1)	-	-	-	-	-
2	a	+	-	-	-	-
3	b	-	+	-	-	-
4	ab	+	+	-	-	-
5	c	-	-	+	-	-
6	ac	+	-	+	-	-
7	bc	-	+	+	-	-
8	abc	+	+	+	-	-
9	d	-	-	-	+	-
10	ad	+	-	-	+	-
11	bd	-	+	-	+	-
12	abd	+	+	-	+	-
13	cd	-	-	+	+	-
14	acd	+	-	+	+	-
15	bcd	-	+	+	+	-
16	abcd	+	+	+	+	-

Tratamiento	Notación de Yates	A	B	C	D	E
17	E	-	-	-	-	+
18	Ae	+	-	-	-	+
19	Be	-	+	-	-	+
20	Abe	+	+	-	-	+
21	Ce	-	-	+	-	+
22	Ace	+	-	+	-	+
23	Bce	-	+	+	-	+
24	Abce	+	+	+	-	+
25	De	-	-	-	+	+
26	Ade	+	-	-	+	+
27	Bde	-	+	-	+	+
28	Abde	+	+	-	+	+
29	Cde	-	-	+	+	+
30	Acde	+	-	+	+	+
31	Bcde	-	+	+	+	+
32	Abcde	+	+	+	+	+

Y con el diseño factorial 2^k se pueden estudiar 2^{k-l} efectos siguientes:

$$\binom{k}{1} = k, \text{ efectos principales}$$

$$\binom{k}{2} = \frac{k!}{2!(k-2)!} = \frac{k(k-1)}{2}, \text{ interacciones dobles}$$

$$\binom{k}{3} = \frac{k!}{3!(k-3)!}, \text{ interacciones triples. Y así hasta}$$

$$\binom{k}{k} = 1 \text{ interacción de los } k \text{ factores}$$

Dentro del diseño es importante la estimación de los contrastes, efectos y sumas de cuadrados. El contraste de cada efecto se obtiene al multiplicar su columna de signos por la columna de Yates, después se estiman los efectos mediante:

$$\text{Efecto } ABC \cdots K = \frac{1}{n2^{k-1}} [\text{Contraste } ABC \cdots K]$$

Y su suma de cuadrados por un grado de libertad se da por:

$$SC_{AB \cdots K} = \frac{1}{n2^k} [\text{Contraste } ABC \cdots K]^2$$

Donde n es el número de réplicas del experimento.

Para el ANOVA del diseño 2^k se realiza la suma de cuadrados de la siguiente forma:

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y_{\cdot}^2}{n2^k}$$

Cada efecto es una fuente de variación donde se prueba la hipótesis.

$$H_0: efecto = 0$$

$$H_A: efecto \neq 0$$

De esta forma cuando se concluye que un efecto esta activo, significa que se dice que estadísticamente es diferente de cero.

Para la tabla de ANOVA se tiene lo siguiente:

Tabla 8 ANOVA 2k.

<i>FV</i>	<i>SC</i>	<i>GL</i>	<i>CM</i>	<i>F₀</i>	Valor- <i>p</i>
<i>A</i>	SC_A	1	CM_A	CM_A/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>B</i>	SC_B	1	CM_B	CM_B/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>AB</i>	SC_{AB}	1	CM_{AB}	CM_{AB}/CM_E	$P(F > F_0)$
Error	SC_E	4(n-1)	CM_E		
Total	SC_T	$n2^2 - 1$			

- b. Diseño 3^k : En este se consideran factores con 3 niveles cada uno y tiene 3^k tratamientos. Estos diseños tienen una desventaja, ya que requieren muchas más pruebas que un diseño 2^k , el máximo para el diseño anterior visto era de 16 pruebas, en cambio este diseño requiere un total máximo de 81 pruebas, una para cada tratamiento. Sin embargo, hay razones las cuales hacen viables el uso de un diseño 3^k :

- i. Se tienen factores de tipo continuo e interesa estudiar efectos cuadráticos como A^2 , B^2 , ..., A^2B , B^2A , A^2B^2 , ... Esto se hace cuando se cree que la variable de respuesta no es lineal, ni aproximadamente lineal en el rango de variación de dichos factores.

- ii. Los factores son categóricos o discretos y de manera natural tienen tres niveles cada uno. Esto ocurre en factores como tipo de material, diferentes medios de cultivos, factor máquina, operador, proceso, etc. (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008)

Este diseño nos permite estudiar los efectos de una curvatura, lineales y de interacción, estos se ven de la siguiente manera:

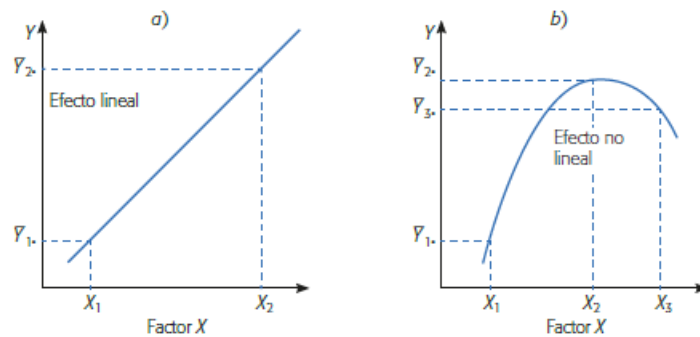


Figura 5 Efecto de interacción lineal y no lineal.

En cuanto al ANOVA, las fórmulas serán las mismas que se utilizan en el diseño 2^k .

- Diseños fraccionados: Este diseño, también conocido como diseño fraccionado 2^{k-p} es una fracción $1/2^p$ del diseño 2^k , para este se eligen p generadores iniciales, de tal manera que sea una interacción de alto orden, después de haber elegido dichos generadores, se puede empezar con la creación del diseño mediante dos pasos:
 - a. Se escribe el diseño 2^{k-p} como si fuera el factorial completo para $k-p$ factores.
 - b. Para los últimos p factores las columnas de signos se obtienen multiplicando las columnas indicadas por los generadores.

A	B	C	ABC
-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1
-1	1	-1	1
1	1	-1	-1
-1	-1	1	1
1	-1	1	-1
-1	1	1	-1
1	1	1	1

Figura 6 Generadores para DOE fraccionado.

Después de tener el diseño completo 2^k se hace la fracción de los generadores.

Fracción 1

A	B	C	ABC
1	-1	-1	1
-1	1	-1	1
-1	-1	1	1
1	1	1	1

Fracción 2

A	B	C	ABC
-1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1
1	-1	1	-1
-1	1	1	-1

Figura 7 DOE fraccionado.

Se podría suponer que es difícil determinar cuáles son los mejores generadores para el diseño; sin embargo, existen tablas ya definidas que nos hacen más sencillo el trabajo.

Estos diseños reducen el costo experimental drásticamente, nos ayuda a agilizar el tiempo de respuesta al analizar un experimento y nos permite simplificar el diseño de experimentos.

Dentro de este diseño existe un término definido como efectos confundidos, los cuales nos permiten eliminar los factores estimables que se consideren no relevantes para el experimento.

Tabla 9 Estimación de efectos del DOE.

Factores	Diseño	Experimento	Efectos estimables
AB	2^2	4	A, B, AB
ABC	2^3	8	A, B, C, AB, AC, BC, ABC
ABCD	2^4	16	A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, CD, ACD, ABC, BCD, ABD, ABCD
ABCDE	2^5	32	A, B, C, D, E, AB, AC, AD, AE, BC, BE, CD, CE, DE, ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, CDE, BDE, ABCD, ABCE, BCDE, ACDE, ABDE, ABCDE

Mediante esto podemos reducir las interacciones redundantes.

Tabla 10 Referencia de efectos ignorables para el DOE.

Diseño	Total de efectos	Efectos no ignorables	Efectos ignorables
K=2	3	3	0
K=3	7	6	1
K=4	15	10	5
K=5	31	15	16

Por otro lado, tenemos la resolución, la cual, al momento de estar realizando el experimento, podremos saber que tan bueno es el experimento. Por lo regular un diseño de este tipo confunde factores con interacciones, por lo que los efectos de los factores confundidos no son apreciados con claridad, aquí es donde se toma en cuenta la resolución, entre más grande sea el número de resolución, más claridad mostrará el experimento, por ende, significará que el experimento se está realizando con el mejor diseño. (Lean Six Sigma International, 2022)

1.12. Herramientas Centrales de la Calidad (Quality Core Tools)

Las Quality Core Tools son un conjunto de herramientas principalmente usadas en el sector automotriz, las herramientas que son consideradas parte de estas, son; Planeación Avanzada de la Calidad del Producto y Plan de Control (PACP/PC o APQP/CP), Análisis del Modo y Efecto de Falla (AMEF o FMEA), Análisis de los Sistemas de Medición (ASM o MSA),

Control Estadístico del Proceso (CEP o SPC), Índices de los Procesos, Proceso de Aprobación para Partes de Producción (PAPP o PPAP). (Lean Six Sigma International, 2022)

Estas son las herramientas básicas para el diseño y desarrollo de productos y procesos en la industria automotriz, aunque también han sido implementadas en otros sectores.



Figura 8 Herramientas Core Tools

También son requisitos de la IATF 16949:2016 en sus diferentes secciones para promover la mejora continua, poniendo énfasis en la prevención de defectos y en la reducción de la variación y de los desperdicios de la organización a lo largo de la operación.

Para cada herramienta básica, el Grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG, por sus siglas en inglés) ha generado una serie de documentos para su correcto entendimiento y aplicación. (Automotive Industry Action Group, 2014)

En general, el uso de dichas herramientas beneficia a las organizaciones en:

1. Reducir variación de los procesos.
2. Reducir desperdicio.
3. Prevenir defectos y reducir costos de la no calidad.
4. Control de los requisitos específicos del cliente.

1.12.1. Análisis del Modo y Efecto de Falla (FMEA)

El FMEA es una metodología para identificar problemas potenciales (riesgos) y sus posibles efectos en un proceso o sistema para priorizarlos y así concentrar los recursos en planes de prevención y mejora, en general, ayuda a reducir riesgos.

Existen distintos tipos de AMEF:

- AMEF de diseño: Reduce los riesgos en el diseño antes de pasar a la fabricación del producto o realización del servicio.
- AMEF de proceso: Analiza las fallas potenciales durante los proceso de fabricación del producto o prestación del servicio para evitar defectos no deseados. (Lean Six Sigma International, 2022)

En la nueva versión del FMEA Handbook existen 7 pasos donde se incluye la documentación de riesgos.

1. Planeación y preparación:
 - a. Identificar el proyecto.
 - b. Definir las 5T's (intención, tiempo, equipo, tarea, herramientas).
 - c. Definir lo que se va a incluir en el análisis.
 - d. Identificar las lecciones aprendidas que se tomarán de referencia.
 - e. Confirmar el formato de AMEF considerando toda la información.
2. Análisis de estructura: El propósito de este paso es definir más detalladamente el proceso, este se divide como:

- a. Elementos del proceso.
 - b. Pasos del proceso.
 - c. Elementos de trabajo del proceso.
3. Análisis de la función: Este paso busca asegurar que la intención de los requerimientos y funciones del producto y proceso, son correctamente asignados.
- a. Visualizar las funciones del producto/proceso.
 - b. Asociación de los requerimientos o características a las funciones.
 - c. Colaboración entre los equipos de ingeniería.
 - d. Base para el análisis de fallas.
4. Análisis de falla: Identificar las causas de falla, modos, efectos y mostrar su relación para evaluar riesgos.
- a. Efectos de falla.
 - b. Severidad.
 - c. Modo de falla.
 - d. Causas de falla.
5. Análisis de riesgo:
- a. Controles de prevención.
 - b. Ocurrencia.
 - c. Controles de detección.

- d. Detección.
 - e. RPN.
6. Optimización:
- a. Acciones recomendadas.
 - b. Responsabilidades y fechas de terminación.
 - c. Resultados de las acciones.
7. Documentación de resultados: El propósito de este paso es resumir y comunicar los resultados del AMEF dentro de la compañía, presentarlo a la alta gerencia y/o al cliente si así lo requiere.
- a. El formato puede ser especificado por la propia compañía y debe incluir lo siguiente:
 - b. Estatus final en comparación contra objetivos generales iniciales 5T's.
 - c. Un resumen del alcance del análisis identificando lo nuevo y cómo se desarrollaron las funciones.
 - d. Un resumen de los riesgos más altos y las acciones a realizar para disminuirlos.
 - e. Un plan de acción para las tareas resultantes. (Automotive Industry Action Group, 2017)

Para su aplicación, es requisito mandatorio ante IATF 16949:2016 en 4.4.1.2 Seguridad del producto, 7.5 Referente a la documentación de los cambios, 8.3 Diseño y desarrollo de los

productos y servicios (requiere específicamente AMEFD y AMEFP), 8.5 Producción y provisión del servicio, 8.7 Control de las salidas no conformes, 9.2 Auditoría interna, 9.3 Revisión por la dirección y 10.2 No conformidad y acción correctiva. (International Automotive Task Force, 2016)

1.12.2. Plan de Control (CP)

El CP es una metodología que ayuda en la manufactura de productos de calidad y que van acordes a los requerimientos del cliente. Es una descripción escrita del sistema para controlar partes y procesos y es usado a lo largo del ciclo de vida del producto. Un solo plan de control puede aplicar a un grupo o familia de productos que sean fabricados por el mismo proceso en la misma fuente.

Los elementos que deben de componer el Plan de Control son:

1. Datos generales.
2. Control del producto.
3. Control del proceso.
4. Métodos.
5. Plan de reacción.

Durante el APQP el Plan de Control se genera en 3 diferentes fases:

1. Prototipos: En esta fase del CP se incluyen descripciones de las medidas dimensionales, material y ensayos del desempeño realizados durante la construcción del prototipo. Se realiza en la fase 2 del APQP.

2. **Prelanzamiento:** En esta fase, se incluyen descripciones de las medidas dimensionales, material y ensayos del desempeño realizadas después de la construcción de prototipos y antes de la producción. Se realiza en la fase 3 del APQP.
3. **Producción:** En este, se documentan las características del producto/proceso, de los controles del proceso, de los ensayos y de los sistemas de medición que tienen lugar durante la producción en serie. Se realiza en la fase 4 del APQP. (Automotive Industry Action Group, 2008)

Esta herramienta tiene 3 principales objetivos:

1. **Satisfacción del Cliente:** Se orientan a recursos de los procesos y productos relacionados con características que son importantes para los clientes.
2. **Calidad:** Reduce desperdicio, retrabajo y mejora la calidad del producto durante las diferentes fases.
3. **Comunicación:** Identifica y comunica cualquier cambio en las características del producto/proceso, método de control y medición.

Es importante que el equipo encargado de realizar dicho plan debe de tener conocimiento básico de proceso y debe de considerar información como:

- Diagrama de flujo del proceso.
- AMEFD/AMEFP.
- Características Especiales.
- Planos, dibujos, etc. (Lean Six Sigma International, 2022)

Para su aplicación, es requisito mandatorio ante IATF 16949:2016 en 8.5 Producción y provisión del servicio, el punto 8.5.1.1 solicita, entre otros requerimientos, el desarrollo de planes de control en sus tres fases. Siempre son auditable tanto por el cliente como por auditor IATF. Las operaciones descritas en el Plan de Control deben coincidir con el diagrama de flujo y el AMEFP. (International Automotive Task Force, 2016)

2. Método

2.1. Análisis de las pruebas experimentales

El estudio de la problemática sobre la distorsión resulta de la necesidad del cumplimiento de los requerimientos del cliente, buscando una respuesta ante las posibles causantes de la distorsión de los corazones considerando factores como humedad, tipo de resina, porcentaje de resina y el tipo de arena.

Para el análisis de estos factores se llevan a cabo pruebas para poder tener un plan de control ante estos, como lo son; pruebas de AFS GFN, resistencia, distorsión y humedad. A continuación se muestran los equipos necesarios para realizar estas pruebas.

2.1.1. AFS GFN

Para realizar el tamizaje de las arenas es necesario pesar una muestra de 100 gramos ± 0.5 , posteriormente se añade la muestra en la maquina Ro-Tap donde se cierna en mallas de 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270 y PAN lo equivalente a 425, 300, 212, 150, 106, 75 y 53 micrones respectivamente, esto durante 15 minutos de acuerdo con los estándares de la AFS para un correcto cernido, posterior a esto se va pesando por retenido en cada malla para obtener la granulometría de la arena.



Figura 9 Cuarteadora



Figura 10 Ro-Tap.



Figura 11 Báscula.

2.1.2. Resistencia a la flexión

Con una mezcla de arena con resina se mete en la sopladora universal para hacer briquetas de 1" x 1" x 8" de acuerdo con el estándar de la AFS, después de realizarlas se someten en un equipo para ver su resistencia inmediata y su desarrollo a una hora de curado, la especificación puede variar dependiendo de la pieza estudiada.



Figura 12 Máquina Gaylord.



Figura 13 Equipo para Resistencia.

2.1.3. Distorsión en caliente

Para el análisis, con una mezcla de arena con resina, se realizan briquetas en la Máquina Gaylord con dimensiones de 1/4" x 1" x 4" acorde al estándar de la AFS, posterior a esto, se llevan al tester de distorsión en caliente en donde se someten a una flama constante donde se mostrara su distorsión en caliente y su tiempo total a la fractura.



Figura 14 Tester de Distorsión en Caliente.

2.1.4. Humedad

Se realizan las mezclas de arena con resina, añadiéndole el porcentaje de agua presente en esta, con la finalidad de ver si el comportamiento es causante de la distorsión en los corazones, si es así, se deben de verificar silos, tuberías por donde pasa la arena y la arena recibida para ver en donde se ha humedecido.



Figura 15 Mezcladora.

3. Resultados

Después de haber realizado la pruebas correspondientes para el estudio de distorsión de los corazones de arena, se han obtenido los siguientes resultados:

3.1. Análisis de humedad

Primeramente se hizo el estudio granulométrico correspondiente para confirmar el AFS GFN de cada arena que se utiliza actualmente dentro de la empresa. Los parámetros establecidos en la especificación para la arena nueva son de AFS GFN 40 y para la arena recuperada de AFS GFN 55.

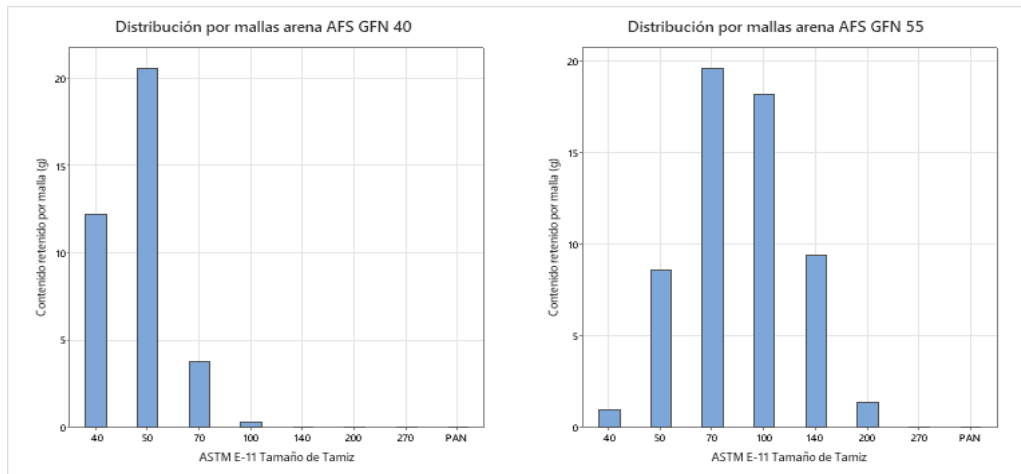


Figura 16 Distribución por mallas de arena AFS GFN 40 y 55.

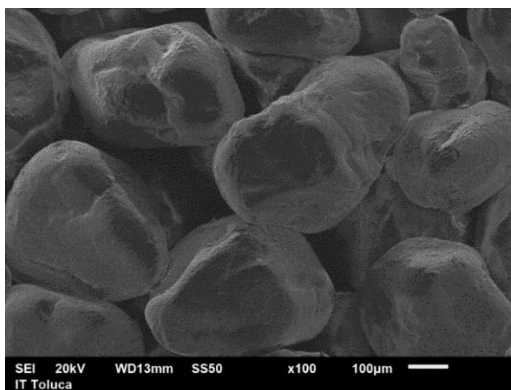


Figura 17 Morfología de arena nueva.

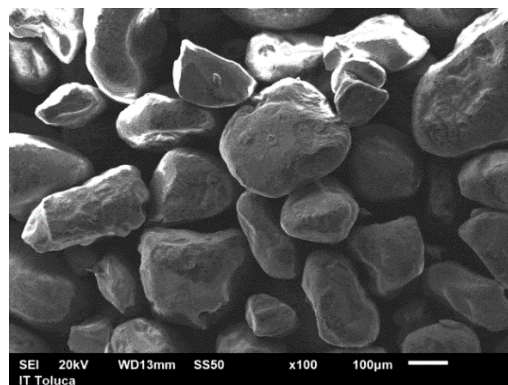


Figura 18 Morfología de arena recuperada.

Posterior a esto, se realizaron pruebas con distintos parámetros de humedad presente dentro de la mezcla para realizar los corazones de arena, las cantidades

para realizar la mezcla con arena recuperada y arena nueva además de los dos sistemas de resina Tipo A y Tipo B utilizados actualmente, fueron las siguientes:

- 4kg de arena Sílica (nueva y recuperada).
- 0.4% de resina parte 1 (16 gramos).
- 0.4% de resina parte 2 (16 gramos).
- 0%, 0.2%, 0.4%, 0.8% de agua (0, 8, 16 y 32 gramos).

Se comienza a realiza un ciclo de mezclado en la maquina mezcladora Simpson, se procede a sacar la mezcla y se lleva a la maquina Gaylord para soplar probetas para realizar el estudio de resistencia inmediata y probetas más para realizar el estudio de desarrollo de resistencia a una hora, ya que este tiempo es crucial para saber si va a tener un correcto funcionamiento el corazón de arena, en base a esto, se obtuvo lo siguiente:

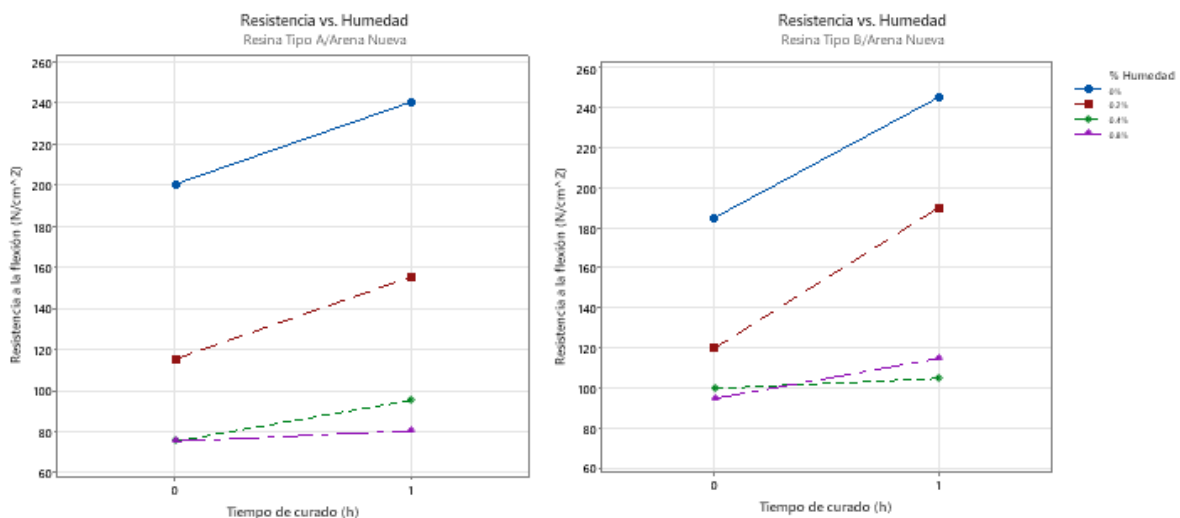


Figura 19 Gráfica de desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina con arena nueva en distintas condiciones de humedad.

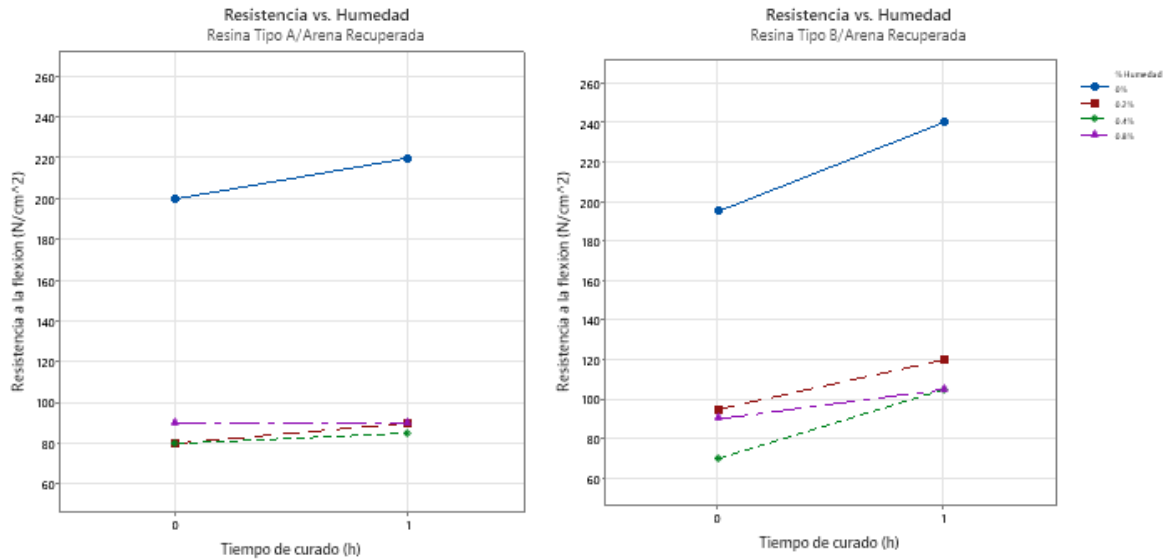


Figura 20 Gráfica de desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina con arena recuperada en distintas condiciones de humedad.

Para los análisis de resistencia a la flexión trabajando con ambos sistemas de arena (AFS GFN 40 y 55) y resina (A y B), no cumple con la resistencia requerida cuando existe presencia de agua en la mezcla, independientemente del sistema de resina que se esté utilizando o del tipo de arena que se use.

3.2. Análisis de resistencia modificando el porcentaje de resina

Como se ha mencionado anteriormente en este trabajo, cada sistema de resina está compuesto por dos partes (parte 1 y parte 2), cada una de estas afectan directamente las propiedades mecánicas del corazón de arena (véase en el apartado 1.4 Proceso de fabricación de corazones en caja fría).

El objeto de estudio ha sido analizar si al modificar el porcentaje de cada parte de resina de manera proporcional, gracias a los aditivos con los que vienen dichas resinas, se pueden mantener las propiedades mecánicas que se encuentren dentro de las especificaciones de la empresa.

El estándar manejado es una proporción 50/50, por lo que para un corazón que maneje 0.8 de resina, será 0.4 para la parte 1 y 0.4 para la parte 2.

Las condiciones utilizadas para este estudio fueron las siguientes:

- Resina Tipo A con arena recuperada
 - Proporción 60/40
 - Proporción 50/50
 - Proporción 40/60
- Resina Tipo B con arena recuperada, siendo respectivamente las mismas proporciones para esta.

Después de realizar las pruebas correspondientes, los resultados para el estudio del desarrollo de resistencia fue lo siguiente para las resinas A y B:

3.2.1. Desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina y arena recuperada

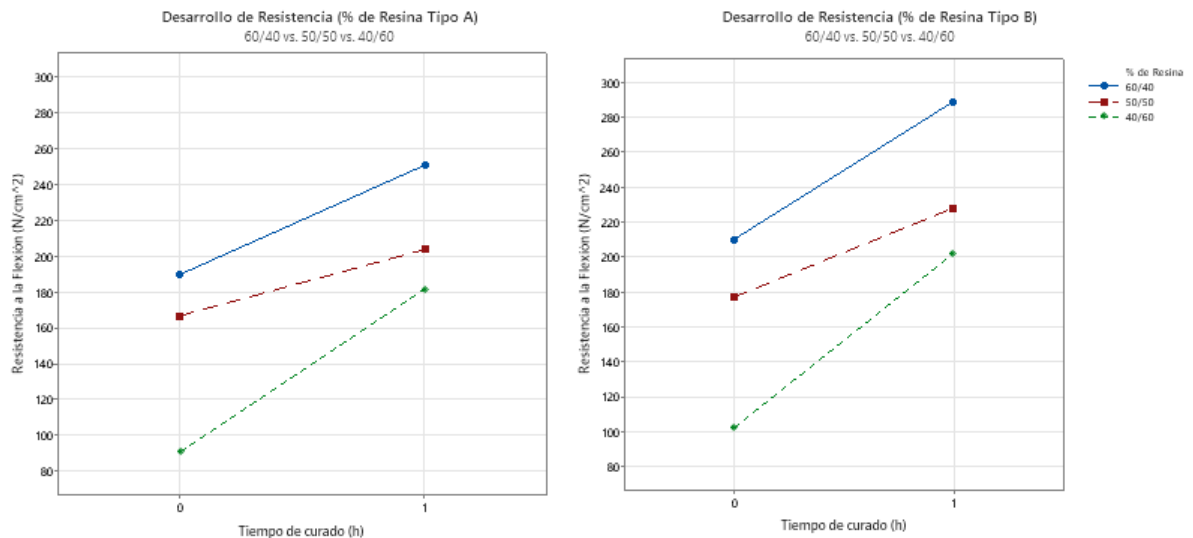


Figura 21 Gráfica de desarrollo de resistencia para ambos sistemas de resina con arena recuperada para el análisis de porcentaje de resina.

Como se puede observar, las proporciones de resina, se afecta directamente a sus propiedades mecánicas, en el caso de la proporción 60/40 se obtuvo una mayor resistencia inmediata y un mayor desarrollo de esta a una hora, en el caso de la proporción 40/60 disminuyo considerablemente esta resistencia para ambos casos y quien mejor resistencia ha presentado ha sido la resina Tipo B.

Por su parte, es importante analizar la vida de banco que presentan las mezclas, debido a que al momento de modificar el porcentaje también estamos aumentando o disminuyendo su vida de banco, por lo que se obtuvo lo siguiente:

3.2.2. Vida de banco para ambos sistemas de resina y arena recuperada

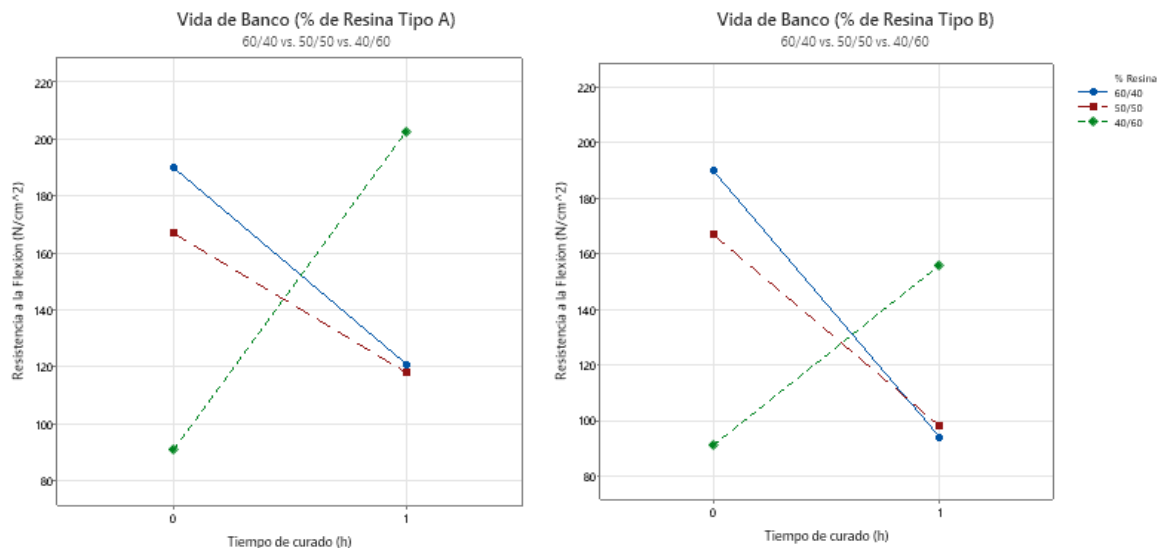


Figura 22 Gráfica de vida de banco para ambos sistemas de resina con arena recuperada para el análisis de porcentaje de resina.

En cuanto a la resina Tipo A, la proporción que nos ha dado mayor vida de banco ha sido la 40/60, esto debido a que la parte 2 de la resina va relacionada directamente a esta propiedad mecánica de la mezcla, lo mismo podemos observar con la resina Tipo B, siendo la misma proporción la que nos ha dado mayor vida de banco, siendo la resina Tipo A la que mejores

resultados ha proporcionado a una hora de haber realizado la mezcla, sus propiedades mecánicas se han conservado de mejor manera que la resina Tipo B.

3.3. Análisis de Distorsión

Para este estudio se trabajó con los dos sistemas de resina con el fin probar y comparar el comportamiento y definir cuál es el mejor sistema de resina. Se observó el comportamiento de las regiones características de esta prueba, en donde vemos su distorsión y su tiempo total a la fractura (véase apartado 2.1.3 Distorsión en caliente) obteniendo lo siguiente:

3.3.1. Comparación de los sistemas de resina: Resina Tipo A vs. Tipo B

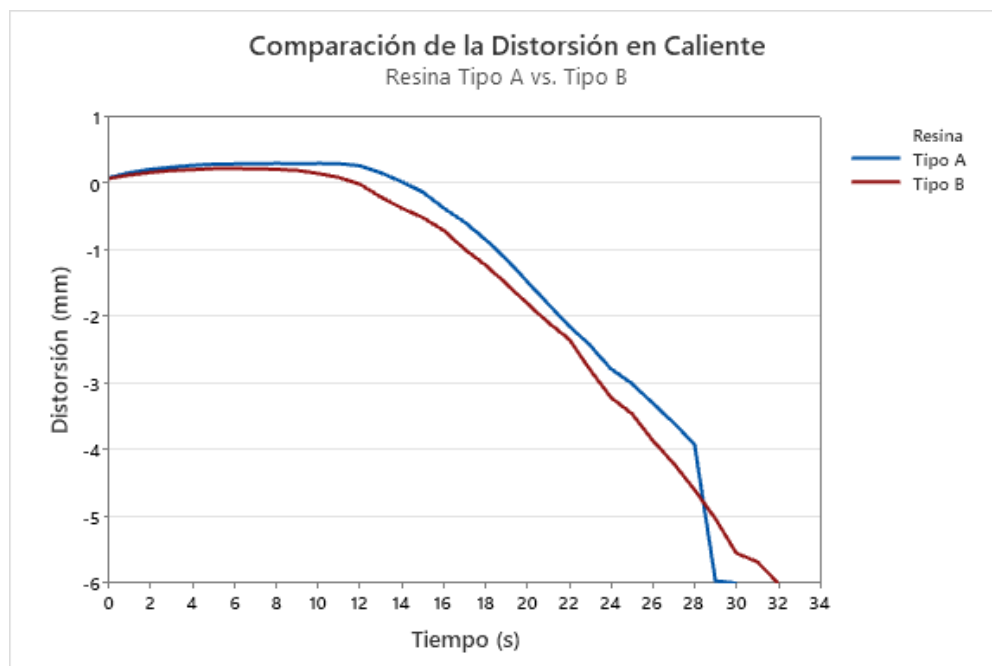


Figura 23 Comparación de los sistemas de resina tipo A vs. B para el análisis de distorsión.

Dentro del análisis de distorsión en caliente, la resina Tipo B ha sido la que menor distorsión en caliente ha presentado, sin embargo quien presenta un menor tiempo total para la fractura es la resina Tipo A.

3.4. Discusión

Para poder tomar una conclusión adecuada sobre cual o cuales son las variables del proceso de soplado de caja fría que tienen mayor influencia en la distorsión, se realizaron diseños de experimentos completos para cada uno de los estudios.

Estos se componen de una gráfica de efectos principales, que nos ayuda a definir cuáles son los factores que estadísticamente son significativos; también se realizó una gráfica de interacción para ver cómo se comporta la interacción entre cada uno de los factores, y por último la gráfica de regresión factorial que nos ayudara a definir cuál de los factores tienen mayor impacto, ya sea por si solos o en interacción con otros.

3.4.1. DOE para la Resistencia a la flexión vs. Humedad

3.4.1.1. Gráfica de efectos principales para el análisis de humedad

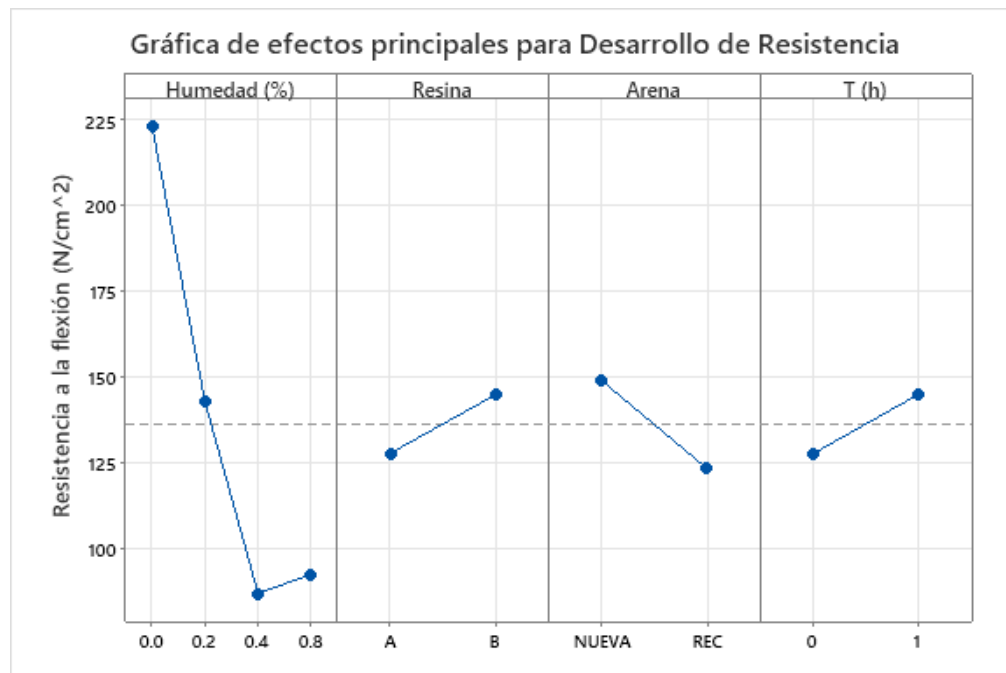


Figura 24 Gráfica de efectos principales para el análisis de humedad.

La gráfica de manera general nos indica cuales son las condiciones que generan por si solas una mayor resistencia en el corazón. La humedad si tiene gran

significancia en la resistencia de los corazones y como se mencionó, a partir de 0.2% sus propiedades mecánicas no son útiles, por otro lado la resina B presenta una mayor resistencia en todas las condiciones, al igual que la arena nueva. En cuanto al tiempo, este es crucial debido a que el corazón al salir de la sopladora, la amina ya ha realizado su función de curado y cumple con el 70-80% de este, el resto lo obtiene a una hora de haberse soplado.

3.4.1.2. Gráfica de interacción para el análisis de humedad

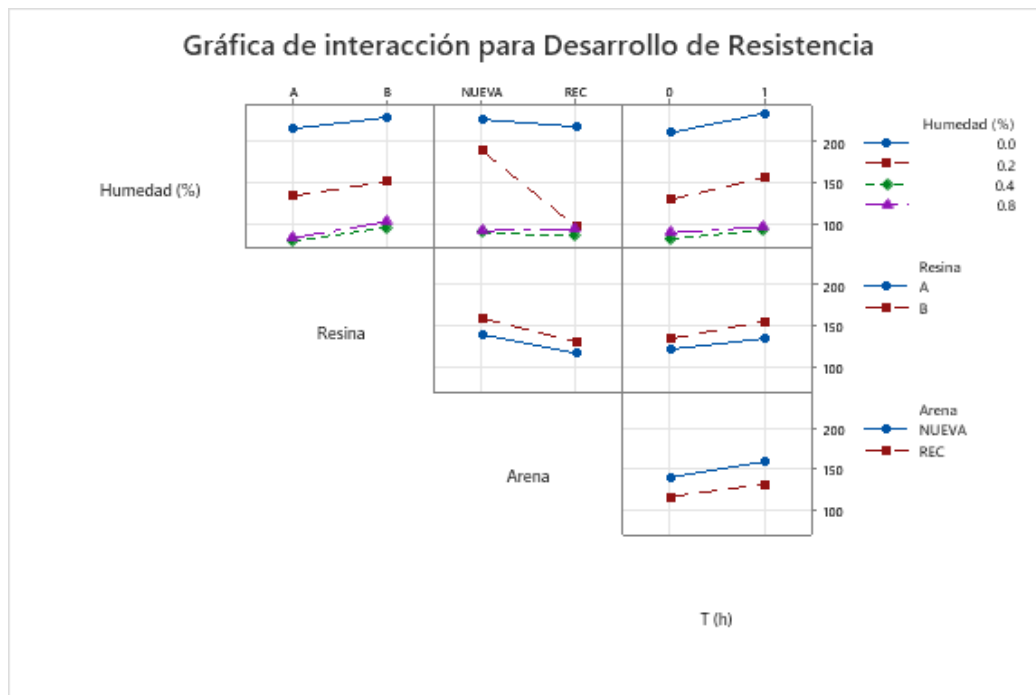


Figura 25 Gráfica de interacción para el análisis de humedad.

La gráfica nos ofrece la interacción que existe entre cada uno de los factores.

Empezando con el primer nivel de la matriz se tienen las interacciones Humedad-Resina, en donde ambas resinas son estadísticamente iguales, sin embargo quien muestra un mejor desempeño es la Tipo B, aunque ambas reducen sus propiedades mecánicas en presencia de humedad.

La interacción Humedad-Arena, muestra que con la arena nueva se genera mayor resistencia, incluso con humedad de 0.2%, siendo significativamente mejor que con la arena recuperada, sin embargo, con mayor presencia de humedad, ambas arenas siguen sin cumplir con las especificaciones.

En cuanto a la interacción Humedad-Tiempo podemos ver que los resultados son estadísticamente iguales en el sentido de que una hora después de haberse soplado habrá aumentado su resistencia, sin embargo como en los casos anteriores no se cumple con el mínimo requerido a partir de 0.2% de humedad.

En el segundo nivel de la matriz tenemos las interacciones Resina-Arena y Resina-Tiempo.

En ambas interacciones la resina Tipo B es la que mejor resistencia nos genera, esto independientemente del tipo de arena que se utilice y también en generación de resistencia inmediata y a una hora.

El tercer nivel nos muestra la interacción de Arena-Tiempo, en donde la arena nueva genera una mayor resistencia tanto de forma inmediata como a una hora de su desarrollo.

3.4.1.3. Diagrama de regresión factorial general

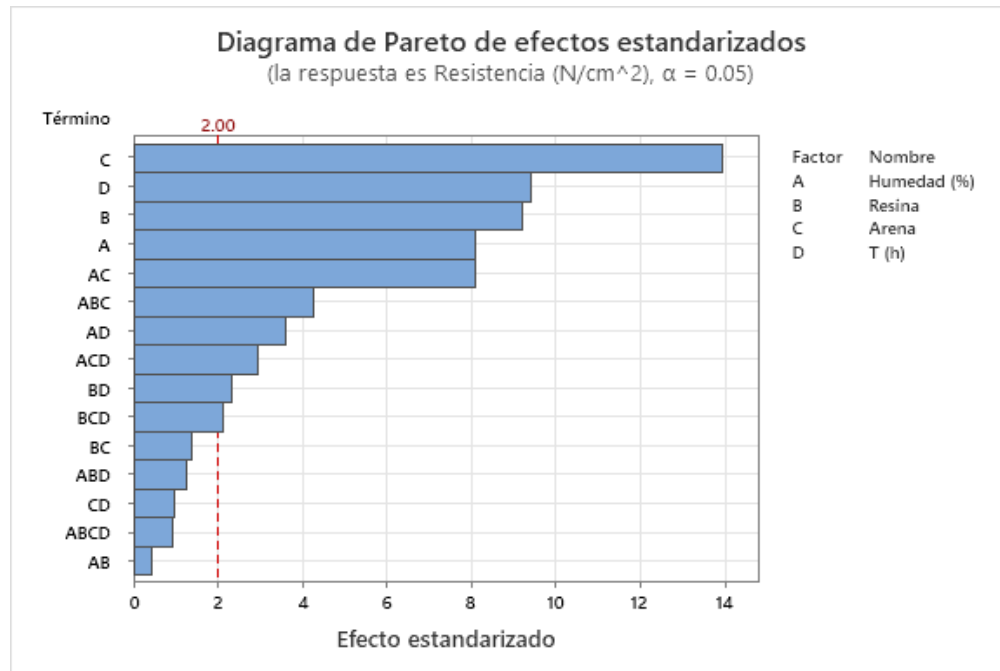


Figura 26 Diagrama de efectos estandarizados para el análisis de humedad.

Este diagrama nos sirve para determinar la magnitud y la importancia de los efectos. Acorde con los factores que se tienen para este estudio (A: Humedad(%), B: Resina, C: Arena y D: T(h)) los que tienen mayor relevancia sobrepasan la línea de referencia de acuerdo con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, teniendo primeramente a los factores, en orden, C, D, B y A por si solos, lo que significa que estadísticamente las variables de arena, tiempo, resina y humedad influyen directa y mayoritariamente en la resistencia de los corazones.

Así como también las interacciones AC, ABC, AD, ACD, BD Y BCD, muestran una significancia en la resultante de la resistencia.

3.4.2. DOE para el estudio modificando el porcentaje de resina

Para este estudio se realizaron dos diseños, con el fin de analizar el desarrollo de resistencia de la mezcla y su vida de banco, ya que como se ha mencionado anteriormente, cada parte de las resinas afecta directamente a alguna propiedad, la parte 1 a la resistencia y la parte 2 a la vida de banco.

3.4.2.1. Gráfica de efectos principales para el estudio modificando el porcentaje de resina para el desarrollo de resistencia

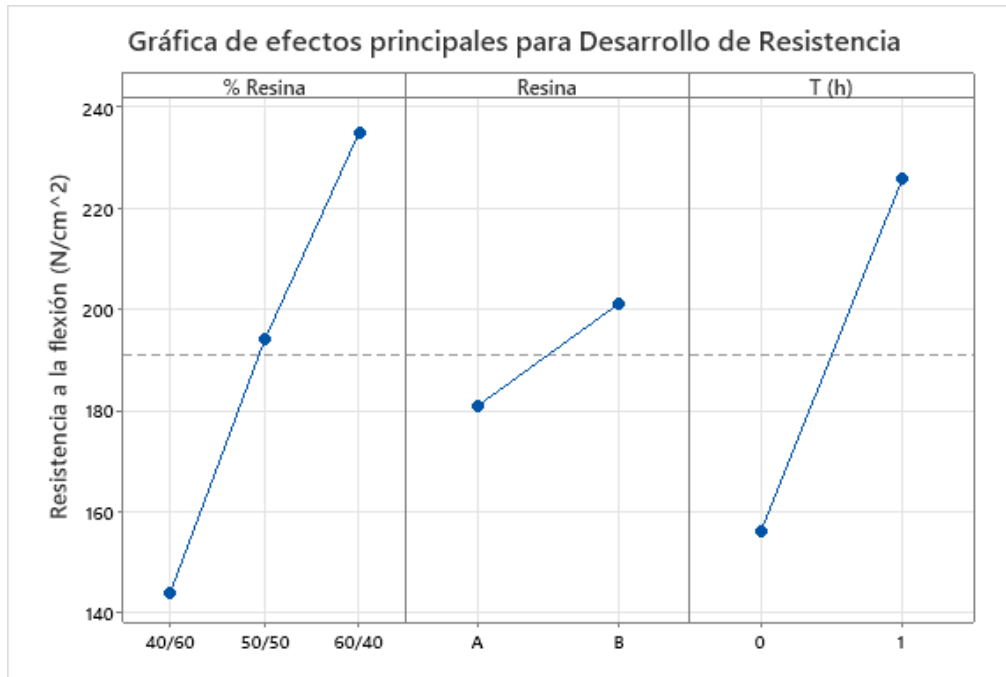


Figura 27 Gráfica de efectos principales de desarrollo de resistencia para el análisis de porcentaje de resina.

Por el lado del desarrollo de resistencia, trabajar con la proporción de resina 40/60 nos genera una menor resistencia, a diferencia de las otras proporciones, siendo la proporción 60/40 la que mayor resistencia nos genera. Por su parte la resina aunque ambas resinas nos cumplan con las especificaciones de resistencia, la resina Tipo B es quien mayor resistencia nos brinda. En cuanto al tiempo, como ya se ha dicho, es vital y es normal que después de una hora genere más resistencia, ya que en ese tiempo se cura al 100% el corazón, y a dos y cuatro horas es estadísticamente igual la resistencia.

3.4.2.2. Gráfica de efectos principales para el estudio modificando el porcentaje de resina para la vida de banco

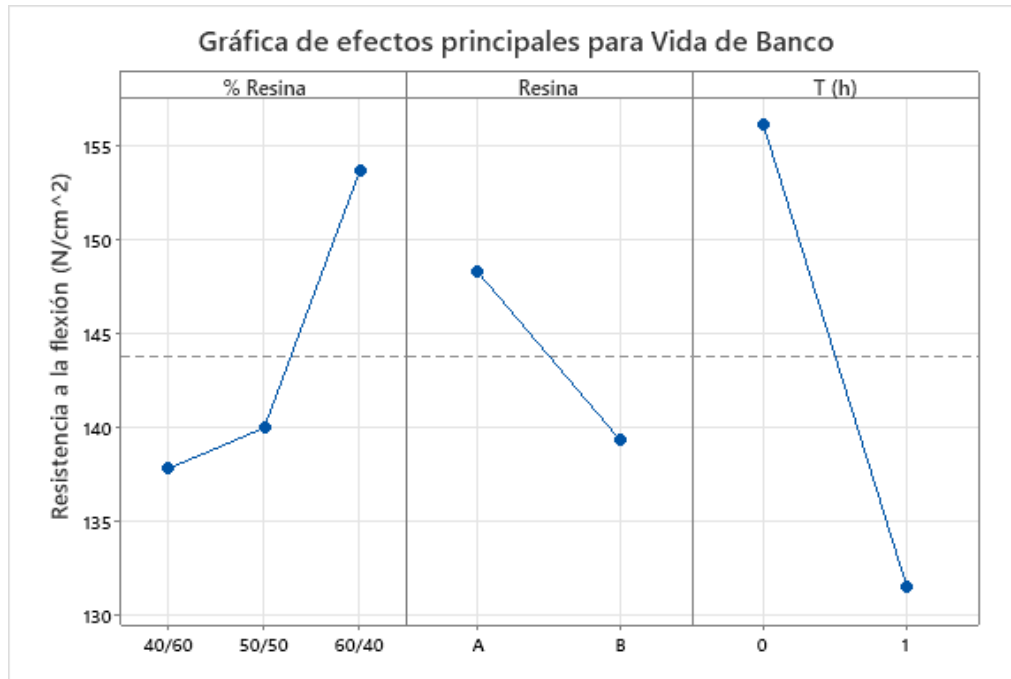


Figura 28 Gráfica de efectos principales de vida de banco para el análisis de porcentaje de resina.

En cuanto a la vida de banco, las proporciones 40/60 y 50/50 son estadísticamente iguales, cumpliendo con el hecho de que al aumentar la proporción de la parte 2, aumenta el tiempo de vida útil de la mezcla. Por su parte, la resina Tipo A presentó una mayor vida de banco que la resina Tipo B. Y la resistencia a una hora de la mezcla disminuye considerablemente, lo normal en una mezcla.

3.4.2.3. Gráfica de interacción para el estudio modificando el porcentaje de resina para el desarrollo de resistencia

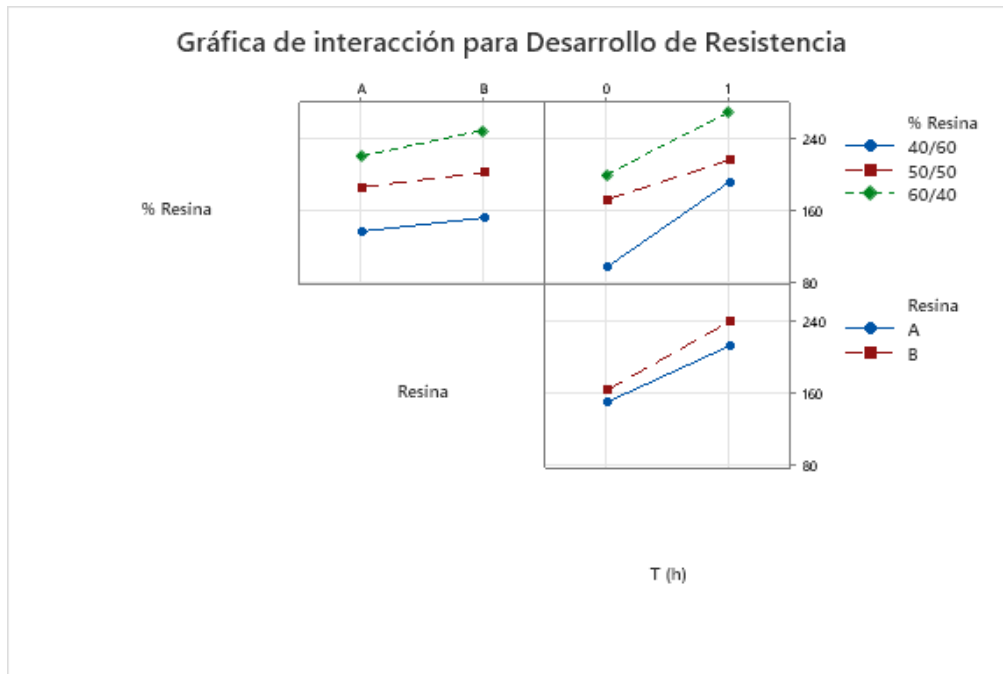


Figura 29 Gráfica de interacción de desarrollo de resistencia para el análisis de porcentaje de resina.

Dentro del primer nivel de la matriz para el desarrollo de resistencia en este estudio se encuentra la interacción % Resina-Resina y el % Resina-Tiempo. La primer interacción marca que en cualquier caso la resina Tipo B nos genera una mayor resistencia. Para la segunda interacción a una hora es mayor la resistencia, y es estadísticamente igual a dos o cuatro horas.

Para el segundo nivel de la matriz tenemos la interacción Resina-Tiempo, mostrando que la resina Tipo B presenta un mayor desarrollo de resistencia a una, dos y cuatro horas.

3.4.2.4. Gráfica de interacción para el estudio modificando el porcentaje de resina para la vida de banco

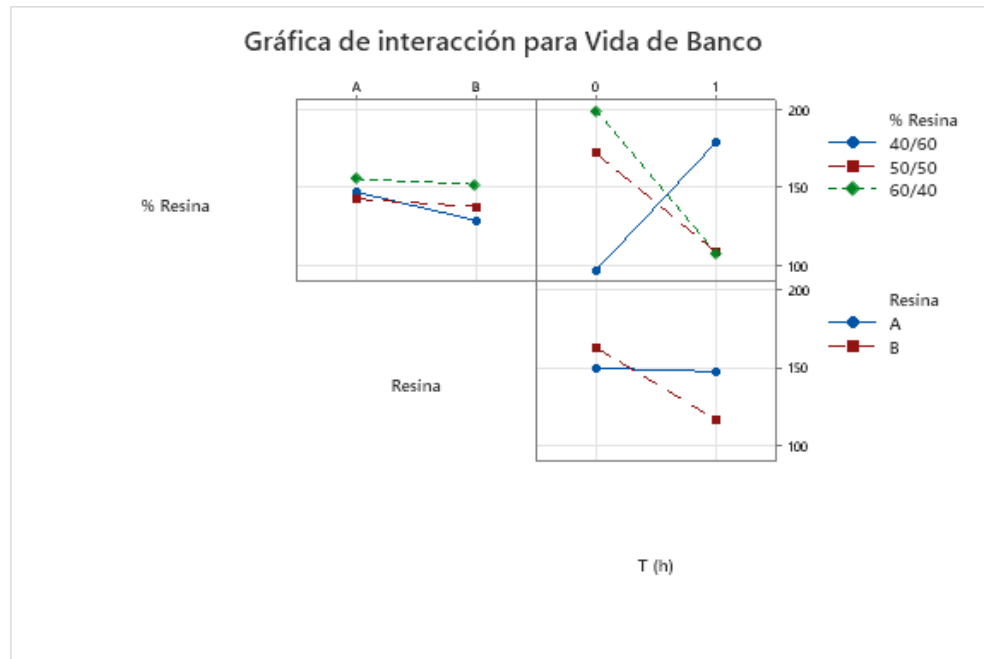


Figura 30 Gráfica de interacción de vida de banco para el análisis de porcentaje de resina.

Al igual que la anterior, tenemos 2 niveles en la matriz con las interacciones % Resina, Resina y T(h). El primer nivel en la interacción % Resina-Resina, la resina Tipo A nos proporciona una mayor vida de banco que la resina Tipo B, esto en cualquiera de las proporciones; para la interacción % Resina-T(h), la proporción 40/60 nos da una mayor vida de banco.

En el segundo nivel de la matriz para la interacción Resina-T(h), la resina Tipo A es quien mejor vida de banco nos da a una hora de su desarrollo.

3.4.2.5. Diagrama de regresión factorial para el desarrollo de resistencia

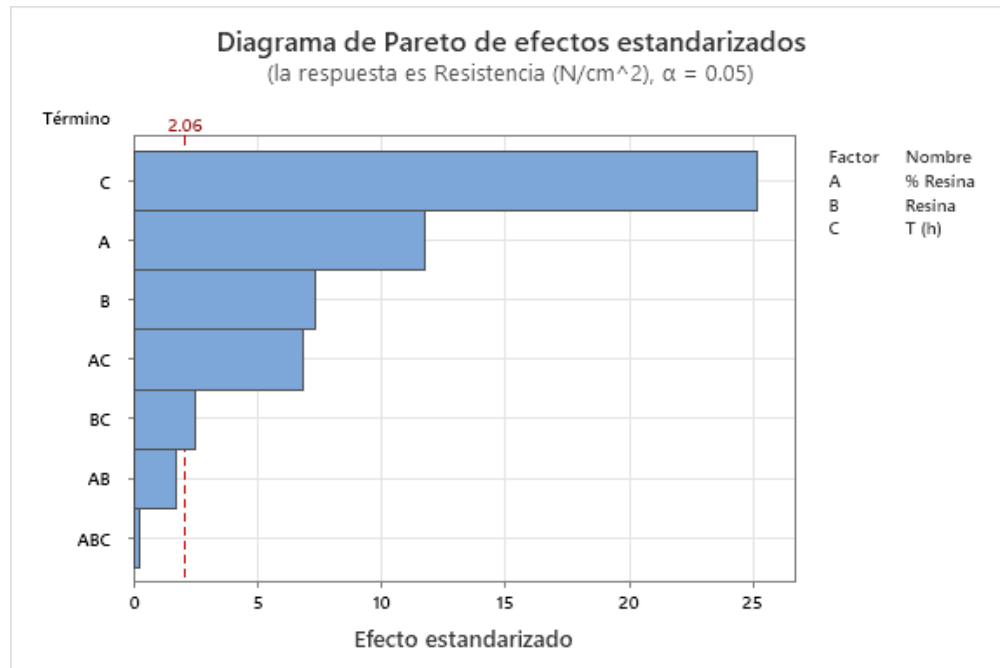


Figura 31 Diagrama de efectos estandarizados de desarrollo de resistencia para el análisis de porcentaje de resina.

Trabajando con una línea de referencia de 2.01 bajo un nivel $\alpha=0.05$ para el desarrollo de resistencia el factor B: Resina es quien mayor significancia tiene ante la variable de respuesta, seguido de los factores A: % Resina, C: T(h) y la interacción AC: % Resina-T(h). Las interacciones que menor efecto estadísticamente tienen son AB: % Resina-Resina y BC: Resina-T(h).

3.4.2.6. Diagrama de regresión factorial para la vida de banco

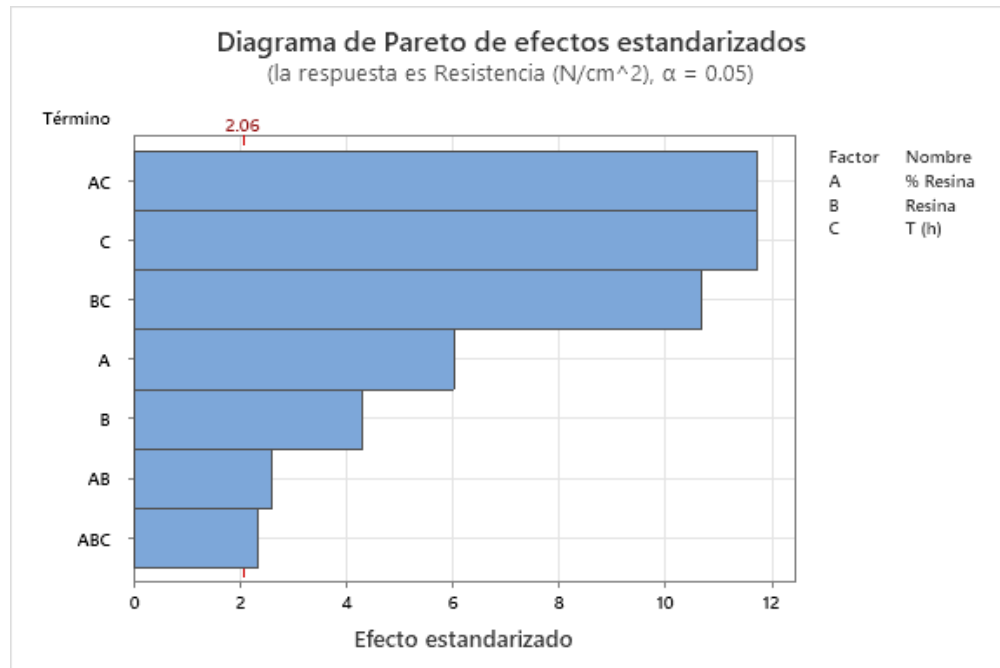


Figura 32 Diagrama de efectos estandarizados de vida de banco para el análisis de porcentaje de resina.

Para la vida de banco y trabajando con un nivel de $\alpha=0.05$ todos los factores e interacciones son estadísticamente significativos, quien mayor efecto tiene para la vida de banco es la interacción AC: % Resina-T(h) y el factor C por sí solo, esto seguido de la interacción BC: Resina-T(h), y quienes menor efecto tienen en la variable de respuesta es el factor A, B y las interacciones AB y ABC.

3.4.3. DOE para el estudio de distorsión en caliente

Al igual que el estudio anterior, para este se realizaron dos diseños de experimentos debido a que en este, se analizan dos variables de respuesta distintas, la parte de la distorsión en caliente que corresponde al tiempo en que tarda la arena en expandirse al máximo al momento del vaciado del aluminio y la parte de la tiempo total a la fractura, que es el tiempo de ruptura de todos los enlaces de resina y arena generados en el corazón.

3.4.3.1. Gráfica de efectos principales para el análisis de la distorsión en caliente

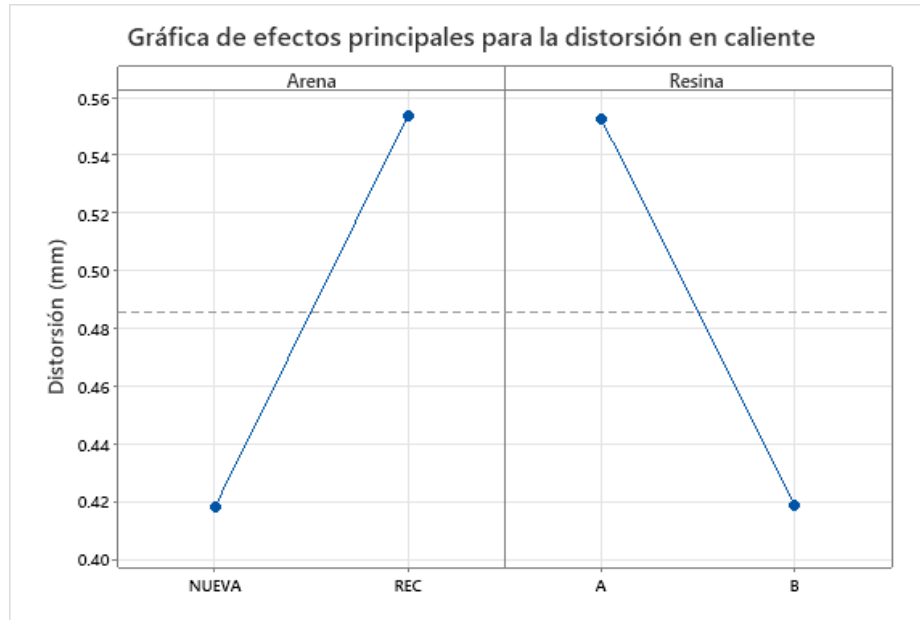


Figura 33 Gráfica de efectos principales para el análisis de distorsión.

Lo que nos muestra la gráfica es que con la arena recuperada con AFS GFN 55 se tiene una mayor distorsión, a diferencia de la arena nueva con AFS GFN 40. La resina que nos genera una mayor distorsión es la resina Tipo A, siendo mejor combinación la arena nueva con resina Tipo B.

3.4.3.2. Gráfica de efectos principales para el análisis de la tiempo total a la fractura

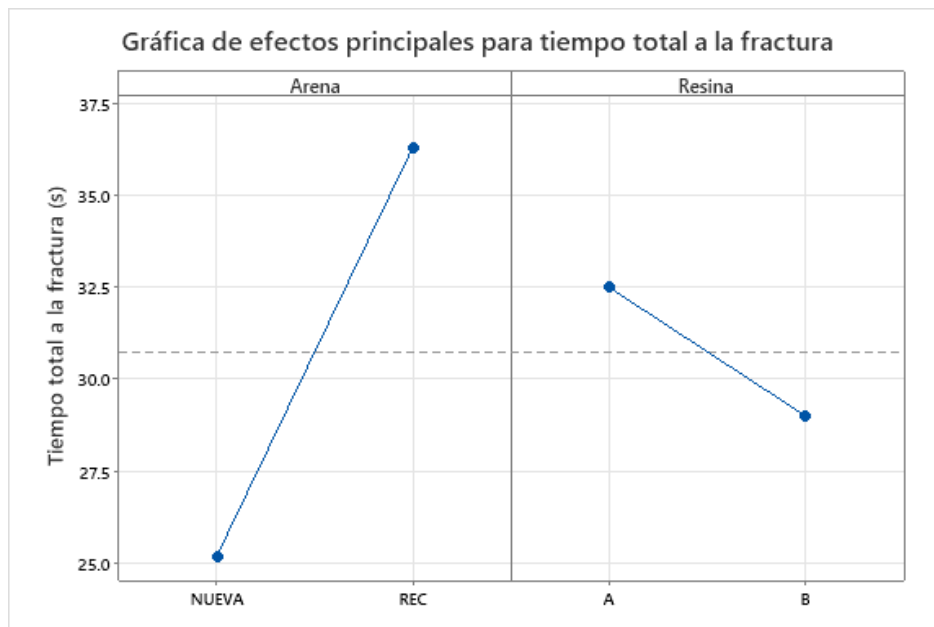


Figura 34 Gráfica de efectos principales para el análisis de tiempo total a la fractura.

La arena nueva es quien tiene un tiempo total a la fractura menor, siendo significativamente amplio el rango de diferencia entre arenas. En cuanto a la resina, la resina Tipo B sigue siendo quien presenta un mejor resultado ahora en la tiempo total a la fractura.

3.4.3.3. Gráfica de interacción para el análisis de distorsión en caliente

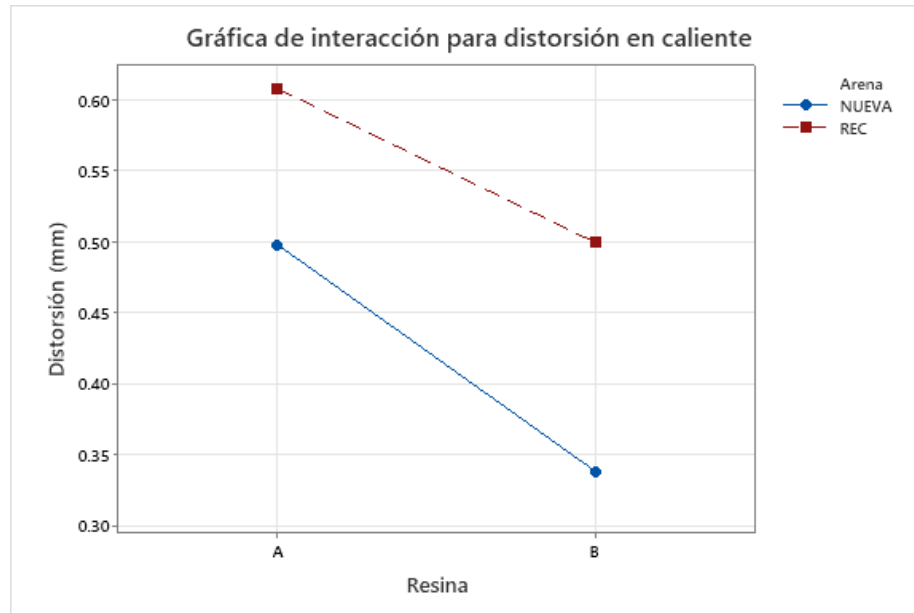


Figura 35 Gráfica de interacción para el análisis de distorsión.

La gráfica muestra que la distorsión en caliente es menor con cualquier arena utilizando la resina Tipo B, sin embargo, la combinación de arena nueva con resina Tipo B sigue siendo significativamente mejor.

3.4.3.4. Gráfica de interacción para el análisis de tiempo total a la fractura

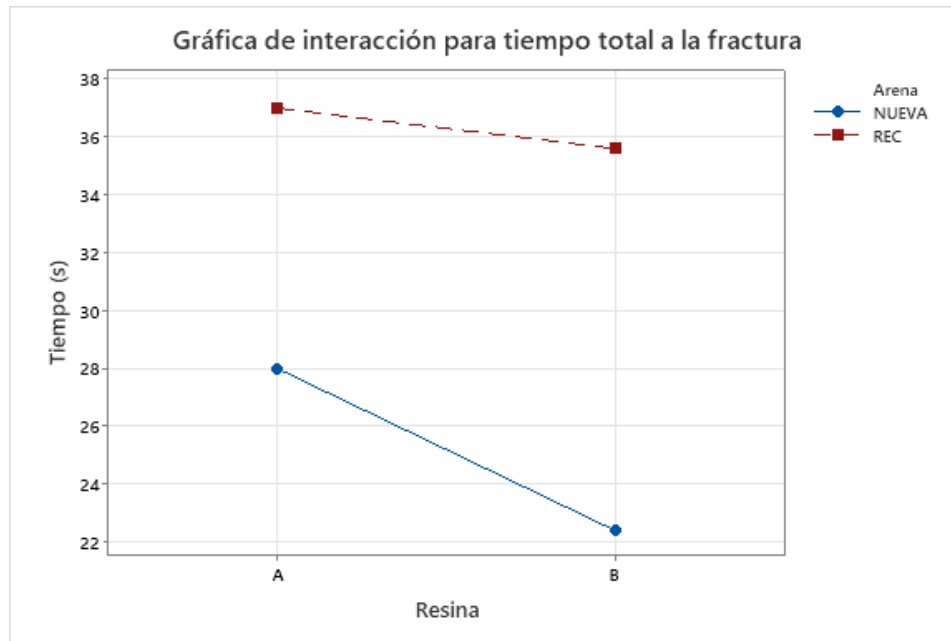


Figura 36 Gráfica de interacción para el análisis de tiempo total a la fractura.

Al igual que en la gráfica anterior, cualquier combinación de arena con la resina Tipo B nos genera una menor tiempo total a la fractura, y también con la combinación de arena nueva con resina Tipo B, sigue dando un menor tiempo de ruptura de dichos enlaces.

3.4.3.5. Diagrama de regresión factorial para la distorsión en caliente

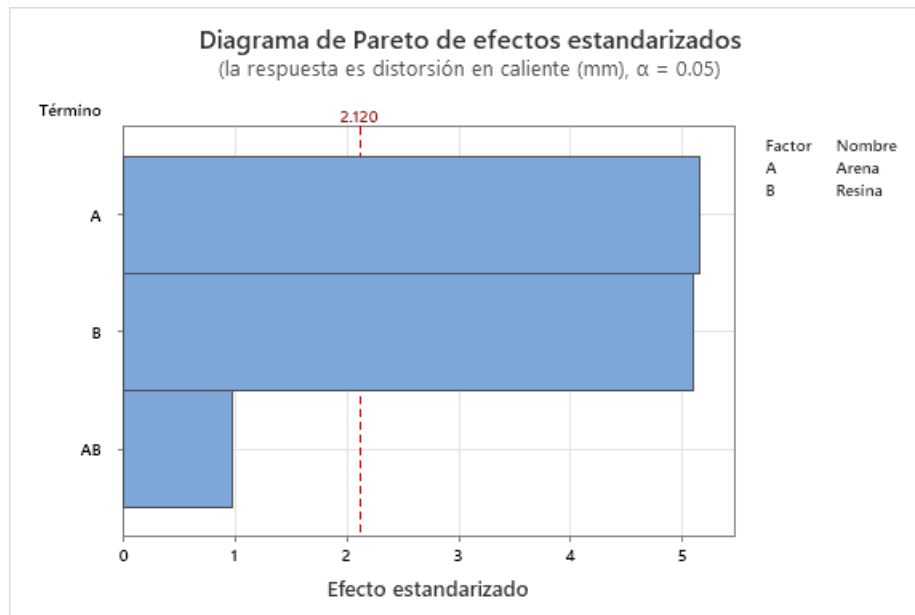


Figura 37 Diagrama de efectos estandarizados para el análisis de distorsión.

Trabajando con un $\alpha=0.05$ quien resulta ser estadísticamente más significativo es la arena, debido a que, primeramente, la arena Sílica es quien mayor expansión térmica genera a diferencia de otras arenas como lo pueden ser las de zirconio, cromita, sintéticas, etc. Por otro lado al no ser un grano totalmente redondo, es menos uniforme la expansión térmica. Aunque también es significativo el tipo de resina a usar, ya que este dependerá de los aditivos añadidos que pueda usar cada proveedor.

3.4.3.6. Diagrama de regresión factorial para la tiempo total a la fractura

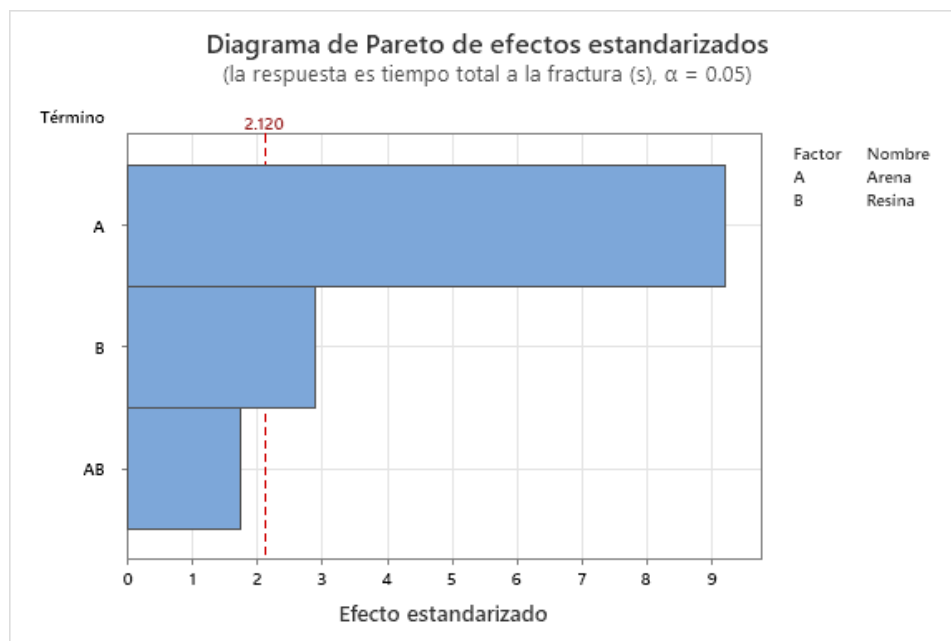


Figura 38 Diagrama de efectos estandarizados para el análisis de tiempo total a la fractura.

Por su parte, en cuanto a la tiempo total a la fractura el factor que genera un mayor efecto es la arena, esto debido a que una arena más gruesa o de geometría irregular tiende a ser más permeable pero es mayor el tiempo total a la fractura, seguido del factor de la resina, al igual que con la distorsión en caliente, la resina también puede contener aditivos que mejoren la tiempo total a la fractura del corazón.

4. Conclusiones

El presente trabajo permitió cumplir con el objetivo de analizar e identificar las variables dentro del proceso de caja fría que tienen un efecto en la distorsión de corazones de arena que se realizan con diferentes arenas de sílice y resinas orgánicas.

Después de haber realizado la experimentación pertinente podemos concluir que la humedad en principio no es el problema que genera la distorsión de los corazones, ya que las pruebas con humedad presente, a partir de 0.2% las propiedades mecánicas de los corazones son tan bajas que ni si quiera permitirían la utilización de los corazones para el vaciado de aluminio, el corazón se rompería debido a que no cumple con la resistencia inmediata ni el desarrollo de resistencia necesario, independientemente del sistema de arena y resina que se utilice.

Por su parte, la relación de proporción de resina parte 1 y parte 2 facilitó definir la mejor condición para cumplir con las especificaciones de resistencia inmediata, desarrollo de resistencia y su vida de banco, siendo 50/50 la mejor relación parte 1/parte 2.

Al trabajar con esta relación de resina, el diseño de experimentos indica que el factor que más influye en la distorsión en caliente es la arena, debido a que el coeficiente de expansión térmica de la arena sílica tiende a ser alto, a diferencia de otras arenas (cromita, zirconio, sintéticas, etc.).

El AFS GFN también tiene relación, ya que utilizando una arena más fina como lo es la arena recuperada y trabajando con la misma cantidad de resina, la distorsión es mayor porque no se recubre por la resina de la misma forma como lo es con la arena nueva obteniendo una menor resistencia térmica. La composición también tiene un efecto, la arena recuperada a ser reutilizada desde el mismo proceso contiene mayor cantidad de impurezas y por ende un mayor pH, generando un curado menor al que se obtendría con arena nueva que tiene un pH menor.

Por último, el análisis mostro que la resina también influye dentro de esta variable de respuesta, esto ya dependerá de los aditivos que cada proveedor pueda añadir a las resinas para contrarrestar la distorsión.

Con todo esto se puede determinar qué factores como la arena y el tipo de resina, son lo que generan un mayor efecto en la distorsión de los corazones de arena, a partir de esto se pueden elegir las condiciones óptimas para realizar corazones de arena sin sacrificar sus propiedades mecánicas.

5. Recomendaciones

Derivado de los hallazgos obtenidos a partir de esta investigación se identifican oportunidades de mejora que se expresan a través de las siguientes recomendaciones:

- Controlar el contenido de humedad menor a 0.2% en la mezcla para garantizar las propiedades mecánicas del corazón.
- Ocupar la arena nueva AFS GFN 40 que tiene menor expansión térmica, principalmente con corazones de complejidad superficial alta.
- Si la decisión es trabajar con la arena recuperada AFS GFN 55, utilizar el sistema de resina Tipo B.
- Realizar inspecciones automatizadas de superficies trabajando bajo las condiciones de relación de resina 50/50 siendo la mejor opción la resina Tipo B.
- Probar con nuevas opciones de resinas que sean iguales o mejoren las propiedades mecánicas considerando el costo-beneficio, tomando en cuenta otras variables de respuesta como lo es la evolución de gases y el tiempo total a la fractura para un correcto desarenado.

Estas recomendaciones buscan contribuir a la mejora continua de los procesos de fundición mediante la optimización de materiales y condiciones de operación en la fabricación de corazones de arena utilizando resinas orgánicas.

Referencias

American Foundry Society. (2015). Acid Demand Value (ADV) of Sand. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 1-25,1-26). Shcaumburg, IL: AFS.

American Foundry Society. (2015). Gas Evolution. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 5-51,5-52). Shcaumburg, IL: AFS.

American Foundry Society. (2015). Grain Fineness Number, AFS GFN, Calculation. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 1-9,1-14). Shcaumburg, IL: AFS.

American Foundry Society. (2015). Hot Distortion. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 3-41,3-42). Shcaumburg, IL: AFS.

American Foundry Society. (2015). Loss on Ignición, LOI. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 5-3,5-4). Shcaumburg, IL: AFS.

American Foundry Society. (2015). Permeability, Mold and Core. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 5-21,5-22). Shcaumburg, IL: AFS.

American Foundry Society. (2015). pH of Sand. En A. F. Society, *Mold & Core Test Handbook* (págs. 5-9,5-10). Shcaumburg, IL: AFS.

Automotive Industry Action Group. (2008). *Manual de Planeación Avanzada para la Calidad de Productos y Planes de Control*. United States: AIAG.

Automotive Industry Action Group. (2010). *Manual de Análisis de Sistemas de Medición*. United States: AIAG.

Automotive Industry Action Group. (2010). *Manual para Aprobación de Partes para Producción*. United States: AIAG.

Automotive Industry Action Group. (2010). *Manual para el Control Estadístico del Proceso*.

United States: AIAG.

Automotive Industry Action Group. (2014). *Core Tools Self-Assessment Key Terms*. AIAG.

Automotive Industry Action Group. (2017). *FMEA Handbook*. United States: AIAG.

Ballesteros, D. G. (2003). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN AGLUTINANTE ORGÁNICO PARA LA FABRICACIÓN DE CORAZONES*. Coahuila.

Carey, P. R., & Archibald, J. (s.f.). Sand Binder Systems Part X: The Phenolic Urethane Amine Cold Box Systems. En P. R. Carey, *Foundry Management & Technology* (págs. 53-58). Columbus, OH: Penton.

Decano, A., Voss, D., & Draguljic, D. (2017). *Desing and Analysis of Experiments*. Suiza: Springer International Publishing AG.

Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: McGraw-Hill.

Herrera, A. E. (2003). *EFFECTO DE LOS ADITIVOS EN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE UNA MEZCLA DE ARENA EMPLEADA EN LA FABRICACIÓN DE MOLDES Y CORAZONES POR EL PROCESO DE CAJA FRÍA*. Coahuila.

International Automotive Task Force. (2016). *Norma del Sistema de Gestión de Calidad Automotriz IATF-16949:2016*. United States: AIAG.

International Lean Six Sigma. (2023). *Manual de Estadística Aplicada*. Guadalajara: International Lean Six Sigma.

Lean Six Sigma International. (2022). AMEF - Análisis del Modo y Efecto de Falla. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 15-26). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). APQP/PC - Planeación Avanzada de la Calidad y Plan

de Control. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 4-11). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). Índices de Procesos. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 42-45). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). Intro DOE. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento Black Belt* (págs. 20-24). Guadalajara.

Lean Six Sigma International. (2022). *Manual de Entrenamiento de Core Tools*. Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). MSA - Análisis de los sistemas de medición. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 27-36). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). Plan de control. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 12-14). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). PPAP - Proceso de Aprobación de Partes para Producción. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 46-51). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

Lean Six Sigma International. (2022). SPC - Control Estadístico del Proceso. En L. S. International, *Manual de Entrenamiento de Core Tools* (págs. 37-41). Guadalajara: Lean Six Sigma International.

López, J. R. (2001). *EFEECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE MOLDES Y CORAZONES PRODUCIDO POR EL PROCESO FENOL - URETANO EN CAJA FRÍA*. San Nicolás de los Garza.

- Nañez, C. E. (2011). *Efecto de los aglutinantes organicos e inorganicos sobre arenas angulares para fabricación de corazones de fundición*. Monterrey: FIME-UANL.
- Rodríguez Ramírez, S. A., & Solis Aguilar, L. R. (2002). *DISEÑO DE PROPUESTAS DE CAMBIO EN LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN LA FABRICACIÓN DE CORAZONES DE ARENA PARA LA PRODUCCIÓN DE CABEZAS DE MOTOR AUTOMOTRICES*. San Pedro de la Garza García.
- Rodríguez, R. D. (2001). *EL EFECTO DE LOS COMPONENTES DE UNA MEZCLA DE ARENA UTILIZADA EN LA FABRICACIÓN DE MOLDES Y CORAZONES SOBRE EL FENÓMENO DE LA DISTORSIÓN*. Coahuila.
- Valdez, A. A. (2010). *DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE INORGÁNICO PARA LA PRODUCCIÓN DE CORAZONES DE ARENA EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ*. San Nicolás de los Garza.
- Vallone Flores, L., & García Vallejo, R. (1999). *INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DE RESINAS Y SU CONCENTRACIÓN EN LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE CORAZONES DE ARENA*. San Pedro Garza García.

Anexos

Anexo 1. ANOVA para el diseño de experimentos de humedad

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	31	359848	11608.0	141.89	0.000
Lineal	6	316565	52760.9	644.90	0.000
Humedad (%)	3	286410	95470.0	1166.94	0.000
Resina	1	6953	6953.0	84.99	0.000
Arena	1	15939	15939.3	194.83	0.000
T (h)	1	7263	7262.8	88.77	0.000
Interacciones de 2 términos	12	38973	3247.7	39.70	0.000
Humedad (%)*Resina	3	124	41.3	0.51	0.680
Humedad (%)*Arena	3	36551	12183.7	148.92	0.000
Humedad (%)*T (h)	3	1620	540.0	6.60	0.001
Resina*Arena	1	153	152.5	1.86	0.177
Resina*T (h)	1	446	446.3	5.46	0.023
Arena*T (h)	1	79	78.8	0.96	0.330
Interacciones de 3 términos	10	4045	404.5	4.94	0.000
Humedad (%)*Resina*Arena	3	2117	705.8	8.63	0.000
Humedad (%)*Resina*T (h)	3	376	125.2	1.53	0.215
Humedad (%)*Arena*T (h)	3	1180	393.4	4.81	0.004
Resina*Arena*T (h)	1	372	372.1	4.55	0.037
Interacciones de 4 términos	3	265	88.3	1.08	0.364
Humedad (%)*Resina*Arena*T (h)	3	265	88.3	1.08	0.364
Error	64	5236	81.8		
Total	95	365084			

Figura 39 ANOVA de análisis de humedad.

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
9.04503	98.57%	97.87%	96.77%

Figura 40 Modelo del análisis de humedad.

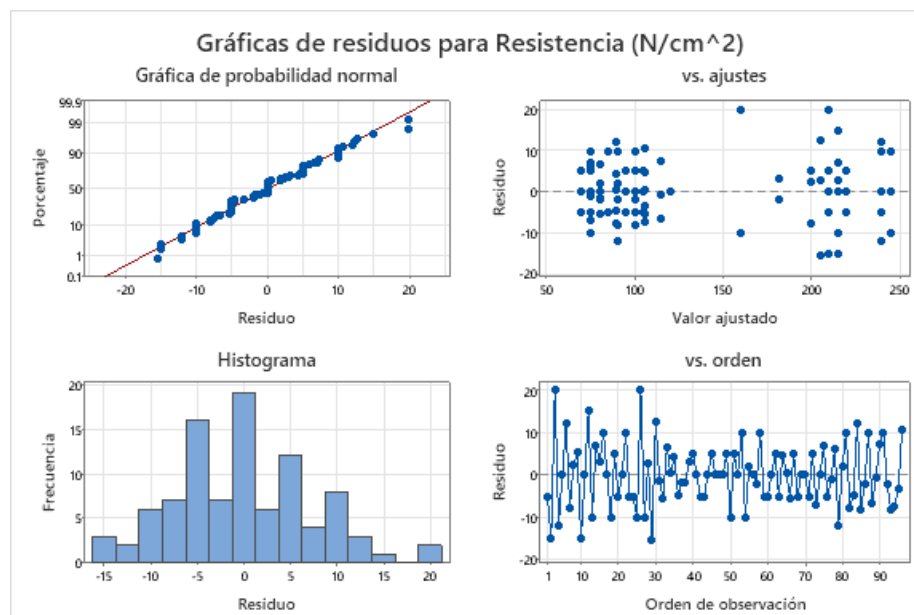


Figura 41 Gráfica de residuos para el análisis de humedad.

Anexo 2. ANOVA para el diseño de experimentos de porcentaje de resina (desarrollo de resistencia)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	101986	9271.4	134.26	0.000
Lineal	4	97211	24302.9	351.93	0.000
% Resina	2	49760	24880.0	360.29	0.000
Resina	1	3701	3700.7	53.59	0.000
T (h)	1	43751	43750.7	633.56	0.000
Interacciones de 2 términos	5	4744	948.8	13.74	0.000
% Resina*Resina	2	357	178.5	2.59	0.096
% Resina*T (h)	2	3953	1976.4	28.62	0.000
Resina*T (h)	1	434	434.0	6.29	0.019
Interacciones de 3 términos	2	30	15.2	0.22	0.804
% Resina*Resina*T (h)	2	30	15.2	0.22	0.804
Error	24	1657	69.1		
Total	35	103643			

Figura 42 ANOVA de DR para el análisis de porcentaje de resina.

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
8.30997	98.40%	97.67%	96.40%

Figura 43 Modelo de DR para el análisis de porcentaje de resina.

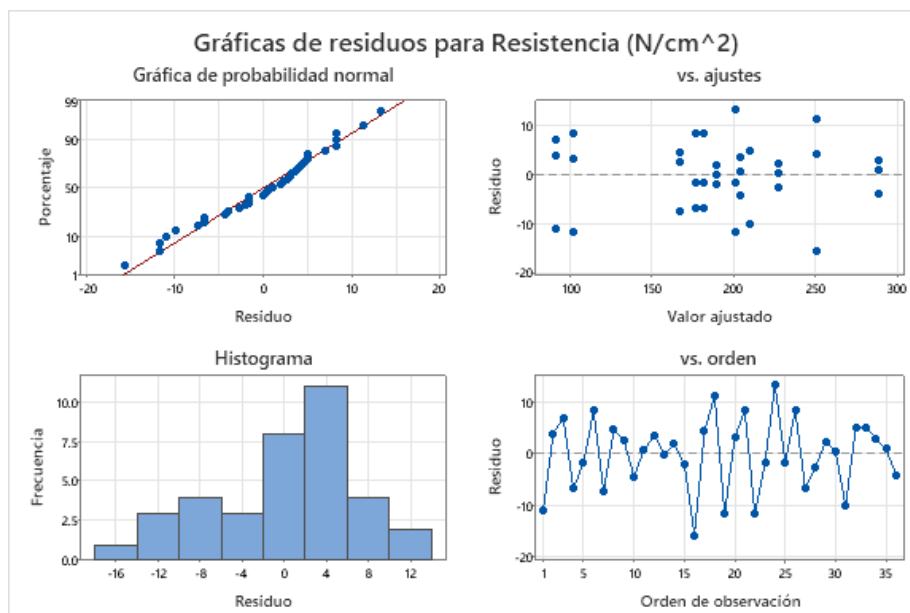


Figura 44 Gráfica de residuos para el análisis de porcentaje de resina.

Anexo 3. ANOVA para el diseño de experimentos de porcentaje de resina (vida de banco)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	66428.3	6038.9	153.10	0.000
Lineal	4	7924.4	1981.1	50.23	0.000
% Resina	2	1768.7	884.3	22.42	0.000
Resina	1	729.0	729.0	18.48	0.000
T (h)	1	5426.8	5426.8	137.58	0.000
Interacciones de 2 términos	5	58173.2	11634.6	294.96	0.000
% Resina*Resina	2	394.7	197.3	5.00	0.015
% Resina*T (h)	2	53289.6	26644.8	675.50	0.000
Resina*T (h)	1	4489.0	4489.0	113.81	0.000
Interacciones de 3 términos	2	330.7	165.3	4.19	0.027
% Resina*Resina*T (h)	2	330.7	165.3	4.19	0.027
Error	24	946.7	39.4		
Total	35	67375.0			

Figura 45 ANOVA de VB para el análisis de porcentaje de resina.

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
6.28048	98.59%	97.95%	96.84%

Figura 46 Modelo de VB para el análisis de porcentaje de resina.

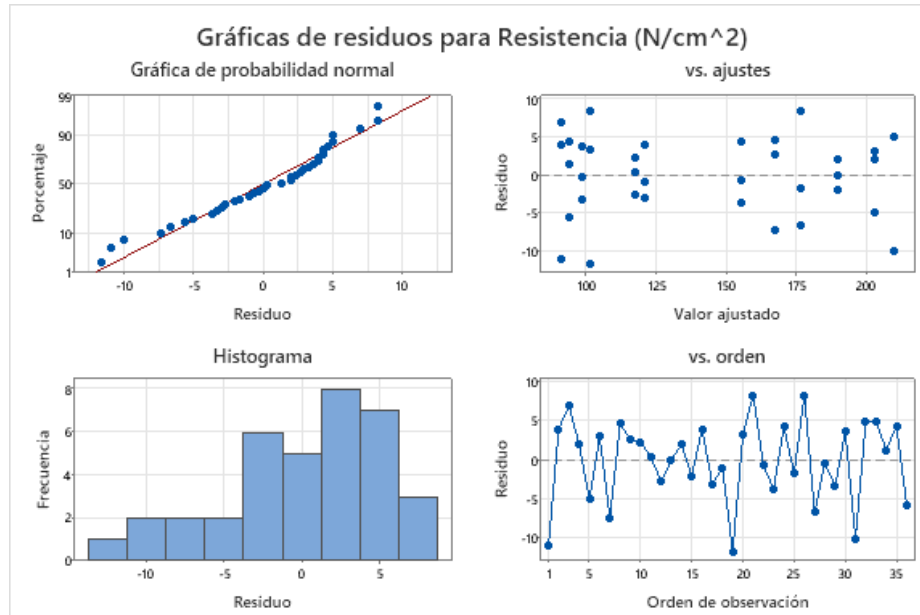


Figura 47 Gráfica de residuos para el análisis de porcentaje de resina.

Anexo 4. ANOVA para el diseño de experimentos de distorsión en caliente (distorsión)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0.184709	0.061570	17.85	0.000
Lineal	2	0.181419	0.090710	26.30	0.000
Arena	1	0.091706	0.091706	26.59	0.000
Resina	1	0.089713	0.089713	26.01	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.003290	0.003290	0.95	0.343
Arena*Resina	1	0.003290	0.003290	0.95	0.343
Error	16	0.055181	0.003449		
Total	19	0.239890			

Figura 48 ANOVA del análisis de distorsión en caliente.

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0587264	77.00%	72.68%	64.06%

Figura 49 Modelo del análisis de distorsión en caliente.

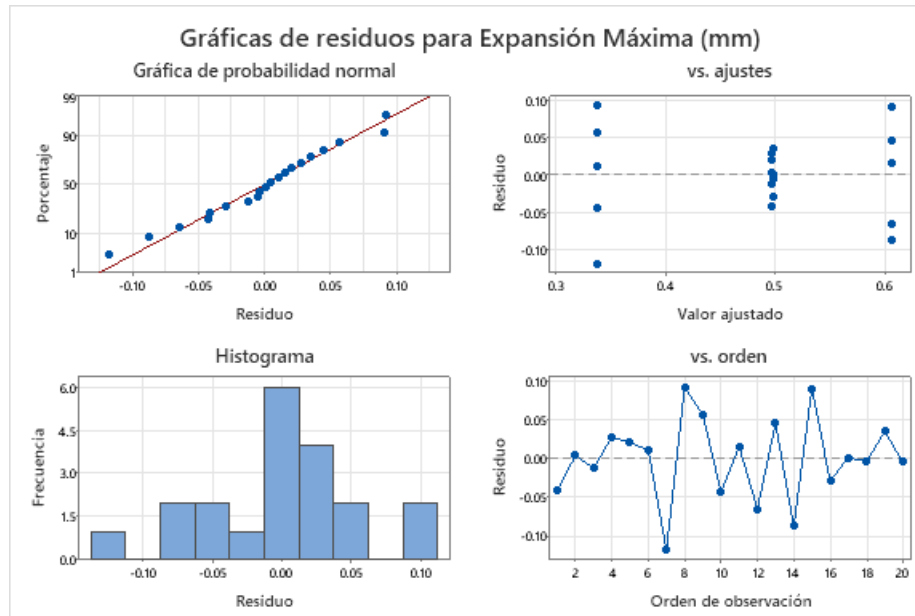


Figura 50 Gráfica de residuos del análisis de distorsión en caliente.

Anexo 5. ANOVA para el diseño de experimentos de distorsión en caliente (tiempo total a la fractura)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	699.35	233.117	32.04	0.000
Lineal	2	677.30	338.650	46.55	0.000
Arena	1	616.05	616.050	84.68	0.000
Resina	1	61.25	61.250	8.42	0.010
Interacciones de 2 términos	1	22.05	22.050	3.03	0.101
Arena*Resina	1	22.05	22.050	3.03	0.101
Error	16	116.40	7.275		
Total	19	815.75			

Figura 51 ANOVA del análisis de tiempo total a la fractura.

Resumen del modelo

	S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
	2.69722	85.73%	83.06%	77.70%

Figura 52 Modelo del análisis de tiempo total a la fractura.

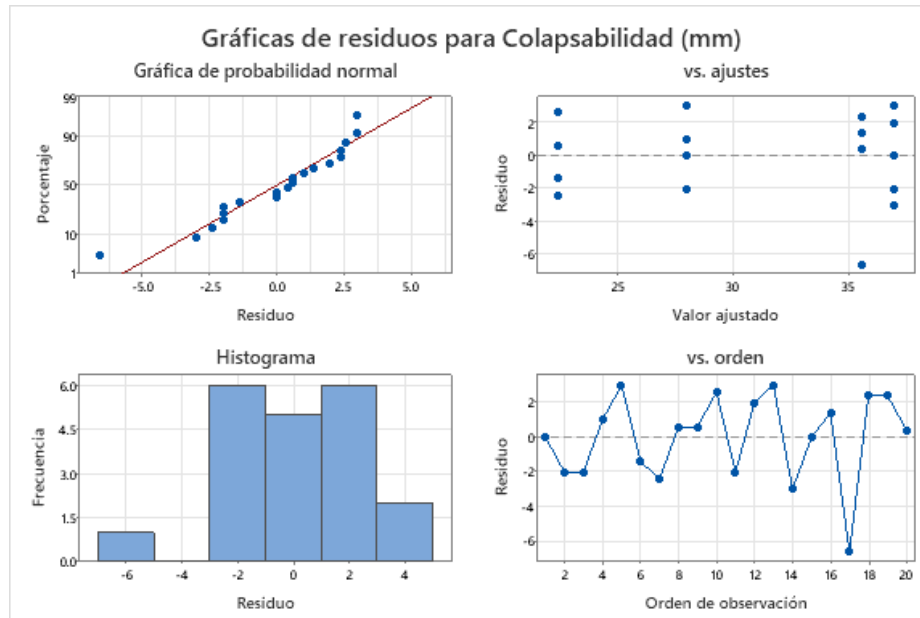


Figura 53 Gráfica de residuos del análisis de tiempo total a la fractura.

Anexo 5. Constancia de participación en Congreso POLYMAT 2024



**We deliver the present
ATTESTATION to:**

**Braian Mariano Bernal Hernández, Carlos Alfonso García
Ibarra , Salvador Valtierra Gallardo, Javier Illescas Marco
Antonio Ríos Orona, Mario Rosas Velázquez**

**For their participation with the
POSTER
presentation entitled:**

**“Analysis of the effect of variables in the cold box blowing
process on the deformation of sand cores using organic
resins.”**

in the

**International Conference on Polymers and Advanced
Materials “Polymat-2024”
Huatulco, Mexico. October 20-25, 2024.**

**Prof. Ernesto Rivera Garcia
President of the Organizing Committee**

