

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE ORGÁNICO PARA LA
FABRICACIÓN DE MOLDES Y CORAZONES DE ARENA

POR

ALBERTO ESQUIVEL HERRERA

T E S I S

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR
EN INGENIERIA DE MATERIALES

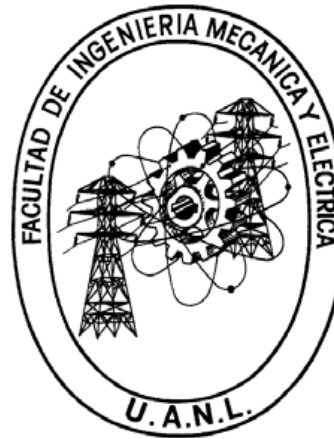
CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO DEL 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE ORGÁNICO PARA LA
FABRICACIÓN DE MOLDES Y CORAZONES DE ARENA

POR

ALBERTO ESQUIVEL HERRERA

T E S I S

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR
EN INGENIERIA DE MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO DEL 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de la tesis recomendamos que la tesis **“Desarrollo de un aglutínate orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena”**; realizada por el M.C. Alberto Esquivel Herrera, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor

Dr. Rafael Colas Ortiz

Asesor

Dr. Abraham Velazco Téllez

Coasesor

Dr. Alberto Pérez Unzueta

Coasesor

Dr. Salvador Valtierra Gallardo

Coasesor

Dr. José Talamantes Silva

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Ciudad Universitaria. San Nicolás de los Garza, N. L., Mayo del 2010

La presente investigación fue financiada por el proyecto de desarrollo e innovaciones tecnológicas con impacto positivo en el consumo de energía y en el medio ambiente, otorgado por el comité interinstitucional SHCP, SE, SEP y CONACYT, con la clave “NEM790312D81-2005-1”.

Agradecimientos.

A Nematik, por invertir en la formación de personal de investigación y el desarrollo de tecnología.

Al Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología, por apoyar proyectos de investigación y desarrollo de nuevos productos, materiales o procesos, para obtener una ventaja competitiva en el mercado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, que a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica han establecido el convenio de investigación, para la realización de este estudio.

Al Dr. Rafael Colas Ortiz por su asesoría y revisión de este trabajo.

Al Dr. Alberto Pérez por su apoyo en la supervisión de este trabajo.

Al Dr. Salvador Valtierra Gallardo.

Al Dr. Abraham Velasco Téllez.

A Gilberto García Tapia.

A los investigadores de Nematik en Monterrey: Queso, Fer, Andrés, Alex, Mike, Chon, Efrén, Rubén, al Negrito.

A Diana

Índice.

Contenido	Página
Resumen.	1
1. Introducción.	3
2. Objetivo e Hipótesis.	7
2.1. Objetivo general.	7
2.2. Objetivos específicos.	7
2.3. Hipótesis.	8
3. Revisión bibliográfica.	9
3.1. Importancia de la arena en la fundición y su definición.	9
3.2. Origen de la arena.	9
3.2.1. Arenas de banco.	10
3.2.2. Arenas de lago.	10
3.3. Tipos de arena.	10
3.3.1. Arena sílica.	11
3.3.2. Arena de zirconio.	11
3.3.3. Arena de cromita.	12
3.3.4. Arena olivina.	12
3.3.5. Mulita.	12
3.3.6. Arenas sintéticas.	13
3.4. Características fisicoquímicas de la arena sílice.	13
3.4.1. Granulometría.	14
3.4.2. Forma del grano.	14
3.4.3. Densidad.	15
3.4.4. Temperatura de la arena.	15
3.4.5. Humedad en la arena.	15
3.4.6. pH de la arena.	16
3.4.7. Valor de la demanda ácida (ADV).	16
3.4.8. Pérdidas por ignición de la arena.	16
3.5. Sistemas de aglutinación química.	17

3.5.1. Clasificación de los sistemas de aglutinación en orgánicos e inorgánicos.	18
3.5.2. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base al pH del catalizador.	19
3.5.3. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base la temperatura de curado.	19
3.6. Definición del proceso de caja fría.	20
3.6.1. Generalidades del proceso de caja fría.	20
3.7. Sistema de aglutinación fenólico-uretánico-amina.	22
3.7.1. Química del sistema fenólico-uretánico-amina.	23
3.8. Proceso de caja caliente.	26
3.8.1. Generalidades del proceso de caja caliente.	26
3.8.2. Sistemas de resinas de caja caliente.	27
3.8.3. Reacción química de los sistemas de caja caliente.	28
3.9. Proceso GMBOND®.	30
3.9.1. Química de la resina GMBOND®.	31
3.9.2. Proceso de recubrimiento de la arena con la resina GMBOND®.	32
3.9.3. Proceso de fabricación de corazones con la resina GMBOND®.	33
3.10. Proceso inorgánico.	34
3.10.1. Silicatos.	35
3.10.2. Reacción de polimerización de los silicatos.	35
3.10.3. Fabricación de corazones con resina inorgánica.	36
3.11. Polisacáridos.	38
3.12. Consumo y costo de resinas para fundición.	44
3.13. Aditivos para la mezcla.	45
3.13.1. Tipos de aditivos.	46
4. Justificación y alcance.	48
4.1. Justificación.	48
4.2. Alcance.	48

5. Procedimiento experimental.	49
5.1. Introducción.	49
5.2. Arreglo experimental.	50
5.3. Material utilizado.	51
5.4. Equipo utilizado.	54
5.5. Método experimental.	59
5.5.1. Análisis termogravimétrico.	59
5.5.2. Contenido de sólidos de la resina.	59
5.5.3. Espectrofotometría de infrarrojo.	60
5.5.4. Vida de banco de la mezcla.	60
5.5.5. Densidad aparente y fracción de poros de los corazones.	62
5.5.6. Desarrollo de resistencia.	63
5.5.7. Desarrollo de resistencia en cámara húmeda.	64
5.5.8. Distorsión en caliente.	65
5.5.9. Evolución de gases.	67
5.5.10. Cromatografía de gases.	68
6. Resultados.	70
6.1. Introducción.	70
6.2. Análisis termogravimétrico (TGA).	70
6.3. Contenido de sólidos.	74
6.4. Espectrofotometría de infrarrojo (FTIR).	75
6.5. Vida de banco de mezcla.	77
6.6. Densidad aparente y fracción de poros de los corazones.	79
6.7. Desarrollo de resistencia de los corazones.	81
6.8. Desarrollo de resistencia de los corazones en la cámara húmeda.	84
6.9. Distorsión en caliente.	88
6.10. Evolución de gases.	91
6.11. Cromatografía de gases.	94
7. Discusión de los Resultados.	97
8. Conclusiones y Recomendaciones.	110
8.1. Conclusiones.	110

8.2. Recomendaciones.	113
Bibliografía.	114
Lista de Tablas.	121
Lista de Figuras.	122
Apéndice A. Análisis termogravimétrico de las resinas.	126
Apéndice B. Análisis de varianza para el contenido de sólidos de las resinas.	129
Apéndice C. Espectrofotometría de infrarrojo (FTIR) de la resinas.	130
Apéndice D. Análisis de varianza para la vida de banco.	133
Apéndice E. Análisis de varianza de la densidad aparente de los corazones.	137
Apéndice F. Análisis de varianza para la fracción de posos de los corazones.	138
Apéndice G. Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia de los corazones.	139
Apéndice H. Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia de los corazones en la cámara húmeda.	143
Apéndice I. Distorsión en caliente (BCIRA).	152
Apéndice J. Evolución de gas.	162
Apéndice K. Cromatografía de gases.	168
Resumen Autobiográfico.	171

Resumen.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la investigación realizada con la finalidad de desarrollar una resina no derivada del petróleo que sea utilizada en la fabricación de moldes y corazones de arena usados en la producción de monobloques y cabezas de aluminio.

Actualmente existen dos líneas de investigación para el desarrollo de resinas con compuestos no derivados del petróleo; una de ellas está enfocada en el desarrollo de resinas inorgánicas base agua y la otra al empleo de biopolímeros producidos a partir de proteínas y almidón. El uso de resinas inorgánicas en fundiciones de aluminio presenta dos problemas principales; uno de ellos es su baja resistencia a la humedad, lo cual limita la vida útil de los corazones, y el otro es su alta resistencia mecánica, la cual dificulta el desarenado de las piezas después del vaciado. El problema principal de las resinas fabricadas a base de proteínas es la alta generación de gases al momento del vaciado lo que puede ocasionar piezas con porosidad.

Diferentes autores reportan el uso del almidón como un aditivo auxiliar en el proceso de moldeo en verde por su capacidad de aglutinar la arena, sin embargo, reportan bajas propiedades mecánicas y térmicas en la fabricación de los corazones utilizados en el vaciado de hierro. Otros investigadores mencionan que el mezclado de arena sílica con almidón y agua produce una mezcla muy espesa que impide la fabricación de corazones por el método convencional de soplado.

Si bien muchos autores reportan el uso de almidón como ingrediente minoritario en las formulaciones de las resinas base agua, ninguno de ellos hace referencia al uso de polisacáridos como el principal componente de la resina. Con el fin de desarrollar una resina libre de petróleo se decidió investigar el uso de polisacáridos debido a que la temperatura del vaciado de aluminio es inferior a la temperatura del vaciado de hierro, además de reducir la viscosidad de la mezcla arena - resina y fabricar corazones por soplado.

Para garantizar el empleo de los polisacáridos y demostrar que la nueva resina es tan resistente como los sistemas de aglutinación existentes, se realizaron una serie de pruebas que incluyen su caracterización mediante análisis termogravimétrico, contenido de sólidos, espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), vida de banco de la mezcla de arena y polisacáridos, densidad aparente y fracción de poros; desarrollo de resistencia, distorsión en caliente y evolución de gases de los corazones fabricados con el polisacárido, y el análisis de los gases generados por medio de cromatografía de gases masas.

Los resultados de resistencia inmediata de los corazones fabricados con el polisacárido fueron de 0.7127 MPa, 22.6% superiores a la especificación para corazones fabricados con resina de caja fría. La densidad aparente fue sólo 4.4% inferior a la obtenida por los elaborados con resina de caja caliente, el desarrollo de resistencia a una hora fue 47.3% superior a la especificación para corazones de caja fría, el desarrollo de resistencia a 2 horas en condiciones de alta humedad fueron 50% superiores a los corazones inorgánicos. El empleo de polisacáridos reduce en 70% los compuestos que son emitidos a la atmósfera, comparados contra la resina de caja fría.

Los resultados obtenidos demostraron que es posible utilizar polisacáridos para fabricar moldes y corazones de arena mediante el proceso de soplado, para su empleo en la fabricación de monobloques y cabezas de aluminio.

1. Introducción.

La industria de la fundición se enfrenta a una nueva serie de normas ambientales internacionales, para el cumplimiento de estas regulaciones, las investigaciones y el desarrollo de nuevos sistemas de aglutinación (resinas) están siendo enfocados en las fundiciones de aluminio, porque la industria automotriz genera una gran demanda de resinas para fabricar los moldes y corazones, que sirven como elementos para formar las cabezas y monobloques de aluminio ^[1], Figura 1.1.

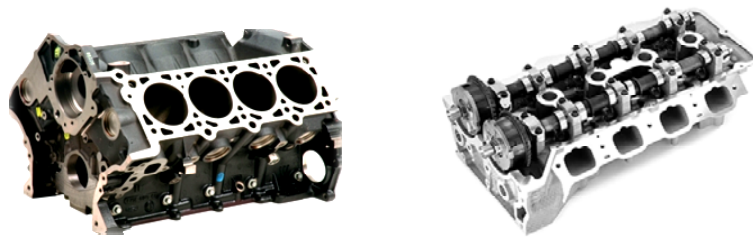


Figura 1.1. Monoblock y cabeza de aluminio.

El buen comportamiento de los moldes y corazones es fundamental para obtener una buena calidad en los monobloques y cabezas de aluminio, porque gran parte de los problemas que originan el rechazo de estas piezas se debe a la mala calidad de los corazones, por lo tanto, para la obtención de una buena pieza se requiere la elaboración de moldes y corazones con la resina adecuada para cumplir con los estrictos estándares de la industria automotriz.

Los corazones forman la configuración interna de la pieza y quedan rodeados por el metal vaciado. Después del vaciado el corazón debe ser

extraído de la pieza. Para que esto suceda, el corazón debe de tener buena colapsibilidad, es decir, el aglutinante debe quemarse para que la arena que conforma el corazón pueda salir de la pieza.

Los moldes producen la forma exterior de la pieza y no están rodeados por metal, sin embargo, deben tener la suficiente resistencia mecánica para soportar la erosión del metal líquido al momento del vaciado y resistir la presión metalostática del metal hasta su solidificación [2,3].

También es necesario que el aglutinante no genere un exceso de gas al momento del vaciado ya que éste puede quedar atrapado en el metal y generar piezas con alta porosidad.

El reciente incremento en los precios del petróleo, ver Figura 1.2, ocasionó una alza en el precio de las resinas derivadas de petróleo utilizadas para la fabricación de moldes y corazones de arena. Por tal motivo, las fundiciones que trabajan con este tipo de resinas estarán buscando cambiarlas en el futuro para reducir sus costos de producción e incrementar su competitividad.

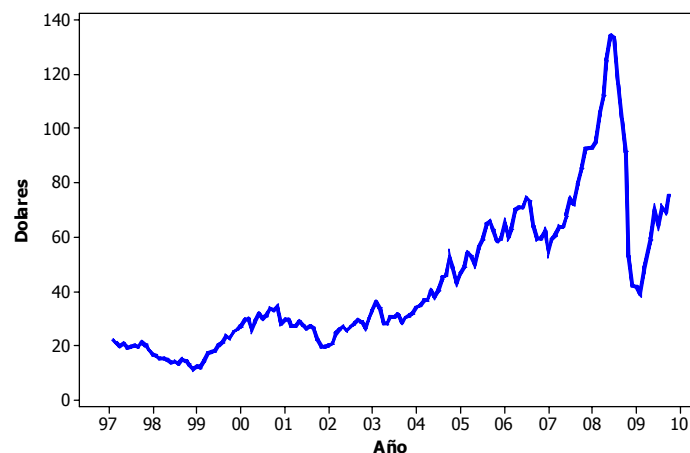


Figura 1.2. Precio del petróleo [4,5].

Aunado a esto, para cumplir con las regulaciones ambientales exigidas por el gobierno y sus clientes, las fundiciones de aluminio se encuentran bajo gran presión de producir moldes y corazones con resina que ayuden al reducir las emisiones.

Debido a lo anterior, se ha visto la necesidad de realizar una investigación con el objetivo de desarrollar una resina libre de compuestos derivados de petróleo para reducir las emisiones y los costos ocasionados por la fluctuación del precio del petróleo.

Algunos autores reportan el uso de celulosa, almidón y dextrina como aditivos auxiliares en el proceso de moldeo en verde por su capacidad de aglutinar la arena, sin embargo, también reportan bajas propiedades mecánicas y térmicas en los corazones utilizados en el vaciado de hierro [6,7,8,9,10,11,12]. Otros investigadores mencionan que el mezclado de arena sílica con almidón y agua produce una mezcla muy espesa que impide la fabricación de corazones por soplado y recomiendan el proceso de inyección para la fabricación de corazones [13,14,15,16,17,18]. Si bien, los fabricantes de resinas sólo hacen referencia el uso de almidón como ingrediente minoritario en las formulaciones de la resinas base agua y ninguno de ellos hace referencia al uso de polisacáridos como el principal componente de una resina para fundición [19,20,21,22].

Por tal motivo se decidió investigar el uso de polisacáridos debido a que la temperatura del vaciado de aluminio es inferior a la temperatura del vaciado de hierro y se reduce la viscosidad de la mezcla arena - resina para fabricar corazones mediante el proceso de soplado. Para cumplir con dicho objetivo se utilizó una mezcla de polisacáridos, se caracterizó mediante el análisis termogravimétrico, contenido de sólidos, espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR). También se llevaron a cabo pruebas de vida de banco de la mezcla arena polisacáridos para evaluar la resistencia inmediata y después de una hora de haber sido fabricada la mezcla.

La densidad aparente y fracción de poros sirvieron para analizar la fluidez de la mezcla al momento del soplado de corazones. El desarrollo de resistencia ambiente y cámara húmeda fue con el propósito evaluar los corazones en condiciones de almacenaje. La distorsión en caliente permitió conocer el comportamiento de los corazones al momento de vaciado. La evolución de gases determinó la cantidad de gas generado con los corazones fabricados con el polisacárido. El análisis mediante cromatografía de gases masas permitió conocer los compuestos presentes en los gases generados por los corazones al momento del vaciado.

Todos los resultados obtenidos se compararon contra otros sistemas de resinas empleados en las fundiciones de aluminio, las cuales son resina caja fría (CB), caja caliente (HB), base proteína (GMB) e inorgánica (INO).

2. Objetivo general e hipótesis.

2.1 Objetivo General.

Desarrollar un nuevo sistema de aglutinación no derivado del petróleo para la fabricación de moldes y corazones de arena empleados en las fundiciones de monobloques y cabezas de aluminio.

2.2. Objetivo Específicos.

- El aglutinante no deberá utilizar solventes ni aditivos derivados del petróleo.
- La fluidez de la mezcla de arena más aglutinante deberá ser similar a la fluidez del sistema de caja fría, para fabricar corazones por soplado.
- Las propiedades mecánicas de los corazones elaborados con el aglutinante desarrollado serán superiores a 0.55 MPa.
- Las emisiones generadas por la pirolisis de los corazones fabricados con el aglutinante desarrollado serán inferiores a los fabricados con las resina de caja fría.
- El costo del nuevo aglutinante deberá ser menor al costo de la resina de caja fría.

2.3. Hipótesis.

Una mezcla de polisacáridos solubles en agua deberá cumplir con todas las características necesaria para la fabricación de un aglutinante que sirva para elaborar moldes y corazones de arena mediante el proceso de soplado y que su vez puedan ser empleados en las fundiciones aluminio.

3. Revisión Bibliográfica.

3.1. Importancia de la arena en la fundición y su definición.

Debido a que la arena comprende desde el 97% hasta el 99% de la mezcla arena – resina, que se emplea para fabricar los moldes y corazones utilizados en la fundición, es muy importante mencionar sus características y la influencia que éstas tienen en la calidad de los corazones.

La arena, es un material inorgánico compuesto de granos de mineral suelto que varían de tamaño aproximadamente desde 0.05 a 2 mm de diámetro. Por lo tanto el término arena sólo hace referencia al tamaño y no a la composición química de los granos. Las arenas utilizadas en fundición toman su nombre del mineral que mayor concentración presenta en su composición química, así que se debe hacer referencia al nombre completo, por ejemplo, arena sílica, arena de zirconio, arena de cromita ^[3,23,24].

3.2. Origen de la arena.

Los depósitos de arena para fundición son el producto de cambios en la superficie de la tierra a través del tiempo por la acción del viento, el agua, el hielo y la nieve. La composición química de los depósitos depende de la naturaleza de los materiales que fueron erosionados y la manera en que fueron depositados, por esta acción, se clasifican en: arenas de banco y arenas de lago.

3.2.1 Arenas de banco.

Estas son producto de la desintegración de la arenisca por la acción del tiempo. Estas arenas, esparcidas por el viento, cubren áreas extensas y se acumulan en forma de pequeños bancos. Las arenas de banco varían en pureza, dependiendo de los materiales extraños y minerales con que se han mezclado. En muchas áreas estas arenas tienen una alta pureza y son apropiadas para su uso en la fundición ^[23,24].

3.2.2 Arenas de lago.

Estas son de origen geológico reciente y están compuestas de arenas producidas por la erosión de rocas a lo largo de las orillas de los lagos, donde se han depositado para formar playas. Algunas arenas superficiales han sido desplazadas por el viento y en algunas áreas se las conoce como arenas de duna. Sin embargo, las dunas son parte todavía del depósito de arena de un lago ^[23,24].

3.3. Tipos de arena.

La principal arena empleada en la industria de la fundición es la arena sílica (SiO_2), también existen algunos otros tipos de arenas como son la zirconio (ZrSiO_4), la cromita (FeCr_2O_4), la olivina ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), la mulita ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$) y otras sintéticas (aluminosilicatos) ^[24,25]. Las arenas se pueden seleccionar de acuerdo a:

- La composición química.
- Tamaño y forma del grano de arena.
- La distribución granulométrica.
- Compatibilidad con el sistema de aglutinación.
- Estabilidad dimensional a temperaturas elevadas.

- Su disponibilidad y su costo.

3.3.1 Arena sílica.

La arena sílica está formada principalmente por granos de dióxido de silicio (SiO_2), se caracteriza por tener una alta pureza y un comportamiento químico neutro. Puede contener algunos otros compuestos que se consideran como contaminantes, la mayoría de estos contaminantes están contenidos en las mallas finas mayores al número 140 (0.1041 mm). Es uno de los minerales más abundantes en la naturaleza y constituye el 60% de la corteza terrestre, es altamente resistente al ataque de escorias, a la abrasión y también presenta características refractarias. La arena sílice es la principal arena empleada para la fabricación de moldes y corazones utilizados en las fundiciones principalmente, por las siguientes razones ^[2,24].

- Es la más abundante en la naturaleza.
- Fácil de extraer de los depósitos minerales naturales.
- Se encuentra en una gran variedad de tamaños y distribuciones.
- Altamente refractaria y resistente al calor.
- Por su resistencia al ataque químico.
- Por tener compatibilidad con la mayoría de los aglutinantes orgánicos e inorgánicos.
- Por su bajo costo en relación con otras arenas.

3.3.2 Arena de zirconio.

Es un silicato natural ZrSiO_4 ó ZrO_2SiO_2 , con un contenido del 67% de zirconio y de un 33% de sílice, tiene una dureza de 7.5 Mohs, una densidad de 4.7 kg/dm^3 , una conductividad térmica superior a la sílice y una muy baja expansión térmica ^[24,26].

En general se aglomera con bentonita y resinas, su índice de finura natural es de 120 a 140 AFS y permite obtener piezas con muy baja rugosidad; pero su costo es muy elevado y su empleo se limita a piezas especiales, para hacer corazones de formas complicadas y muy delgadas que están sometidos a altas temperaturas.

3.3.3 Arena de cromita.

Se trata de óxido de cromo ($\text{FeO}:\text{Cr}_2\text{O}_3$) el cual puede estar en combinación con otros óxidos como MgO , FeO , MnO y ZnO , típicamente conteniendo un 68% de óxido de cromo, su dureza es de 5.5 en la escala de Mohs y su densidad de 4.55 kg/dm^3 , esta arena se caracteriza por no presentar reacción química a alta temperatura y tiene una expansión térmica inferior a la de la arena sílica. Por su alto costo al igual que la arena de zirconio sólo se emplea en piezas especiales ^[25].

3.3.4 Arena olivina.

Es un ortosilicato de color verde, constituido por una solución sólida de Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4 , sólo se puede obtener arena angular ya que esta arena es producto de la trituración del mineral, tiene una densidad de 3.37 kg/dm^3 , posee una conductividad térmica mayor al de la arena sílica y menor a la arena de cromita. Se utiliza principalmente para el moldeo de aceros al manganeso debido a su alta resistencia a la penetración y al ataque químico de estas aleaciones ^[24,26].

3.3.5 Mulita.

Es un aluminosilicato natural ($2\text{SiO}_2:3\text{Al}_2\text{O}_3$) compuesto aproximadamente del 71.8% de Al_2O_3 y 28.2% de SiO_2 , tiene una densidad de 3.15 kg/dm^3 y una

alta resistencia a la transferencia de calor, debido a su alto costo se emplea sólo para la fabricación de aceros refractarios ^[26].

3.3.6 Arenas sintéticas.

Todas las arenas sintéticas están formadas de partículas esféricas de mulita, tienen una alta estabilidad térmica y baja expansión, su costo es muy elevado, además requieren una mayor cantidad de resina para formar corazones que el resto de las arena, debido a la porosidad presente en los granos de arena ocasionados por su proceso de fabricación.

3.4. Características fisicoquímicas de la arena.

Como se mencionó anteriormente la arena sílica es la principal arena empleada en las fundiciones y es la arena que se utilizó en este trabajo de investigación, por lo cual se profundizará más en las principales características fisicoquímicas que debe cumplir para su utilización en la industria de la fundición, como son: la granulometría, la distribución de mallas y la cantidad de finos, la morfología del grano y el área superficial, la densidad, la temperatura y la humedad en la arena, el pH, el valor de la demanda ácida (mejor conocido como ADV por sus siglas en inglés) y las pérdidas por ignición ^[3,27,28].

3.4.1. Granulometría.

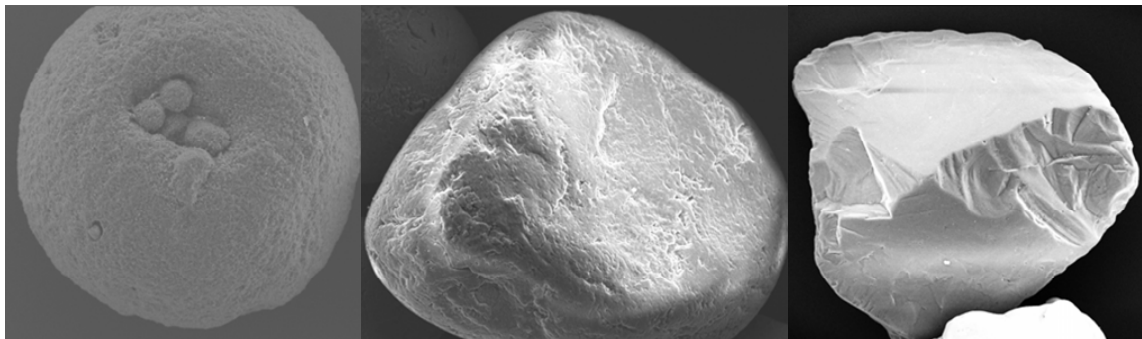
Esta característica indica el tamaño y la distribución de los granos de la arena, se expresa por el No. AFS que es una nomenclatura designada por la sociedad americana de fundidores (AFS por sus siglas en inglés), el cual se representa por medio de un análisis de distribución de mallas de un determinado diámetro, el resultado del análisis indica si la arena es de tipo

gruesa, mediana o fina. Las principales características relacionadas con el tamaño de grano son la permeabilidad y el acabado superficial [24].

La arena gruesa tiene un AFS menor a 45 y un contenido de finos menor a 3%, tiene una menor área de superficie; las principales ventajas de esta arena son: menor cantidad de resina para recubrir el grano, mayor fluidez de la mezcla, mejor permeabilidad del corazón para eliminar los gases durante el vaciado de la pieza, facilita el desarenado de la pieza. La arena fina tiene un AFS mayor a 55 y un contenido de finos mayor a 7%, tiene una mayor área de superficie lo que le da propiedades contrarias a la de la arena gruesa: aumenta la necesidad de resina, menor permeabilidad y desarenado, mayor suciedad del molde y emisión de humos, pero da menor rugosidad en las piezas vaciadas [25].

3.4.2. Forma del grano.

Los granos de arena pueden clasificarse por su forma en redondeados, subangulares y angulares, ver Figura 3.1. Para definir de una manera más precisa la forma de los granos, se utiliza el coeficiente de angularidad, con este coeficiente se tiene la relación entre la superficie real del grano de arena y a la superficie que tendría si fuese una esfera.



Redondo

Subangular

Angular

Figura 3.1. Morfología de los grano de arena.

Los granos redondos proveen el mejor arreglo de los poros conectados y también la mínima relación área – volumen. Un grano redondo entonces

proporcionará la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario al de tipo angular y subangular ^[24,26].

3.4.3. Densidad.

Entre mayor sea la cantidad de granos que se puedan unir un volumen determinado, mayor será la densidad y más fuerte serán los moldes y corazones de arena. Los granos redondos poseen una buena compactación y pueden proveer una densidad del 8 al 10% mayor que la ofrecida por las arenas angulares ^[23,28].

3.4.4. Temperatura de la arena.

No tener un buen control sobre la temperatura de la arena evita la producción de un molde o un corazón de calidad debido a que la temperatura afecta la reactividad y la viscosidad de las resinas. El rango de temperatura ideal de la arena es de 18 a 32 °C y su efecto en la arena es:

A temperatura mayor de 32° C se acelera la reacción de las resinas y disminuye la fluidez de la mezcla durante el soplado de los moldes y corazones de arena.

A temperaturas menores a 18° C se retarda la reacción de las resinas y disminuye la eficiencia del mezclado en el molino al incrementar la viscosidad de las resinas ^[28,29].

3.4.5. Humedad en la arena.

La presencia de humedad mayor de 0.2% en la arena no es recomendable debido a que reacciona con la resina parte 2 del sistema de caja

fría, degradando las propiedades y la resistencia de los corazones. Las principales fuentes de contaminación de humedad: silos y tolvas mal selladas, condensación en los serpentines del sistema de enfriamiento de la arena, alta humedad relativa en el ambiente, alta humedad en el aire comprimido ^[30].

3.4.6. pH de la Arena.

El pH es un indicador de las impurezas encontradas en la arena, la cual tiene un pH neutro, las arenas muy alcalinas aceleran la reacción entre la resinas y disminuyen el tiempo de almacenaje de la mezcla arena más resina. Los factores que influyen para aumentar el pH en la arena son el alto contenido de finos (malla 270) y la presencia de contaminantes como partículas de aluminio, hierro y carbonato de calcio ^[30].

3.4.7. Valor de la demanda ácida.

El valor de la demanda ácida (ADV), determina las sustancias alcalinas solubles en ácido. La arena alcalina con un valor de demanda ácida mayor de 5 y un pH mayor a 8 aceleran la reacción entre las resinas ^[29,30].

3.4.8. Pérdidas por ignición de la arena.

El valor de las pérdidas por ignición de la arena LOI indica la cantidad de resina o aditivos residuales adheridos a los granos de arena antes y después de la calcinación, si este valor es elevado se producirán problemas de bajas propiedades mecánicas en los corazones.

3.5 Sistemas de aglutinación química.

Desde la introducción de los sistemas de aglutinación química (resinas para fundición) a finales de la segunda guerra mundial, se han desarrollado nuevos procesos y nuevos sistemas de aglutinación para fabricar moldes y corazones de arena, pero fue hasta 1960 cuando las fundiciones de todo el mundo comenzaron a utilizar polímeros para desarrollar nuevos sistemas de fabricación de moldes y corazones de arena mediante aglutinación química. En la Tabla 3.1, se muestra la lista de los diferentes procesos de aglutinación química así como también, el año de su introducción al mercado ^[2].

Recientemente, el rápido crecimiento de la fundición de aluminio para la fabricación de autopartes en general, ha creado una nueva industria dedicada a la investigación y al desarrollo de nuevos sistemas de aglutinación utilizados en el conformado de moldes y corazones que soporten los estrictos requerimientos de calidad de la industria automotriz. Sin embargo, la fuerte unión que existe entre los productores de resinas para fundición, ha significado un aumento en los costos de las mismas y por lo tanto un incremento en el costo de fabricación de los corazones.

Actualmente existen tres formas de clasificar los diferentes sistemas de aglutinación, los cuales son: en la base de su composición química, al pH del catalizador y al mecanismo físico de curado, que se describe a continuación ^[23,28,31].

Tabla 3.1. Lista de los diferentes procesos de aglutinación química así como el año de su introducción al mercado [2].

Año aproximado de la introducción	Sistema
1950	Moldeo con aceite.
1950	Shell.
1952	Silicato CO ₂ .
1953	Aceites autofraguantes al aire.
1958	Fenólico con catalizador ácido no horneado.
1958	Furánico con catalizador ácido no horneado.
1960	Furánico no horneado.
1962	Fenólico caja caliente.
1965	Uretánico no horneado.
1967	Fenólico CO ₂ caja fría.
1968	Fenólico uretánico amina caja fría.
1968	Silicato éster no horneado.
1970	Fenólico uretánico no horneado.
1977	Furánico SO ₂ .
1978	Poliol uretánico no horneado.
1978	Caja tibia.
1982	FRC SO ₂ .
1983	Expico SO ₂ .
1984	Fenólico éster no hornedo.
1985	Fenólico éster caja fría.
1992	Fosfato de alúmina.
1999	GMBOND®
2000	Silicato curado sin CO ₂

3.5.1 Clasificación de los sistemas de aglutinación en orgánicos e inorgánicos.

Los sistemas de aglutinación inorgánicos son aquellos que no contienen carbono en su estructura molecular. Estos sistemas están basados en la tecnología de los silicatos, sulfatos, fosfatos y óxidos metálicos [23,28,32]. Todos los demás sistemas utilizados, son resinas orgánicas derivadas de petróleo.

3.5.2. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base al pH catalizador.

Esta clasificación se basa en el pH del catalizador, la tabla 3.2 muestra los sistemas de aglutinamiento tipo ácido ($\text{pH} < 7$) los cuales son curados mediante la adición de material alcalino y los sistemas de aglutinamiento básico ($\text{pH} > 7$) son curados mediante la adición de material ácido. Existen también otros sistemas de aglutinamiento químico curados por varios mecanismos que son independientes del pH.

Tabla 3.2. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al pH del catalizador ^[2].

ÁCIDO	BÁSICO	OTRO
Silicato - CO_2	Fenólico éster no horneado	Silicato no horneado
Epóxico acrílico - SO_2	Fenólico éster caja fría	Shell
Furánico - SO_2	Aceite uretánico no horneado	Moldeo en aceite
Ácido fenólico no horneado	Fenólico uretánico amina	GMBOND [®]
Ácido furánico no horneado	Fosfato alúmina	
Fenólico CO_2		

3.5.3. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base a la temperatura del curado.

Esta clasificación está basada en la temperatura en la cual se fabrican los moldes y corazones, Tabla 3.3. En el sistema de caja fría, el curado se lleva a cabo poniendo la mezcla en contacto con un catalizador vaporizado. Otro

sistema es el de caja caliente, el cual consiste en poner en contacto la mezcla con una fuente de calor de curado. El sistema no horneado, el cual consiste en mezclar todos los componentes con un catalizador líquido que reacciona a temperatura ambiente ^[23].

Tabla 3.3. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al mecanismo del curado ^[2].

Caja Fría	Caja caliente	No horneado
Acrílico epóxico SO ₂	Furánico caja caliente	Furánico ácido
Furánico SO ₂	Fenólico caja caliente	Fenólico ácido
Fenólico uretánico amina	Shell	Fenólico éster
Silicato de sodio CO ₂	Aluminosilicato	Fenólico uretánico
Fenólico CO ₂	GMBOND [®]	Fosfato de alúmina
		Silicato éster

3.6. Definición del proceso de caja fría.

El término caja fría se refiere al curado a temperatura ambiente de la mezcla arena aglutinante acelerado por un gas catalizador, el cual pasa a través de la arena ^[27,33].

3.6.1. Generalidades del proceso de caja fría.

Los procesos de caja fría cumplen la secuencia típica de soplado, gaseado, purga y extracción del corazón, como muestra en la figura 3.2. La arena es mezclada con resina, es soplada dentro de la caja (herramental) de corazones, después un gas catalizador se introduce a la caja y se hace pasar a través de la mezcla arena - resina, causando el curado instantáneo de la misma.

Posteriormente, se pasa una corriente de aire (purga), que arrastra el exceso de catalizador y de esta forma el corazón está listo para ser extraído de la caja y ser usado. El exceso de gas catalizador que el aire arrastró es enviado a una lavadora de gases [33].

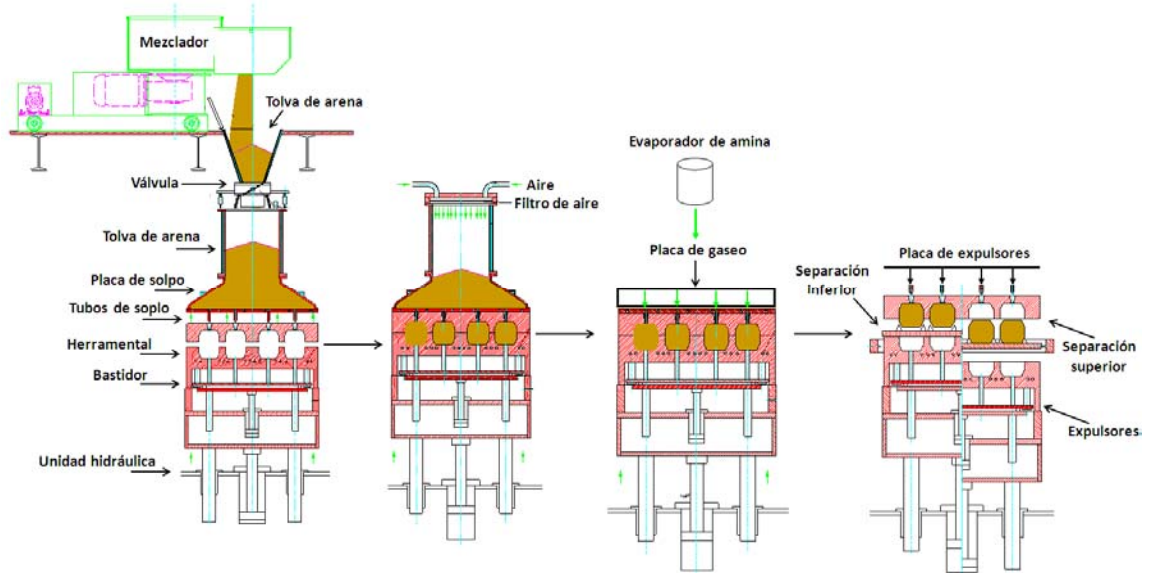


Figura 3.2. Representación esquemática del proceso de caja fría.

El proceso de caja fría no requiere incrementar la temperatura del herramental para el curado, esto significa una mayor precisión dimensional, basado en el hecho de que las cajas no sufren expansión ni contracción térmica, además la fluidez de mezcla arena resina facilita el soplado de los corazones, aún en formas geométricas complicadas, como se muestran en la figura 3.3. El tamaño de los moldes y corazones fabricados en caja fría está limitado sólo por la capacidad que tengan los equipos.



Figura 3.3. Corazones obtenidos por el proceso de caja fría.

3.7. Sistema de aglutinación fenólico uretánico amina (CB).

El sistema de aglutinación fenólico uretánico amina (CB), fue introducido en la industria de la fundición en 1968. Este sistema consta de tres partes, la parte 1 es una resina fenólica, la parte 2 es un dimetilisocianato y el tercer componente es una amina terciaria, utilizada como catalizador. El proceso de aglutinación puede trabajar con todas las arenas comerciales empleadas en la industria de la fundición ^[27,33].

La cantidad de resina utilizado en las mezclas es de 1.2% sobre el peso de la arena, dependiendo de las condiciones de trabajo, este porcentaje puede ser hasta de 0.60%. Las relación entre la resina parte 1 y parte 2 en la mezcla de arena es de 50/50, aunque en ciertas ocasiones, debido a las variables de la fundición, esta relación puede ser de 40/60 ó 45/55 a favor de la parte 2. Los niveles de 1.5 a 2% de resina son utilizados para vaciar hierros y aceros; siendo los niveles 1.0 a 1.5% para aluminio, bronce, latones y magnesio para facilitar el desarenado.

Las aminas comúnmente usadas para el curado son: La trietilamina (TEA), la dimetiletilamina (DMEA), la dimetilpropilamina (DMPA) y la dimetilisopropilamina (DMIPA) ^[29]. El consumo de amina y la rapidez de curado dependen en gran parte de la geometría del molde o corazón, de la eficiencia del venteo en el herramental y la concentración de la amina en el gas transportador.

3.7.1. Química del sistema fenólico uretánico amina.

Como ya se mencionó anteriormente este sistema de aglutinación se compone de tres partes, las cuales se describiremos a continuación. La resina parte 1 tiene tres componentes, la resina fenol - formaldehído, los solventes y los aditivos.

El fenol formaldehído comprende desde un 45 a un 60% en peso de la resina parte 1, varía según las condiciones de manufactura y a las cantidades relativas de fenol y formaldehído utilizados. Cambiando estas condiciones y cantidades de fenol y formaldehído resultarán resinas con propiedades drásticamente diferentes. La principal razón de esto es que el fenol y formaldehído controlan las características de la resistencia a la tensión, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas del sistema fenólico uretánico.

Los solventes conforman un 40 a un 55% en peso de la parte 1, que variará según los tipos y cantidades usadas. Algunos solventes por si mismos son mezclas complejas de hidrocarburos aromáticos de alto punto de ebullición. El propósito primario de los solventes es reducir la viscosidad de la resina. Los aditivos cuando están presentes, pueden componer de 1 al 5% de la resina parte 1 y son usados para facilitar la extracción de corazón del herramental y ayudan en la resistencia a la humedad del corazón, principalmente ^[33].

La resina parte 2 también puede dividirse en tres componentes: el isocianato, los solventes y aditivos. En la resina parte 2 los contenidos de isocianato pueden variar entre un 60 y un 80% dependiendo de las propiedades que se deseen. Los solventes en la parte 2 tienen las mismas funciones que en la parte 1, estos pueden comprender entre un 20 y un 40% de la resina parte 2 ^[33]. En el proceso de caja fría los aditivos utilizados en la parte 2 se emplean para mejorar la vida de banco, incrementar la resistencia a la humedad. Los aditivos pueden comprender de 1 al 10% de la parte 2 cuando se usan ^[23].

El tercer componente de este sistema es una amina utilizada como catalizador. Como se mencionó anteriormente, las aminas más utilizadas en la industria de la fundición son la trietilamina (TEA), la dimetiletilamina (DMEA) la dimetilpropilamina (DMPA) y la dimetilisopropilamina (DMIPA) ^[29].

En la figura 3.4 se muestra la reacción química entre la resina parte 1 y la resina parte 2 en presencia de la amina catalizadora para formar la resina sólida de poliuretano. Es este poliuretano es el que une a los granos de arena y le da al proceso fenólico uretánico sus características. El tamaño del puente de poliuretano que une los granos de arena dependerá directamente del contenido de resina que se utiliza para fabricar los corazones. Ver Figura 3.5.



Figura 3.4 Reacción para el proceso fenólico uretánico (CB) ^[28].

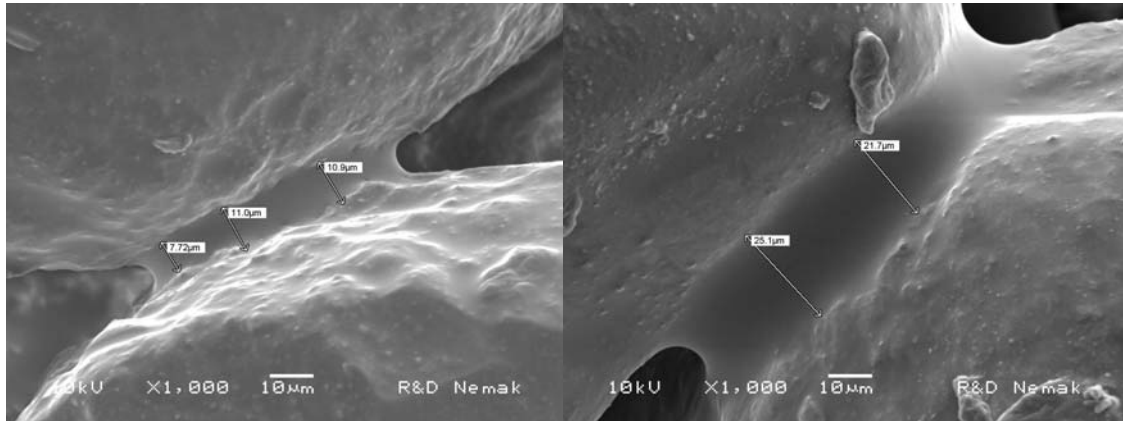


Figura 3.5. Efecto del contenido de resina sobre la puentes de unión entre los granos de arena con 0.8% de resina (izq) y 1.3% de resina (der) [34].

Desafortunadamente, la resina parte 2 puede también reaccionar con el grupo hidroxilo del agua, para formar un compuesto de poliurea que no es tan fuerte como el poliuretano. Una representación de esta reacción se muestra en la figura 3.6. Una molécula de agua puede destruir dos grupos isocianato de la resina parte 2. Por consiguiente, las propiedades de la mezcla se verán drásticamente reducidas.

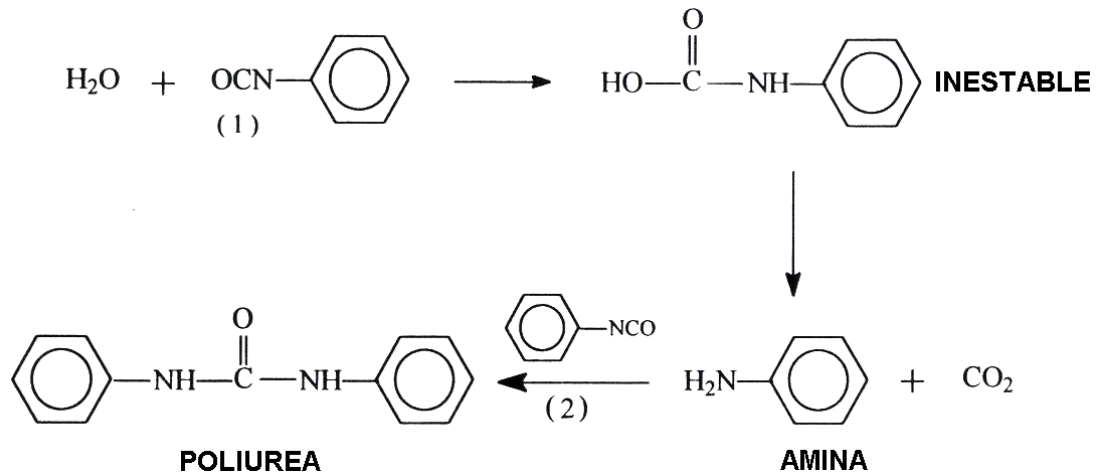


Figura 3.6. Reacción de la resina parte 2 con el agua [28].

3.8 Proceso de caja caliente.

Como indica el nombre en este proceso se debe aplicar calor para que la resina reaccione y de forma al corazón. Esta tecnología inició utilizando los sistemas furánicos, debido a que su reacción de polimerización es muy rápida en presencia de calor y esto fue una de las principales razones porque se desarrollaron los furanos como un sistema de resina de caja caliente, para tener una alternativa al proceso Shell (Croning) ^[35].

En la actualidad el proceso de caja caliente no solo utiliza resinas furánicas si no también resinas fenólicas y combinaciones de ambas (furánicas y fenólicas), además los nuevos sistemas de resinas ecológicas como el GMBOND[®] (GMB), resinas inorgánicas (INO) y Nemark Binder[®] (NB) utilizan el proceso caja caliente para eliminar el agua presente en la mezcla arena resina para formar el corazón.

3.8.1 Generalidades de proceso de caja caliente.

El proceso de caja caliente tienen una secuencia típica de soplado, curado y extracción. Es muy importante que primero se mezcle el catalizador con la arena por un minuto, después de este tiempo se adiciona la resina y se mezcla por otro minuto. Una vez lista, la mezcla es introducida por medio de aire a presión al herramental (caja de corazones) previamente calentado, la mezcla comienza a reaccionar al momento de entrar en contacto con el herramental caliente, el tiempo de curado dependerá de la resistencia requerida por el corazón para poder ser extraído del herramental sin fracturarse. La temperatura de trabajo para el proceso de caja caliente es de 180 a 280°C; esta temperatura depende de la formulación de la resina utilizada para fabricar los corazones ^[31,36]. En la figura 3.7 se muestra un corazón fabricado con el proceso de caja caliente.



Figura 3.7. Corazón de caja caliente.

Este proceso tiene un costo más elevado que el proceso de caja fría (CB) y se debe principalmente al costo de energía para elevar la temperatura de los herramentales así como a los costos de fabricación de las cajas y sopladoras de caja caliente.

3.8.2 Sistemas de resinas de caja caliente.

La mayoría de los sistemas de resinas de caja caliente están clasificadas en tipo furánicas y fenólicas, las furánicas contienen alcohol furfurílico, las resinas fenólicas contienen fenol, ambos sistemas de resinas contienen urea y formaldehído además de otros aditivos como agentes desmoldantes, plastificantes, activadores inhibidores y modificadores de la reacción. Las formulaciones típicas para las resinas de caja caliente son:

- Alcohol furfurílico, urea – formaldehído.
- Alcohol furfurílico – formaldehído.
- Fenol – urea – formaldehído.
- Fenol – formaldehído.

Las resinas furánicas reaccionan más rápido que las resinas fenólicas y también proporcionan mejor desarenado y menos olores. Las resinas con altos contenidos de alcohol furfurílico son usualmente las más reactivas, las resinas fenólicas son térmicamente más estables que la resinas furánicas y tienen mayor resistencia mecánica. Las figuras 3.8 y 3.9 muestran la estructura de los elementos que forman la resina alcohol furfurílico urea - formaldehído y la resina fenol-formaldehído respectivamente ^[31,36].

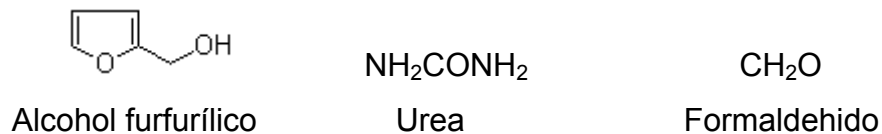


Figura 3.8. Elementos estructurales de la resina alcohol furfurílico, urea - formaldehído.



Figura 3.9. Elementos estructurales de la resina fenol formaldehído.

3.8.3 Reacción química de los sistemas de caja caliente.

La reacción de curado de las resinas de caja caliente se realiza por acción de calor y de un catalizador, ver figura 3.10. La resina forma una red sólida tridimensional a partir de la resina líquida. La reacción tiene tres etapas las cuales son:

- La adición inicial del formaldehído al fenol para formar metilfenoles.
- Crecimiento de la cadena mediante condensaciones
- Reticulación.

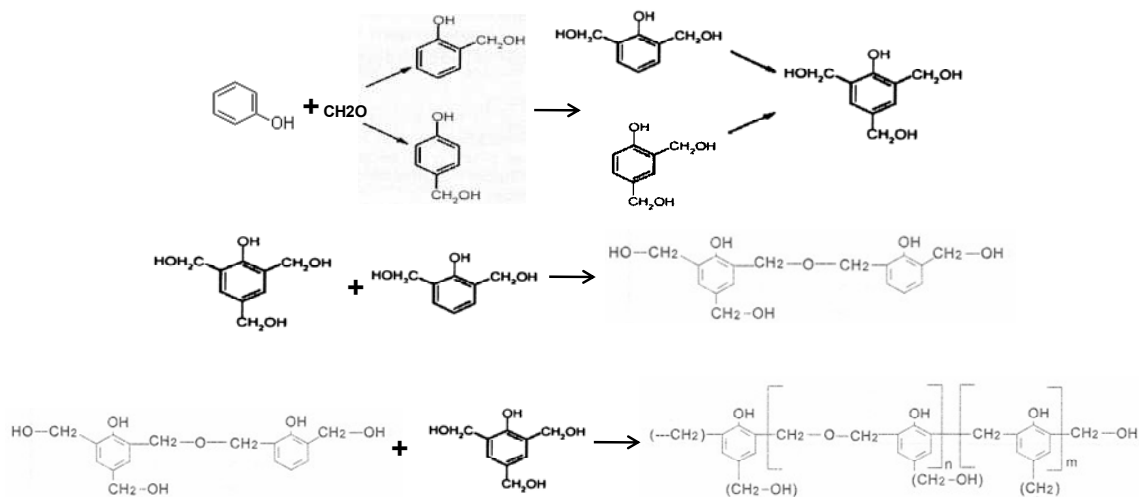


Figura 3.10. Esquema de la reacción fenólica [36].

La combinación de la temperatura de operación de caja así como el tipo de catalizador hacen que la resina se polimerice de manera correcta para formar el corazón. Por lo tanto, la selección del catalizador es muy importante para el correcto funcionamiento de la resina de caja caliente y debe ser compatible con las propiedades de la arena.

Los principales catalizadores para los sistemas de resinas de caja caliente son soluciones acuosas de cloruro de amonio o nitrato de amonio. Algunas veces se emplean mezclas con hidróxido de amonio para prevenir reacción de la resina mientras la mezcla (arena - resina) esta almacenada. El porcentaje de catalizador utilizado varía del 10 al 20% en base al peso de la resina.

3.9. Proceso GMBOND[®] (GMB).

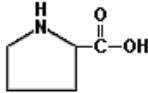
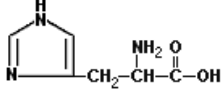
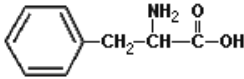
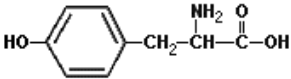
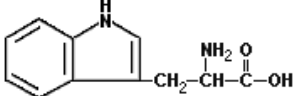
Este proceso fue desarrollado y patentado por General Motors en los años 90, buscaban una resina alternativa para formar moldes y corazones de arena, esta resina había de ser no tóxica, ambientalmente segura y tan fuerte como todos los aglutinantes existentes en la industria de la fundición. Después de estudiar varios materiales posibles, determinaron que los biopolímeros a base de proteínas mantenían fuertemente unidos los granos de arena que conforman los corazones ^[37,38].

En 1994 General Motors patentó este proceso y concedió a Hormel Food una licencia única para administrar la resina GMBOND[®] (GMB), esta resina es una gelatina, formada por la combinación de varios aminoácidos como glicina, alanina, ácido aspártico, ácido glutámico, entre otros, los cuales forman largas cadenas unidas por enlaces pépticos ^[39,40].

3.9.1. Química de la resina GMBOND[®].

Una proteína es una macromolécula orgánica que básicamente está formada por carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N); en ocasiones puede contener azufre (S) y fósforo (P). Estos elementos químicos se unen para formar los aminoácidos que constituyen las unidades estructurales de las proteínas ^[41,42]. Los aminoácidos se caracterizan por poseer un grupo carboxilo (-COOH) y un grupo amino (-NH₂). En la Tabla 3.4 puede verse el nombre y la fórmula estructural de los 20 principales aminoácidos.

Tabla 3.4. Nombre y la formula estructural de los 20 principales aminoácidos [43].

Nombre	Formula estructural
Alanina	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Arginina	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(=\text{NH})\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Asparagina	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(=\text{O})\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Acido aspártico	$\text{HOOC}-\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Cisteina	$\text{HS}-\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Glutamina	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(=\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Acido glutámico	$\text{HOOC}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Glicina	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2\text{COOH}$
Isoleucina	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Leucina	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Lisina	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Metionina	$\text{CH}_3-\text{S}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Serina	$\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Treonina	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Valina	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$
Prolina	
Histidina	
Fenilalanina	
Tirosina	
Triptófano	

Las proteínas están formados por la unión de aminoácidos mediante un enlace peptídico (-C(=O)-NH-). En la figura 3.11 se muestra la reacción entre dos aminoácidos, la R y R' representan los grupos funcionales de los aminoácidos descritos en la Tabla 3.4.

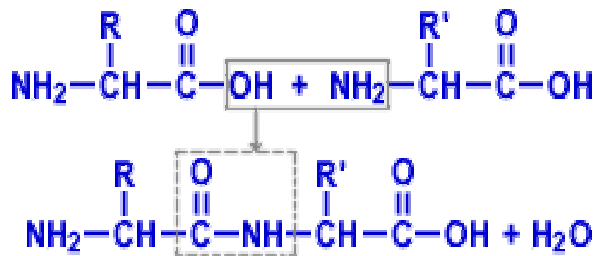


Figura 3.11. Reacción entre aminoácidos.

Para formar proteínas los aminoácidos se van enlazando entre sí formando cadenas de longitud y secuencia variable. Debido a los diferentes grupos funcionales de los aminoácidos, las proteínas pueden tener carácter ácido, básico o neutro. La mayoría de las proteínas son solubles en agua y su comportamiento dependerá del tipo de aminoácidos que la componen, de la longitud de la cadena y la estructura de los aminoácidos ^[43].

3.9.2. Proceso de recubrimiento de la arena con la resina GM Bond[®].

El proceso de recubrimiento de la arena con la resina GM Bond[®] (ver Figura 3.12) se inicia con el calentamiento de la arena, la cual debe de estar en un rango de temperatura de 110 a 130°C, posteriormente la arena es colocada en un molino y se inicia el mezclado en seco, con el mezclador en movimiento se agrega la resina GM Bond[®], el porcentaje puede variar de 0.75 a 1.5% con respecto al peso de la arena y depende del tipo de corazón que se requiera fabricar. Nuevamente con el mezclador en movimiento se agrega 3% agua y se continua el mezclado. Por último la arena recubierta es enfriada y almacenada para su posterior uso en la fabricación de moldes y corazones de arena ^[41,44].

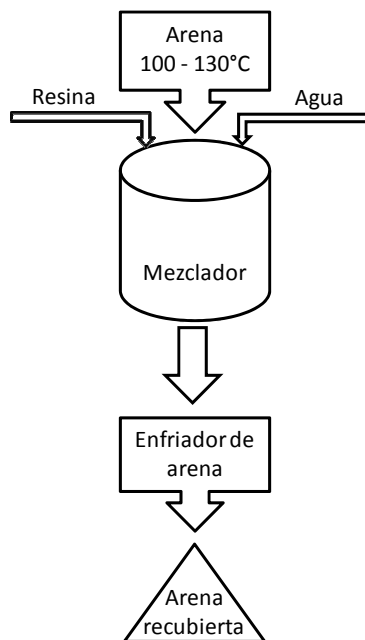


Figura 3.12. Proceso de recubrimiento de la arena con la resina GM Bond®.

3.9.3. Proceso de fabricación de corazones con la resina GM Bond®.

El proceso de fabricación de corazones con la resina GM Bond® inicia con el mezclado de la arena, la cual debe de estar a una temperatura inferior a los 20°C. Para la activación de la resina se agrega agua a la arena previamente recubierta con la resina GM Bond®. La mezcla es colocada dentro de la campana de sople la cual debe de contar con un sistema de refrigeración para que la mezcla permanezca a una temperatura inferior a los 20 °C. Se sopla la mezcla dentro del herramental y el curado de los corazones se lleva a cabo por medio de la deshidratación de la mezcla, a diferencia del proceso de caja caliente, en el proceso GM Bond® utiliza aire caliente para acelerar el proceso de deshidratación y reducir el tiempo de fabricación de los corazones. Al ser una resina soluble en agua, esto permite que el mecanismo de endurecido pueda ser reversible si se agrega agua de nuevo a los corazones ^[41].

3.10. Proceso inorgánico (INO).

Las resinas inorgánicas se han utilizado desde los inicios de la industria de la fundición, para la fabricación de grandes moldes de arena empleados en el vaciado de hierro y acero. Fue desarrollado en los años 50, sin embargo, la introducción de los sistemas de aglutinación orgánica como las resina furánicas del proceso de caja caliente y las resina fenol uretano para caja fría, reemplazaron las resinas inorgánicas, al poder producir corazones con geometrías más complejas e incrementar la productividad con las resinas orgánicas ^[23,28].

Fue hasta principios del año 2000 cuando las nuevas tecnologías de la resinas inorgánicas comenzaron a utilizarse de nuevo en las fundiciones de aluminio de Alemania, debido a que las regulaciones ambientales exigen disminuir las emisiones de agentes contaminantes al aire (HAPs), de los compuestos orgánicos volátiles (VOC), benceno, tolueno y xileno (BTX), así como el incremento en el costo del confinamiento de la arena utilizada en la fundición. Alemania es el principal país de la comunidad europea donde se están desarrollando los nuevos sistemas de resinas inorgánicas debido a su gran industria de fundición. En la Tabla 3.5 se muestra el nombre comercial de la resina inorgánica y la compañía que lo desarrollo ^[45,46,47].

Tabla 3.5. Lista de nuevas resinas inorgánicas.

.Resina	Compañía.
Laampe-Kuhs Mineral Binder [®]	Laempe GmbH
AWB [®]	Minelco GmbH
Hydrobond [®]	Hydro Aluminium GmbH
Cordis [®]	Hüttenes-AlbertusChemische Werke GmbH
Inotec [®]	Ashland-Südchemie-Kernfest GmbH
Foseco Silicate Binder [®]	Foseco GmbH

3.10.1. Silicatos.

Las soluciones de silicato son solución alcalinas que tienen un pH de 9 a 11 y están formadas de SiO_2 y M_2O cuya fórmula es $x\text{SiO}_2y\text{M}_2\text{O}$, M puede ser sodio (Na), potasio (K) o litio (Li), la principal diferencia entre las soluciones de silicatos se encuentra en la relación entre estos dos compuestos SiO_2 y M_2O la cual puede variar desde 2:1 hasta 3:1 y tiene una influencia directa sobre las propiedades de la solución y de los corazones. También se pueden preparar mezclas de varios silicatos para mejorar la estabilidad química y viscosidad de la solución ^[28,29,32,48].

El incrementar la concentración de silicato en la solución tiene diferentes efectos como el aumento de la viscosidad de la solución y la resistencia mecánica de los corazones, aumenta la resistencia a la humedad y la resistencia térmica de los corazones ^[48].

El agregar aditivos a la solución de silicato tiene como objetivo disminuir la viscosidad de la solución, mejorar el acabado superficial de la pieza, incrementar la estabilidad dimensional de los corazones, aumentar la vida útil de la mezcla, mejorar la plasticidad de los corazones, acelerar el proceso de deshidratación para disminuir el tiempo de fabricar los corazones, estos aditivos pueden ser fosfatos, boratos, sulfatos, polioles, silicones, etc ^[28,32,48,49].

3.10.2. Reacción de polimerización de los silicatos.

El proceso de deshidratación depende directamente del tipo de silicato empleado para fabricar los corazones y de la temperatura del proceso, entre mayor sea la temperatura de la caja de corazones el agua presente en la mezcla arena resina se evaporará más rápido. En este proceso el silicato se endurece al disminuir la cantidad de agua en la mezcla y subsecuentemente formará el corazón como resultado de la deshidratación de la mezcla.

En la Figura 3.13 se muestra la reacción de polimerización por condensación del $\text{Na}_2\text{SiO}_2(\text{OH})_2$, el principal problema que se presenta en este proceso es que al llevarse a cabo la reacción química del silicato de sodio se genera agua ^[50,51].

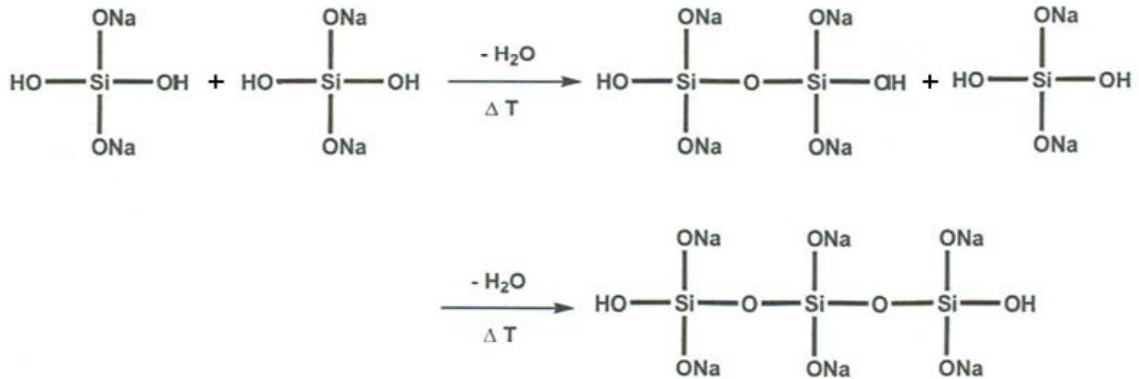


Figura 3.13. Reacción de polimerización del $\text{Na}_2\text{SiO}_2(\text{OH})_2$.

3.10.3. Fabricación de corazones con resina inorgánica.

La fabricación de corazones con la resina inorgánica al igual que todos los sistemas de aglutinación química inicia con el mezclado de la arena con la resina. Posteriormente la mezcla es colocada en la placa de soplo. La mezcla es introducida en la caja de corazones mediante una presión de aire.

Usualmente la caja de corazones se encuentra en un rango de temperatura entre los 80 y 200°C, esta temperatura dependerá del sistema empleado ^[52,53,54]. Debido a que la reacción química para la formación del corazón desprende agua es necesario utilizar aire caliente, para acelerar el proceso de deshidratación del corazón y remover el agua generada por la reacción química.

Los corazones fabricados con resinas inorgánicas son altamente higroscópicos (absorben agua del medio ambiente) y por tal razón sus propiedades mecánicas disminuyen debilitando a los mismos, por lo cual no se pueden almacenar los corazones durante mucho tiempo como es el caso de los corazones de caja fría. Ver figura 3.14.



Corazón inorgánico.

Corazón de caja fría.

Figura 3.14. Efecto de la humedad sobre los corazones inorgánicos.

La recuperación térmica de la arena no es posible debido a la composición química de la resina inorgánica, porque el puente de resina que une los granos de arena no contiene carbono en su estructura (Figura 3.15) por lo que se recomienda el uso de recuperación mecánica por atrición para romper los corazones y reutilizar la arena ^[48,52]. Debido a su alta resistencia térmica se dificultan el proceso de desarenado de piezas de aluminio.

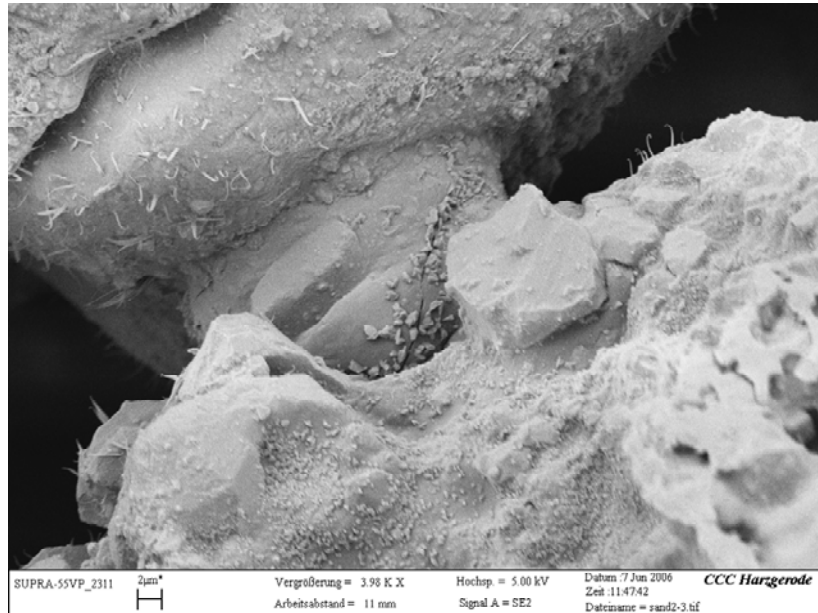


Figura 3.15. Enlace de dos granos de arena mediante resina inorgánica.

3.11. Polisacáridos.

Los polisacáridos son los únicos biopolímeros con una amplia diversidad estructural. Gran cantidad de polisacáridos son formados por biosíntesis de muchos organismos incluyendo plantas, animales, hongos, algas. Están formados por azúcares, cuyo nombre químico es carbohidratos o hidratos de carbono, los elementos que constituyen el azúcar son carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), los dos últimos en la misma proporción que en el agua, es decir, dos átomos de hidrógeno por cada átomo de oxígeno ^[43,55].

El carbohidrato más conocido es la sacarosa, con fórmula $C_{12}H_{22}O_{11}$, es el azúcar que utilizamos comúnmente en las comidas. Está formada por la unión de la glucosa y la fructosa a través de una reacción de condensación, en la cual se elimina una molécula de agua ^[56]. Véase figura 3.16.

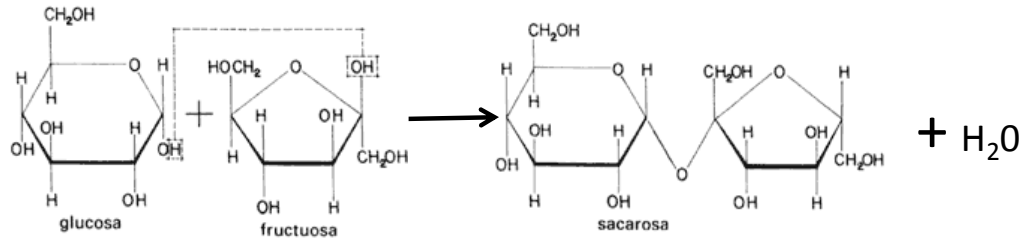


Figura 3.16. Formación de sacarosa por condensación.

Convencionalmente, se ha considerado como polisacárido aquel polímero constituido por más de 10 monosacáridos unidos por distintos enlaces glucosídicos. Se encuentran como cadenas lineales o ramificadas, que pueden estar integradas por un solo tipo de monosacáridos (homopolisacárido) como el almidón y la celulosa, o también por varios tipos de monosacáridos (heteropolisacáridos), como es el caso de la mayoría de las gomas ^[43].

La celulosa y el almidón son polisacáridos de la glucosa que se unen por condensación. La mayor diferencia estructural entre la celulosa y el almidón es la manera en que se unen las moléculas de glucosa, a través de uno de sus grupos OH. Ver Figura 3.17.

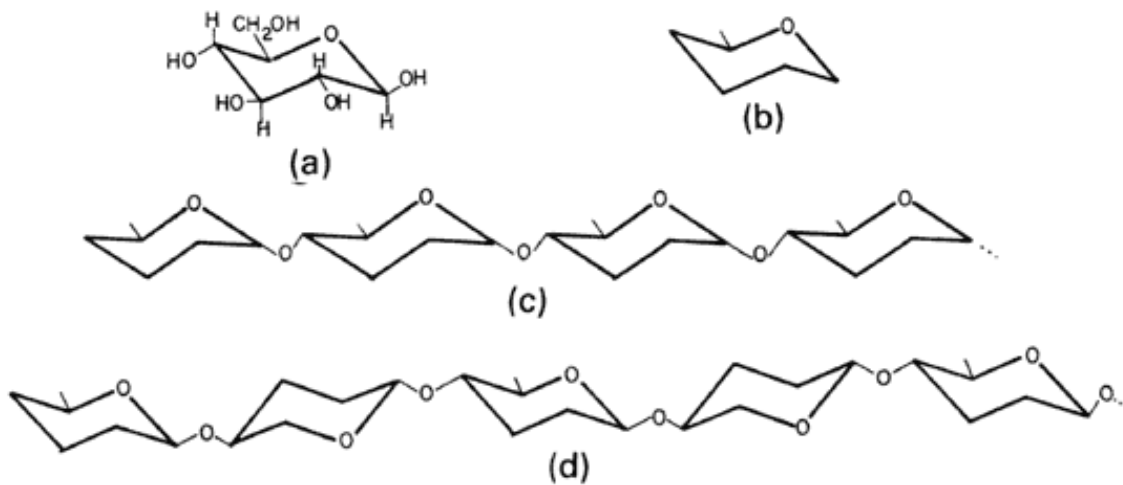


Figura 3.17. a) Muestra el acomodo espacial de la glucosa. b) Fórmula simplificada de la glucosa. c) Almidón. d) Celulosa.

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la tierra, es una homopolímero formado por moléculas de glucosa colocadas en línea recta, que están unidas entre sí por enlaces tipo $\beta(1-4)$ glucosídicos. Los enlaces por puente de hidrógeno entre moléculas vecinas, dan lugar a su estructura rígida y hacen que sea insoluble en agua, al tener muy poca posibilidad de que el agua penetre la molécula de celulosa.

Por el contrario, en el almidón las cadenas adquieren una configuración en espiral, lo que hace que sea un polisacárido menos rígido, existe un menor número de enlaces por puente de hidrógeno, así que el agua puede penetrar fácilmente entre las cadenas, esta diferencia puede parecer mínima, pero el resultado es lo que determina la diferencia en la celulosa y el almidón ^[55,56].

Hemicelulosa, este término es algo ambiguo y se emplea para referirse a un grupo muy extenso de polisacáridos con diversos de monómeros y que son muy distintos a la celulosa y al almidón. Se asocian principalmente a la xilosa, manosa, glucosa. Una de las hemicelulosas más abundantes es la que está integrada por la unión $\beta(1-4)$ de unidades de D-xilopiranosas, a esta estructura lineal básica ocasionalmente se le enlazan grupos L-arabinofuranosas mediante los carbonos 2 o 3 de la xilosa. Generalmente son solubles en soluciones alcalinas concentradas de hidróxido de sodio o de potasio.

El almidón es una mezcla de dos polisacáridos diferentes, la amilosa que representa del 15 al 20% de su estructura y la amilopectina que constituye el restante 80 a 85%. La amilosa es un polímero lineal formado de 200 a 2500 unidades enlazadas a través enlaces $\alpha(1-4)$ glucosídicos, esta fracción del almidón es soluble en agua. La amilopectina es un polímero ramificado y está formado por muchas cadenas cortas de 20 a 25 unidades α glucosa, la parte lineal está unida mediante enlaces $\alpha(1-4)$ y la ramificación está unida a la cadena principal por un enlace $\alpha(1-6)$, esta fracción de almidón es insoluble en agua. Ver Figura 3.18.

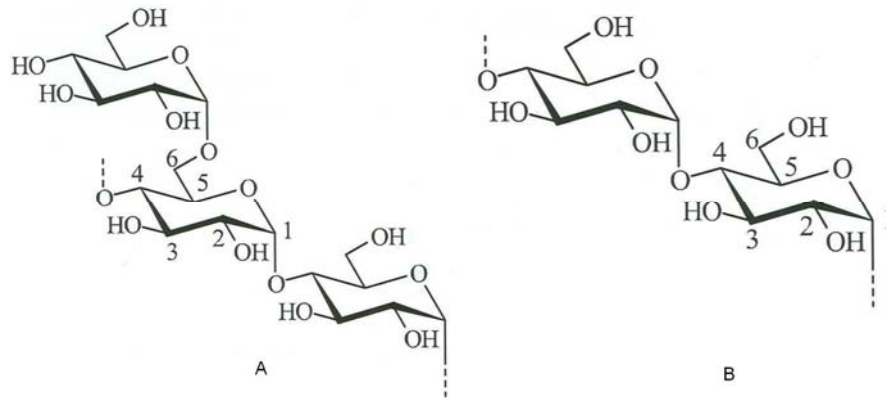


Figura 3.18. A) Estructura de la amilopectina B) Estructura de la amilosa.

Las dextrinas son polisacáridos naturales formados de moléculas glucosa unidas por enlaces $\alpha(1-6)$ en la cadena principal, las ramificaciones contienen de una a dos moléculas de glucosa y se unen a la cadena principal mediante enlaces $\alpha(1-3)$, ver figura 3.19, Los enlaces $\alpha(1-6)$ en la dextrinas pueden variar del 50 al 97% de los encales glucosídicos. La dextrina es un polisacárido soluble en agua y en solventes como formaldehído y glicerina.

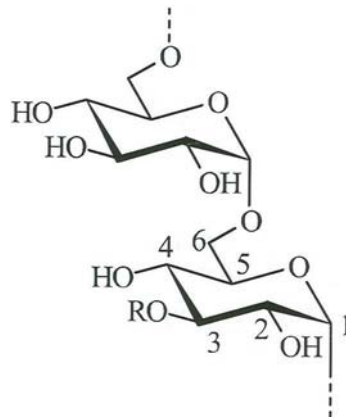


Figura 3.19. Dextrina.

El alginato es un polisacárido gelificante que se encuentra en gran abundancia en las algas. Es un copolímero lineal de ácido $\beta(1-4)$ -D-manolilurónico y ácido $\alpha(1-4)$ -L-glucosilurónico, unidos mediante enlaces (1-4) glucosídicos, variando la composición y la secuencia. Ver Figura 3.20.

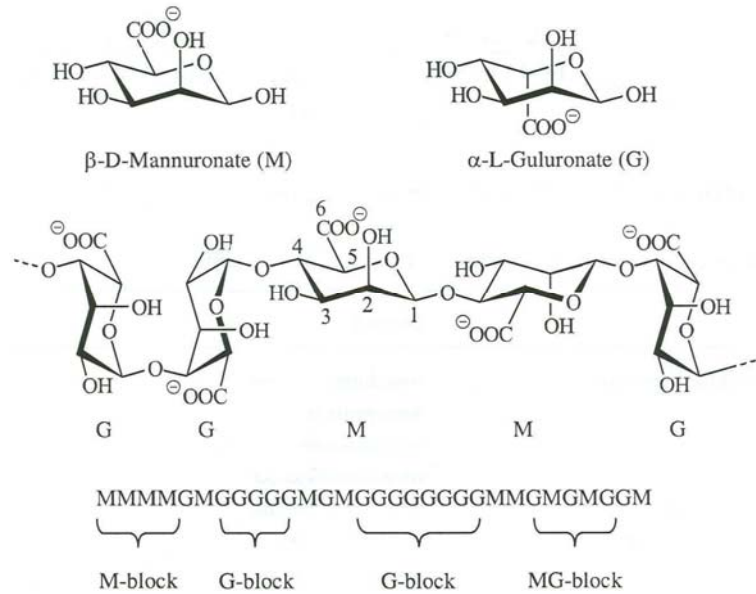


Figura 3.20. Alginato.

La goma guar también es un copolímero y tiene una estructura química ramificada, la cadena principal consiste de unidades β -D-manosa unidas mediante enlaces β (1-4) y a la cual se le añaden ramas de α -D-galactosa vía enlaces α (1-6). La relación de monosacáridos es de 2:1, es decir, en cada tercer D-manosa se localiza una D-galactosa. Figura 3.21. Su peso molecular es variado, pero puede ser mayor a 2 000 000 g/mol.

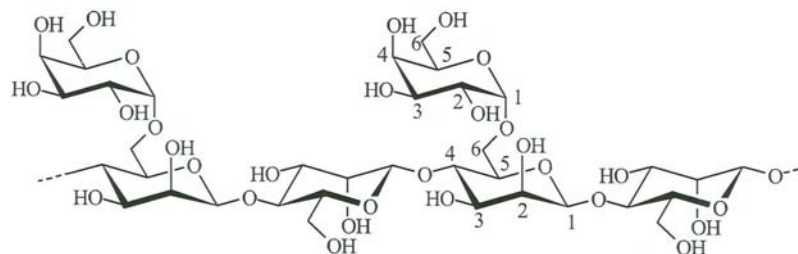


Figura 3.21. Goma guar.

La quitina (Figura 3.22) y el quitosán (Figura 3.23) son biopolímeros que forma parte importante de la estructura de los invertebrados, principalmente en los caparzones de los crustáceos y moluscos como los camarones y cangrejos.

Su composición química está basada en amino azúcares N-acetil-D-glucosamina y N-glucosamina que se unen mediante enlaces β (1-4), formando estructuras fibras y cristalinas, semejantes a las celulosa ^[43,55,57].

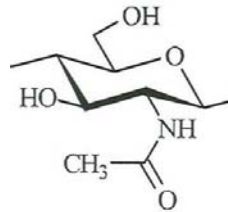


Figura 3.22. Quitina.

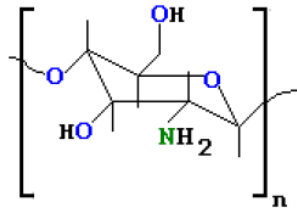


Figura 3.23. Quitosan.

Sin embargo ambos polisacáridos no muestran una estructura ideal de un homopolímero, los dos contienen fracciones residuales N-acetil-D-glucosamina y N-glucosamina, como se muestra en la figura 3.24. Para distinguirlos se determina su solubilidad en ácido acético al 1% en la cual el quitosán es soluble.

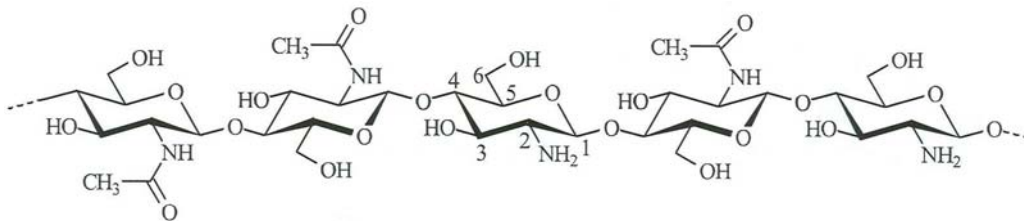


Figura 3.24. Estructura de la quitina y quitosán.

3.12. Consumo y costo de resinas para fundición.

Las fundiciones de aluminio utilizan principalmente resinas orgánicas derivadas del petróleo, para la fabricación de moldes y corazones de arena. En la figura 3.25 se muestra la participación de los diferentes procesos de fabricación de corazones para este tipo de industria.

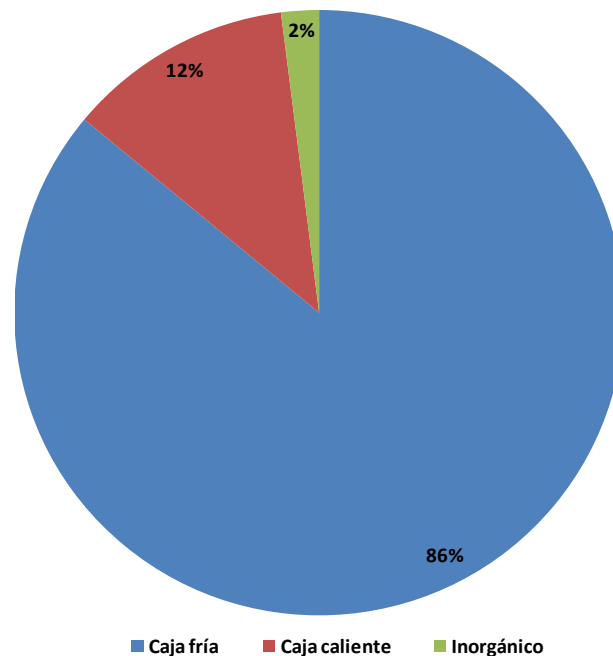


Figura 3.25. Consumo de resinas para fundición.

Actualmente la producción de resinas para fundición, es un mercado muy cerrado debido a que solamente dos compañías dominan el comercio mundial de estos insumos, englobando la producción de resinas para caja fría, caja caliente y más recientemente en la fabricación de resinas inorgánicas.

En la Figura 3.26 se muestra el incremento en el precio de la resina de caja fría en años recientes, la cual está ligada a la fluctuación del precio internacional del petróleo, lo que ocasiona el aumento en los costos de la misma y por ende el impacto significativo en el costo de la fabricación de corazones.

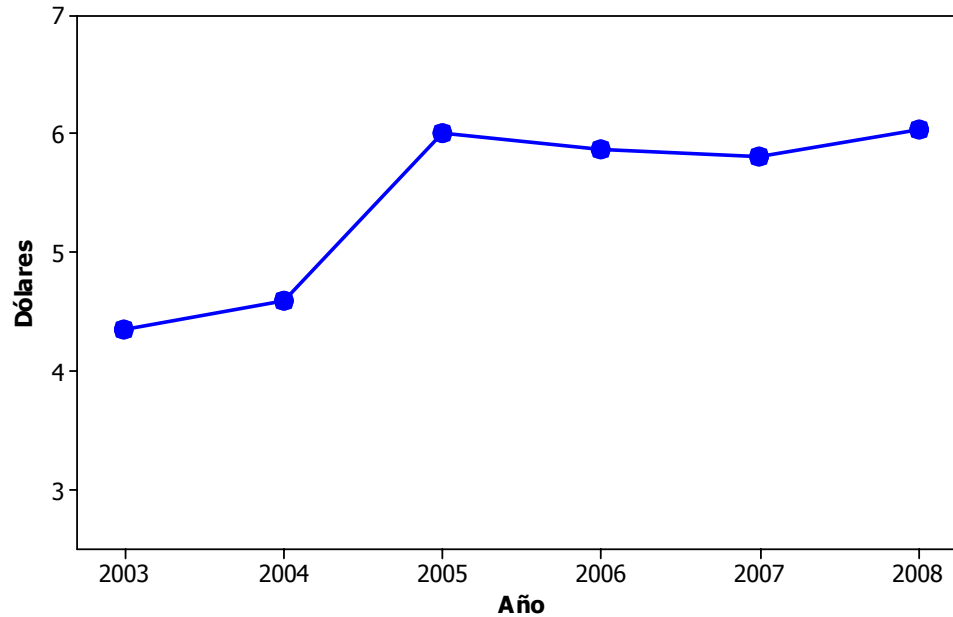


Figura 3.26. Incremento del precio de la resina de caja fría.

3.13. Aditivos para la mezcla.

A pesar de que la arena y la resina sean seleccionadas adecuadamente, las propiedades de la mezcla arena resina para la fabricación de los moldes y corazones puede presentar problemas adicionales tales como baja fluidez y corta vida de banco. En estas circunstancias, el uso de aditivos contribuye a resolver y mejorar una condición específica. Seleccionar el aditivo correcto dependerá de las características del proceso, así como de las propiedades finales que se requieran en la mezcla. Para seleccionar el aditivo más adecuado se deben tomarse en cuenta los siguientes factores ^[6,7,23,28,].

- AFS de la arena
- Distribución granulométrica de arena.
- Permeabilidad de la arena.
- Proceso de fabricación del corazón.
- Sistema de aglutinación.

- Generación de gases de aditivo.
- Conductividad térmica de la arena y el aditivo.
- Sistema de fabricación de la pieza.
- Temperatura de vaciado.
- Método de aplicación de aditivo.
- Compatibilidad entre el aditivo y el sistema de aglutinación.

3.13.1. Tipos de aditivos.

Existen diferentes tipos de aditivos usados en el proceso de fabricación de corazones, los cuales se utilizan para modificar las propiedades de la resinas y de los mismos corazones.

Los aditivos para la arena que son utilizados para reducir el problema de la expansión y por consiguiente la distorsión en los moldes y corazones, basan su funcionamiento en está basando en mantener separados los granos de arena. Algunos de estos aditivos reducen la expansión generando una capa de material resistente entre los granos de arena, otros aditivos son agregados para transformarse o desaparecer mediante su combustión dejando con ello espacios vacíos en los cuales la arena puede expandirse al ser calentada.

También se agregan aditivos para neutralizar las sustancias alcalinas presentes en la arena después del proceso de recuperación térmica y de esta manera ayudan a que las propiedades mecánicas de los moldes y corazones de mantengan.

Generalmente los aditivos para las resinas se utilizan para contrarrestar el efecto dañino de la humedad sobre las propiedades del corazón, así como agentes desmoldeantes, que también actúan como fluidizantes, e incrementan la resistencia a la tensión de un 25 a un 35%. Dependiendo de la aplicación puede ser de un 4 a un 8% en base al peso de la resina.

La cantidad en que estos aditivos deben ser adicionados requerirá de estudios previos que determinen el efecto real de cada uno de ellos sobre las propiedades finales de la mezcla ^[6,7].

4. Justificación y Alcance.

4.1. Justificación.

El reciente incremento en los precios del petróleo ocasionó una alza en el precio de las resinas derivadas de petróleo utilizadas para la fabricación de moldes y corazones de arena. Por tal motivo, las fundiciones de aluminio que utilizan este tipo de resinas estarán buscando cambiarlas en el futuro para reducir sus costos de producción e incrementar su competitividad. Aunado a esto, para cumplir con las regulaciones ambientales exigidas por el gobierno y sus clientes, las fundiciones de aluminio se encuentran bajo gran presión de producir moldes y corazones con resina que ayuden al reducir las emisiones.

Debido a lo anterior, se ha visto la necesidad de realizar una investigación con el objetivo de desarrollar una resina libre de compuestos derivados de petróleo.

Se decidió trabajar con un biopolímero formado por una mezcla de polisacáridos que cumplirá con todas las características requeridas para fabricar moldes y corazones de arena, empleados en el vaciado de piezas de aluminio.

4.2. Alcance.

El presente trabajo de investigación solo considera las mezclas de polisacáridos para la elaboración de aglutinantes que empleen para fabricación de moldes y corazones de arena utilizados la fundición de aluminio.

5. Procedimiento Experimental.

5.1. Introducción.

En 1960 las fundiciones de todo el mundo comenzaron a utilizar los polímeros para la fabricación de moldes y corazones, esto hizo evidente la necesidad de desarrollar pruebas de laboratorio para minimizar el riesgo y el costo de introducción de nuevos sistemas y resinas a la industria de fundición. Como resultado, se generó una serie de pruebas que están estandarizadas por la sociedad americana de fundición (AFS) y fueron diseñados para identificar las modificaciones a las formulaciones de las resinas, sus efectos en la calidad de las piezas y ayudan a encontrar soluciones a los defectos encontrados en las piezas ^[35,59].

En este capítulo se describen detalladamente las pruebas, los parámetros de cada de ellas, así como los métodos y equipos utilizados para evaluar la nueva resina (Nemak Binder[®]). Estas pruebas permiten evaluar la composición de la resina mediante el análisis termogravimétrico, el contenido de sólidos y espectrofotometría de infrarrojo (FTIR). La vida de banco, la densidad aparente y fracción de poros de los corazones fueron pruebas realizadas para evaluar la calidad de la mezcla. Las pruebas del desarrollo de resistencia en ambiente y cámara húmeda, la distorsión en caliente, la evolución de gases están desarrolladas para evaluar la calidad de los corazones.

El análisis de los gases generados por la pirolisis de los corazones, mediante la cromatografía de gases masas, permitió conocer los compuestos generados.

5.2. Arreglo experimental.

La resina NB surge de la necesidad de Nemak (empresa dedicada a la fundición de monobloques y cabezas de aluminio) de romper la dependencia de las resinas orgánicas para fundición y desarrollar una resina libre de petróleo e independiente del precio del mismo, así como mejorar el ambiente laboral de sus empleados en la fundición.

Por tales motivos se decidió trabajar con un biopolímero formado por una mezcla de polisacáridos que cumplirá con todas las características requeridas para fabricar moldes y corazones de arena, empleados en el vaciado de piezas de aluminio. La resina NB así como el proceso de fabricación de corazones está en proceso de patentado por Nemak ^[58].

Con base en la información obtenida durante de revisión bibliográfica previas, las propuestas del departamento de investigación y desarrollo de Nemak, se decidió validar el nuevo sistema de aglutinación NB confrontándolo contra los sistemas de resinas actualmente empleados para la fabricación de moldes y corazones de arena: resina de caja fría (CB), GM Bond (GMB), resina de caja caliente (HB) y resina inorgánica (INO).

Buscando generar de forma ordenada, el máximo número de combinaciones posibles se optó por utilizar un diseño de experimentos completamente al azar para cada una de las pruebas donde se comparó el nuevo sistema de aglutinación NB.

5.3. Material utilizado.

La arena utilizada para la preparación de las mezclas empleadas en la fabricación de las probetas de laboratorio fue arena sílica nueva, su composición química se muestra en la Tabla 5.1. El tamaño de grano promedio fue de 52 según el estándar del AFS, la distribución granulométrica de la arena es en tres mallas y se muestra en la Figura 5.1.

Tabla 5.1. Composición química de la arena sílica.

Compuesto	Concentración (%)
SiO ₂	98.38
Al ₂ O ₃	0.616
Fe ₂ O ₃	0.059
MgO	0.009
CaO	0.138
Na ₂ O	0.611
K ₂ O	0.057
TiO ₂	0.033

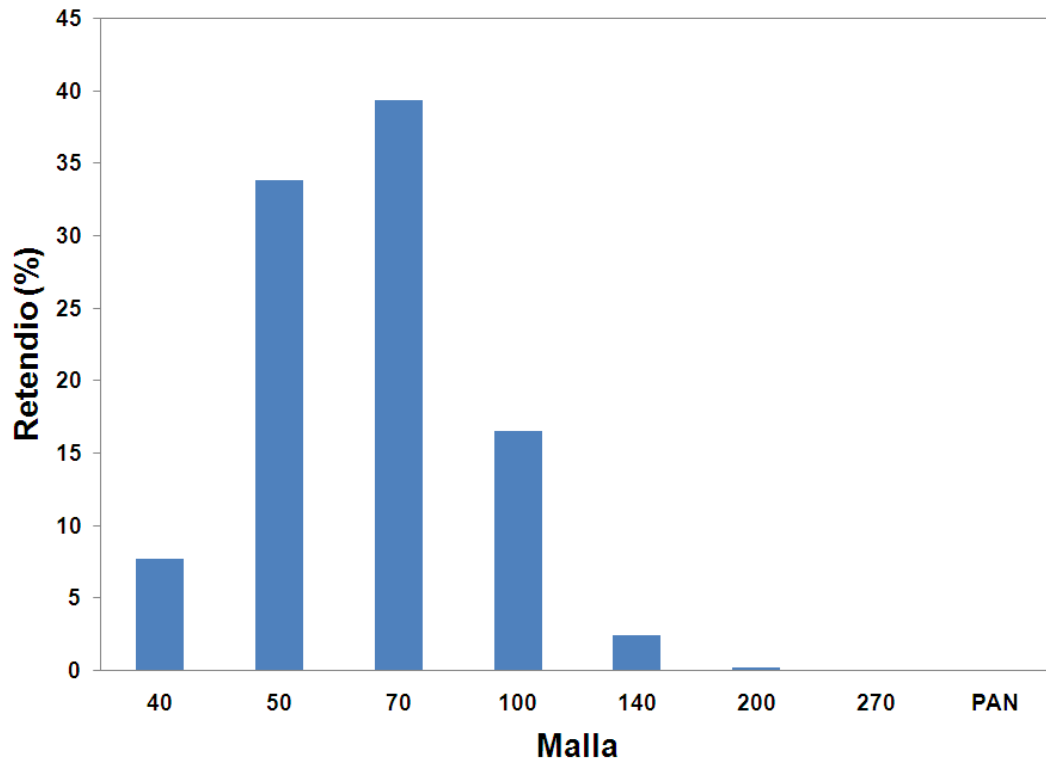


Figura 5.1. Distribución granulométrica de la arena.

El contenido de aglutinante utilizado en las mezclas permaneció constante y fue 1.0% en base al peso de la arena. A continuación se menciona la composición química de las resinas empleadas en esta investigación, para la fabricación de las probetas de laboratorio.

El sistema de caja fría (CB) está dividido en tres partes: Los componentes de la resina parte 1 se muestran en la Tabla 5.2 ^[60]. La composición química de la resina parte 2 se describe en la Tabla 5.3 ^[61]. El catalizador utilizado para este sistema fue la dimetilpropilamina (DMPA).

Tabla 5.2. Composición química de la resina parte 1 de caja fría.

CAS	Compuesto	Formula
108-95-2	Fenol	C ₆ H ₆ O
91-20-3	Naftaleno	C ₁₀ H ₈
64742-94-5	Solvente nafta	N.A.
68477-31-6	Destilados de bajo punto de ebullición	N.A.
106-65-0	Dimetil succinato	C ₆ H ₁₀ O ₄
627-93-0	Dimetil adipato	C ₈ H ₁₄ O ₄
1119-40-0	Dimetil glutarato	C ₇ H ₁₂ O ₄

Tabla 5.3. Composición química de la resina parte 2.

CAS	Compuesto	Formula
9016-87-9	Polimetil polifenil poliisocyanato (PMDI)	N.A.
101-68-8	4,4' - Difenilmetilendiisocianato	C ₁₅ H ₁₀ N ₂ O ₂
5873-54-1	2,4' - Difenilmetilendiisocianato	C ₁₅ H ₁₀ N ₂ O ₂
26447-40-5	Difenilmetilendiisocianato	C ₁₅ H ₁₀ N ₂ O ₂
91-20-3	Naftaleno	C ₁₀ H ₈
8008-20-6	Queroseno	N.A.
64742-94-5	Solvente nafta	N.A.
68477-31-6	Destilados de bajo punto de ebullición	N.A.

Las compuestos que integran la resina GMBOND[®] (GMB) se mencionan en la Tabla 5.4 ^[62].

Tabla 5.4. Composición química de la resina GMBOND[®] (GMB).

CAS	Compuesto	Formula
9000-70-8	Gelatina	N.A.
7758-23-8	Fosfato de calcio monobásico	Ca(H ₂ PO ₄) ₂
1309-037-1	Óxido férrico	Fe ₂ O ₃
99-76-3	Metilparabeno	C ₈ H ₈ O ₃
94-13-3	Propilparabeno	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
532-32-1	Benzoato de sodio	C ₇ H ₅ NaO ₂

El sistema de caja caliente (HB) está dividida en dos partes, la resina está compuesta de alcohol furfurílico ($C_5H_6O_2$) y formaldehído (CH_2O)^[63] y el catalizador en este caso fue nitrato de amonio (NH_4NO_3)^[64].

La composición de la resina inorgánica se describe en la Tabla 5.5^[65].

Tabla 5.5. Composición de la resina inorgánica.

CAS	Compuesto	Formula
10034-99-8	Sulfato de magnesio	$MgSO_4 \cdot 7(H_2O)$
39365-87-2	Trisilicato de magnesio	$2MgO \cdot 3SiO_2 \cdot xH_2O$
1344-09-8	Silicato de sodio	Na_2SiO_3
1310-73-2	Hidróxido de sodio	NaOH
7732-18-5	Agua	H_2O

5.4. Equipo utilizado.

El análisis termogravimétrico de las resinas se realizó en un TGA-50 Shimadzu, Figura 5.2. Para la determinación del contenido de sólidos de las resinas se utilizó una mufla marca Thermolyne y una balanza analítica de 0.1mg.



Figura 5.2. TGA-50 Shimadzu.

En análisis de espectrometría de la resinas se realizaron en un espectrofotómetro de infrarrojo (FTIR) marca Perkin Elmer. Para pesar las probetas utilizadas para la medición de la densidad aparente se utilizó una balanza analítica de 0.1mg y el volumen de las probetas fue obtenido mediante modelo matemático fabricado en Autocad.

Las mezclas de arena y resina empleadas para la prueba de vida de banco, densidad aparente de los corazones, desarrollo de resistencia en ambiente y cámara húmeda y distorsión en caliente se prepararon en un molino mezclador de 4 kg marca Hobart. Figura 5.3.



Figura 5.3. Molino mezclador Hobart.

Se utilizó una máquina sopladora de laboratorio marca Redford Carver para la fabricación de las probetas de laboratorio tipo guitarra empleadas en las pruebas de vida de banco, densidad aparente de los corazones, desarrollo de resistencia en ambiente y cámara húmeda. Figura 5.4



Figura 5.4. Sopladora de laboratorio Redford Carver.

La fabricación de las probetas tipo barra empleadas para la prueba de distorsión en caliente se fabricaron en una sopladora de laboratorio marca Simpson Gerosa. Ver Figura 5.5. El ensayo de resistencia a la tensión se realizó en una máquina universal Simpson Gerosa. Figura 5.6



Figura 5.5. Sopladora de laboratorio marca Simpson Gerosa.



Figura 5.6. Maquina universal Simpson Gerosa.

Para controlar la humedad de la prueba del desarrollo de resistencia en cámara húmeda se recurrió a una cámara ambiental de pruebas marca ESPEC modelo ESL-3CA. Ver Figura 5.7. El ensayo de distorsión en caliente se llevó a cabo en un equipo de distorsión en caliente marca Simpson Gerosa modelo 4212. Figura 5.8.



Figura 5.7. Cámara húmeda marca ESPEC modelo ESL-3CA.



Figura 5.8. Equipo de distorsión en caliente.

En la determinación de la evolución de gases se empleó una cámara de evolución de gases marca DISA modelo 638-MD2, la cual está conectada a una computadora. Ver Figura 5.9. El análisis de los gases generado por la pirólisis de los corazones se realizó en un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas ambos marca Agilent modelo 6890A y 5973N respectivamente.

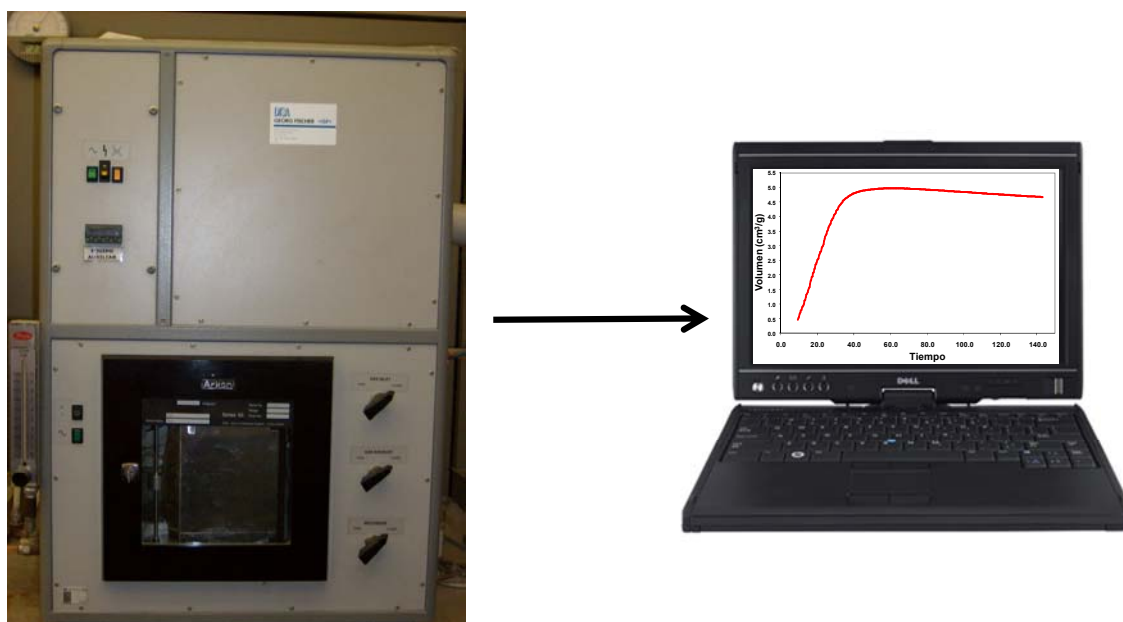


Figura 5.9. Cámara de evolución de gases.

5.5. Método experimental.

Una vez definidos los materiales y equipos mencionados a continuación, se describe a continuación cada una de las técnicas empleadas para evaluar el desempeño de la resina nueva (NB): el análisis termogravimétrico, el contenido de sólidos de las resinas, FTIR, la vida de banco de la mezcla de arena con resina, densidad aparente y fracción de poros de los corazones, el desarrollo de resistencia en ambiente y cámara húmeda, distorsión en caliente, la evolución de gas de los corazones y la cromatografía de gases masas para caracterización de los condensados obtenidos por pirolisis.

5.5.1. Análisis termogravimétrico.

La degradación térmica de las resina se llevó a cabo en un TGA Shimadzu 50, en un rango de temperatura de 25 a 900 °C bajo una atmósfera de argón (Ar) empleado como gas inerte, la velocidad de calentamiento fue de 20 °C/min y se utilizó un crisol de platino con 20 mg de la muestra.

5.5.2. Contenido de sólidos de la resina.

La determinación del contenido de sólidos en la resinas se determinó bajo el procedimiento estándar de la ASTM D1489, el cual consiste en pesar un plato de aluminio en una balanza analítica y registrar el peso exacto del mismo (W1), posteriormente se agregaron 5 gramos de resina al plato de aluminio y se registró el peso de la resina más el plato de aluminio (W2). Después se coloca el plato dentro de una mufla a 150°C por 1 hora, transcurrido este tiempo se retiró el plato de la mufla y se coloca dentro de un desecador para que la muestra se enfríe y no absorba humedad del medio ambiente. Una vez fría la muestra se pesó nuevamente (W3) y se determinó el porcentaje de sólidos en la muestra con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ sólidos} = ((W3-W1)/(W2-W1))*100$$

5.5.3. Espectrofotometría de infrarrojo (FTIR).

Las muestras para espectrofotometría fueron trituradas manualmente en un mortero de cerámica hasta obtener partículas retenidas en malla 100. Posteriormente, las muestras fueron analizadas por espectrofotometría de infrarrojo (FTIR) en un equipo marca Perkin Elmer. Los espectros fueron registrados por 35 escaneos a una resolución de 4 cm^{-1} . Las lecturas espectroscópicas se realizaron a una resolución de 4000 a 600 cm^{-1} .

5.5.4. Vida de banco de la mezcla.

La vida de banco de la mezcla arena resina permite determinar el tiempo de vida útil de la mezcla, es decir, el tiempo durante el cual una mezcla elaborada deberá mantener sus propiedades bajo condiciones de almacenaje, de tal manera que en el momento de ser utilizada para la fabricación de corazones se asegure la resistencia adecuada de los mismos.

La preparación de la mezcla de arena con resina utilizada para la prueba de vida de banco se efectuó de la siguiente manera: primero se pesaron 3 kg de arena sílica nueva y se colocaron dentro del mezclador, enseguida se agregó el contenido de la resina parte 1 previamente pesada y se mezcló por un minuto, transcurrido este tiempo se apagó el mezclador y añadió la resina parte 2 pesada con anterioridad, nuevamente se encendió el mezclador y se dejó trabajar por 1 minuto. Después de haber transcurrido este tiempo la mezcla está lista para ser utilizada en la elaboración de probetas tipo guitarra de acuerdo con el estándar del AFS ^[59,66] (Figura 5.10) en la sopladora.

El valor obtenido del ensayo de resistencia a la tensión de las probetas fabricadas con mezcla fresca (recién elaborada), es llamado resistencia inmediata (Tiempo = 0 hr). Se dejó reposar la mezcla media hora (Tiempo = 0.5 hr) y nuevamente se tomó otra muestra para fabricar las probetas y realizar el ensayo de resistencia a la tensión, el valor obtenido es conocido como vida

de banco a la media hora. Después de transcurrida una hora (Tiempo = 1.0 hr) desde la fabricación de la mezcla se procede a fabricar las probetas y repetir el ensayo de resistencia a la tensión, este último valor es nombrado vida de banco a la hora y debe ser igual o mayor al 0.5516 MPa para garantizar la fabricación de corazones.

En la Tabla 5.6 se muestra el diseño de experimentos realizado para evaluar la vida de banco. La combinación de los dos factores, la resina con cinco niveles (CB, GMB, HB, INO y NB) y el tiempo con tres niveles (0, 0.5 y 1 hora), generó 15 pruebas diferentes. El número de repeticiones por tratamiento fue de 9 y en número total de ensayos de tensión fue de 135.

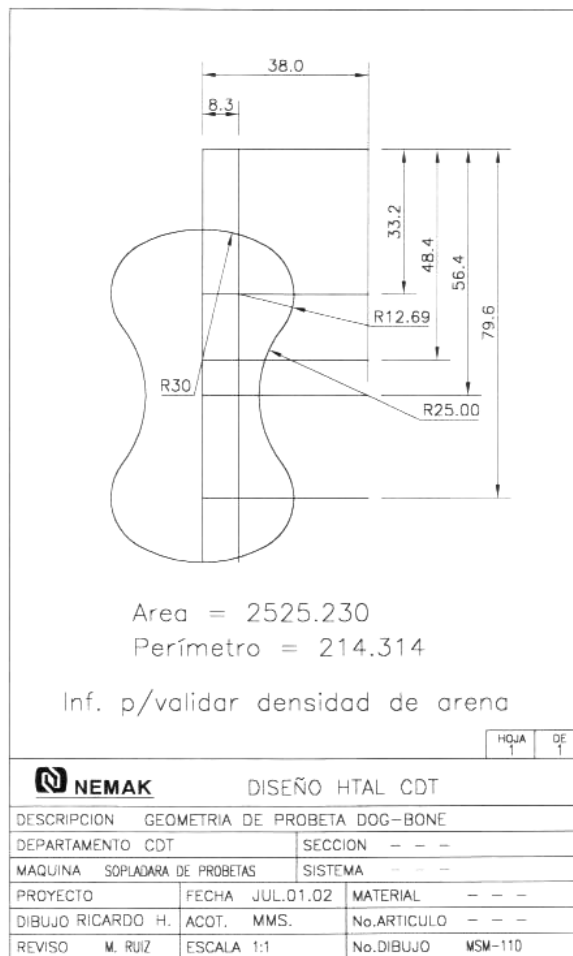


Figura 5.10 Probeta de pruebas tipo guitarra [66].

Tabla 5.6. Diseño de experimentos para la vida de banco.

No. Prueba	Resina	Tiempo (hr)
1	CB	0
2		1
3	GMB	0
4		1
5	HB	0
6		1
7	INO	0
8		1
9	NB	0
10		1

5.5.5. Densidad aparente y fracción de poros de los corazones.

Se elaboraron 18 probetas tipo guitarra con cada una de las resinas de acuerdo con el procedimiento descrito en la vida de banco y se dejaron reposar por espacio de una hora, posteriormente se pesaron en una balanza analítica con una precisión de 0.01mg, el volumen de las probetas fue obtenido mediante modelo matemático fabricado en Autocad. La densidad aparente de las probetas se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Densidad aparente} = (\text{peso de la probeta}) / (\text{volumen de la probeta})$$

La fracción de poros de los corazones se determinó a partir de la densidad teórica de la arena sílica (ρ_{arena}) y la densidad aparente de los corazones ($\rho_{\text{corazón}}$) de la siguiente manera:

$$\text{Fracción de poros} = ((\rho_{\text{arena}} - \rho_{\text{corazón}}) / \rho_{\text{arena}}) * 100$$

5.5.6. Desarrollo de resistencia.

Esta prueba está diseñada para evaluar el desarrollo de resistencia de los corazones después de haber sido fabricados y almacenados en condiciones controladas de humedad y temperatura.

A diferencia de la vida de banco, todas las probetas requeridas en esta prueba son fabricadas con mezcla fresca y se dejan reposar las probetas 0, 1 y 2 horas antes de realizar el ensayo de tensión. En la Tabla 5.7 se muestra el diseño de experimentos para evaluar el desarrollo de resistencia. El número de repeticiones por tratamiento fue de 9 y en número total de ensayos de tensión fue de 135.

Tabla 5.7. Diseño de experimentos para el desarrollo de resistencia.

No. Prueba	Resina	Tiempo (hr)
1	CB	0.0
2		1.0
3		2.0
4	GMB	0.0
5		1.0
6		2.0
7	HB	0.0
8		1.0
9		2.0
10	INO	0.0
11		1.0
12		2.0
13	NB	0.0
14		1.0
15		2.0

5.5.7. Desarrollo de resistencia en cámara húmeda.

De igual manera que la prueba de desarrollo de resistencia todas las probetas se fabricaron inmediatamente después de terminar de mezclar la arena con la resina y se almacenaron por un tiempo de 1 y 2 horas dentro de una cámara a 25°C y 90% de humedad relativa. En la Tabla 5.8 se muestra el diseño de experimentos para evaluar el desarrollo de resistencia de los corazones en cámara húmeda. El número de repeticiones por tratamiento fue de 9 y en número total de ensayos de tensión fue de 135.

Tabla 5.8. Diseño de experimentos para desarrollo de resistencia de los corazones en cámara húmeda.

No. Prueba	Resina	Tiempo (hr)
1	CB	0.0
2		1.0
3		2.0
4	GMB	0.0
5		1.0
6		2.0
7	HB	0.0
8		1.0
9		2.0
10	INO	0.0
11		1.0
12		2.0
13	NB	0.0
14		1.0
15		2.0

Los datos obtenidos de desarrollo de resistencia ambiente y cámara húmeda se agruparon de acuerdo al diseño de experimentos descrito en la Tabla 5.9 para determinar el efecto de la humedad relativa sobre el desarrollo de resistencia de los corazones bajo condiciones de humedad controlada.

Tabla 5.9. Diseño de experimentos para evaluar el efecto de la humedad relativa sobre el desarrollo de resistencia de los corazones.

No. Prueba	Resina	Humedad Relativa (%)	Tiempo (hr)
1	CB	40	1
2			2
3		90	1
4			2
5	GMB	40	1
6			2
7		90	1
8			2
9	HB	40	1
10			2
11		90	1
12			2
13	INO	40	1
14			2
15		90	1
16			2
17	NB	40	1
18			2
19		90	1
20			2

5.5.8. Distorsión en caliente.

La prueba de distorsión en caliente está diseñada para evaluar la expansión y la termoplasticidad de los corazones a alta temperatura. Actualmente esta prueba es ampliamente utilizada en las fundiciones que utilizan moldes o corazones de arena, debido a la gran cantidad de información que genera, la cual es indispensable para resolver problemas dimensionales relacionados con los corazones, erosión y corazón roto ^[59,67]. Esta prueba fue desarrollada por la Asociación Británica de Investigación de Fundición de Hierro en 1966 y es conocida por sus siglas en inglés BCIRA (British Cast Iron Research Association) ^[68].

Para esta prueba requiere probetas tipo barra (Figura 5.11) de acuerdo con el estándar del AFS ^[59] y se soplaron con una mezcla recién fabricada; las probetas se dejaron reposar por espacio de una hora antes de realizar el ensayo de distorsión en caliente, el cual consiste en sujetar por de un extremo una probeta y calentarla en el centro de la cara inferior mediante un quemador de gas (Figura 5.12). La relación gas – aire permaneció constante durante la realización de la prueba y se reguló por medio de un flujómetro para garantizar una entrada de calor de 11 kcal/min. A medida que la probeta va ganando calor la misma va sufriendo una serie de cambios los cuales son registrados por un sensor y plasmados en una gráfica (Figura 5.13) la cual es guardada en la computadora.

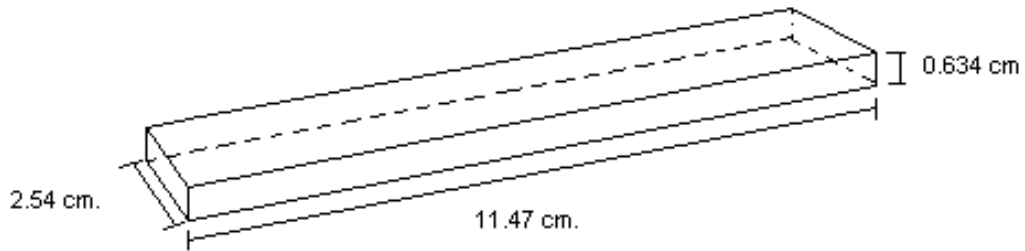


Figura 5.11. Probeta utilizada para la prueba de distorsión en caliente.

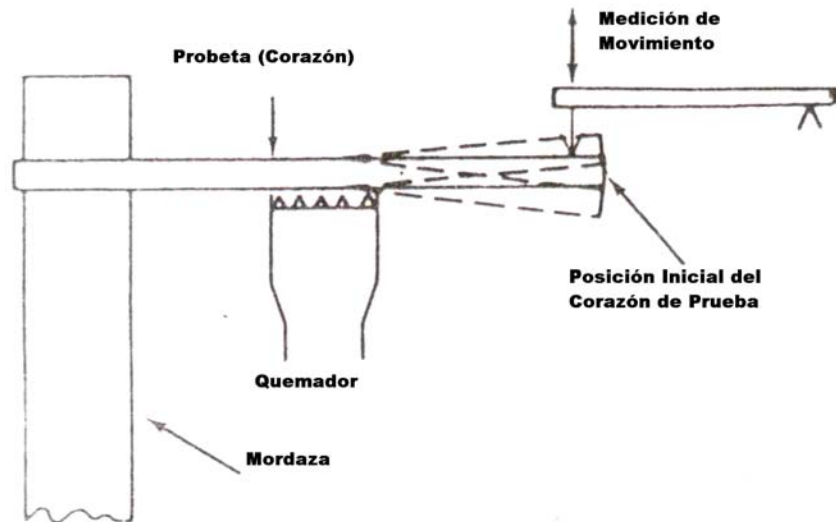


Figura 5.12. Representación esquemática del ensayo de distorsión en caliente.

En esta gráfica se muestran cuatro puntos importantes, cada uno de los cuales representa una propiedad evaluada en la probeta (Figura 5.13). El primer punto representa la dilatación lineal que sufre el corazón, el segundo representa el tiempo en el cual ocurre la dilatación, el tercero representa la plasticidad del corazón y el último equivale al tiempo de la fractura o resistencia en caliente del corazón [34,67,68,69].

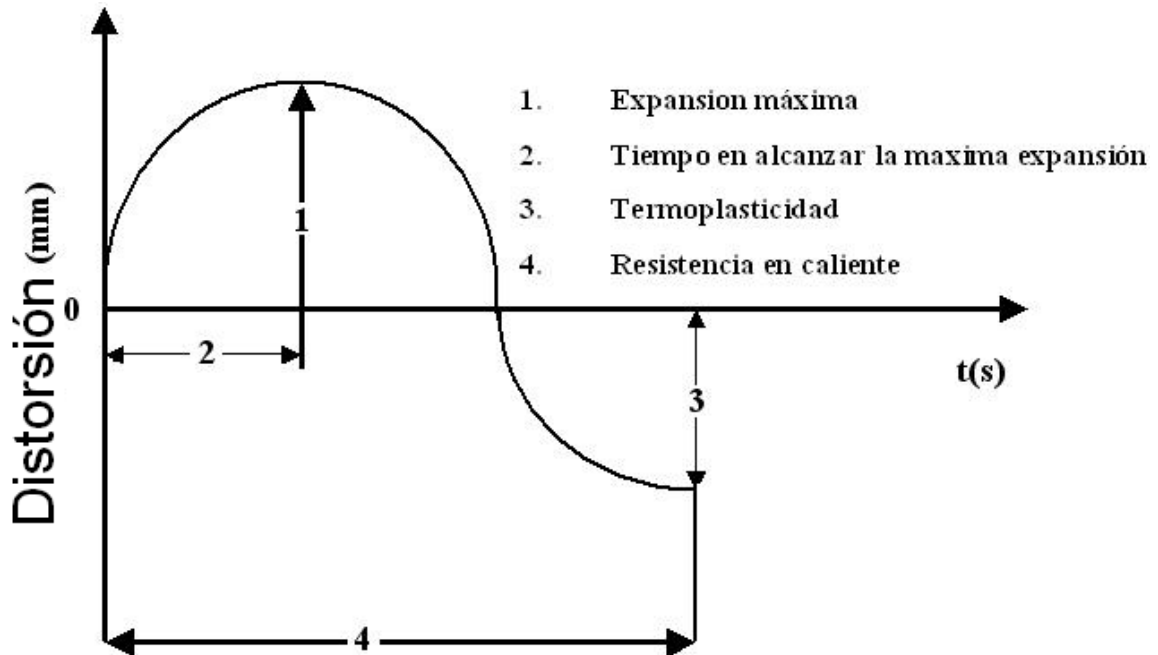


Figura 5.13. Gráfica idealizada del BCIRA.

5.5.9. Evolución de gases.

La prueba de evolución de gases se realizó en un el equipo marca DISA modelo 638-MD2 y consiste en introducir a un horno al vacío y a una temperatura de 850°C una muestra de 1 gramo de corazón. El horno cuenta con un sensor, el cual registra los cambios de presión dentro del mismo, ocasionados por los gases de combustión generados por la resina presente en la muestra corazón y un software el cual determina el volumen de gas en centímetros cúbicos por gramo, a través de un modelo matemático que incluye los cambios de presión registrados dentro del horno.

La cantidad de gas generada por un corazón es un factor muy importante para cuantificar en el momento de evaluar un sistema de resinas, debido a que permite saber la cantidad de gas que generará un corazón al momento de estar en contacto con el metal líquido y al tener diferentes formulaciones en las resinas, esta prueba indicará cual es el sistema de resinas que genera la menor cantidad de gas ^[70].

5.5.10. Cromatografía de gases.

Actualmente existen muchos esfuerzos por reducir las emisiones al aire generadas por la industria de la fundición. En Estados Unidos se creó el programa de reducción de emisiones en fundiciones mejor conocido por sus siglas en inglés CERP (Casting Emission Reduction Program) con el objetivo de ayudar a las fundiciones para cumplir con las normas ambientales y llevar a cabo investigaciones en nuevas tecnologías que puedan ayudar a reducir las emisiones ^[71]. Sin embargo, estas emisiones siguen siendo uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la industria de la fundición ^[72]. Por tal motivo se decidió caracterizar los gases generados por la pirolisis de los corazones e identificar mediante cromatografía de gases masas los compuestos emitidos por las resinas utilizadas en esta investigación.

Para obtener la muestra de gases condensados se preparó un mezcla de arena con resina e inmediatamente se fabricaron las probetas tipo guitarra, las cuales se dejaron reposar por 1 hora. Transcurrido este tiempo se procedió a realizar el ensayo de pirólisis a las probetas en un horno con aluminio líquido a una temperatura de 700 °C para simular el proceso de vaciado de piezas. El gas generado por la resina con la que fueron fabricadas las probetas se capturó en un recipiente con perlas de vidrio, el cual estaba enfriado con una corriente de aire ^[73,74,75]. Figura 5.14.

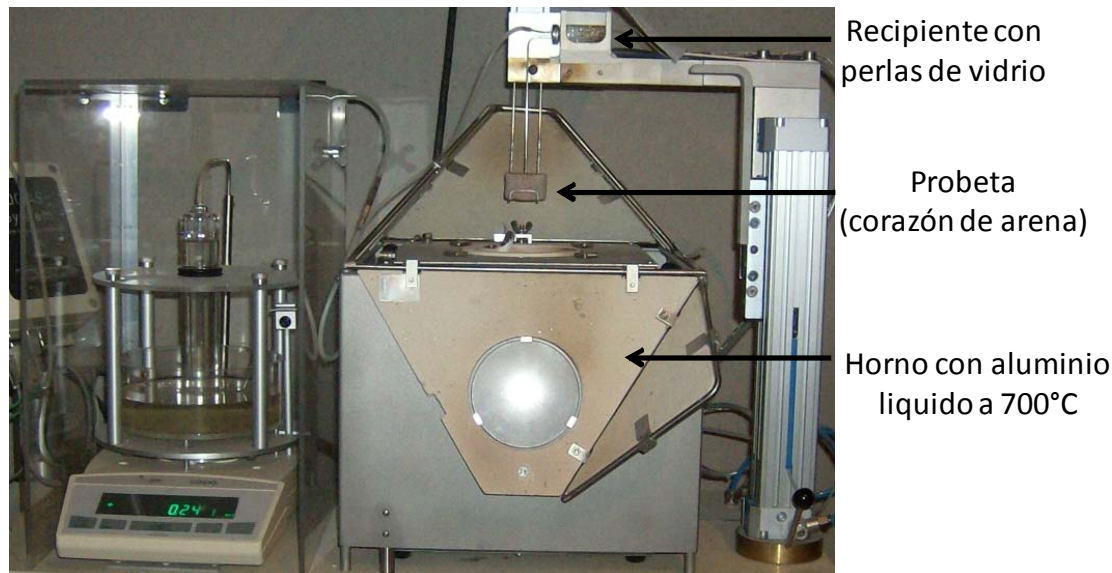


Figura 5.14. Equipo utilizado para realizar la pirolisis y condensar los gases generados por la descomposición térmica de los corazones.

Del recipiente de perlas de vidrio que contenía el condensado de la resina, se extrajo con cloruro de metileno una muestra para el análisis de cromatografía de gases. El ensayo se realizó en un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6890A con una columna capilar HP-5 de 30m x 0.25mm x 0.25 μm , acoplado a un espectrómetro de masas marca Agilent modelo 5973N. La identificación de los compuestos presentes en cada muestra se realizó mediante la combinación del tiempo de retención y la base de datos de espectros de masa.

6. Resultados.

6.1. Introducción.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a las resinas utilizadas en esta investigación, entre ellas el análisis termogravimétrico, el contenido de sólidos, el análisis infrarrojo, los resultados de las pruebas de vida de banco de la mezcla (arena más resina), densidad aparente y fracción de poros, desarrollo de resistencia en ambiente y cámara húmeda, distorsión en caliente, la evolución de gas de los corazones y la cromatografía de gases para caracterización de los condensados.

6.2. Análisis termogravimétrico.

El análisis termogravimétrico (TGA) se empleó para evaluar la estabilidad térmica de las resinas, debido a que el TGA monitorea y registra los cambios de peso que ocurren en las resinas cuando son sometidas a una rampa de calentamiento; esta técnica ha sido ampliamente utilizada para el estudio de polímeros ya que proporciona información relacionada a la descomposición térmica de las resinas.

En la Figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico de la resina de caja fría (CB), caja caliente (HB), inorgánica (INO) y Nematik Binder® (NB). No se analizó la resina GMBOND® debido a que la arena ya estaba recubierta. En el Apéndice A se encuentra las gráficas individuales del análisis termogravimétrico de cada resina así como el análisis de la primera derivada.

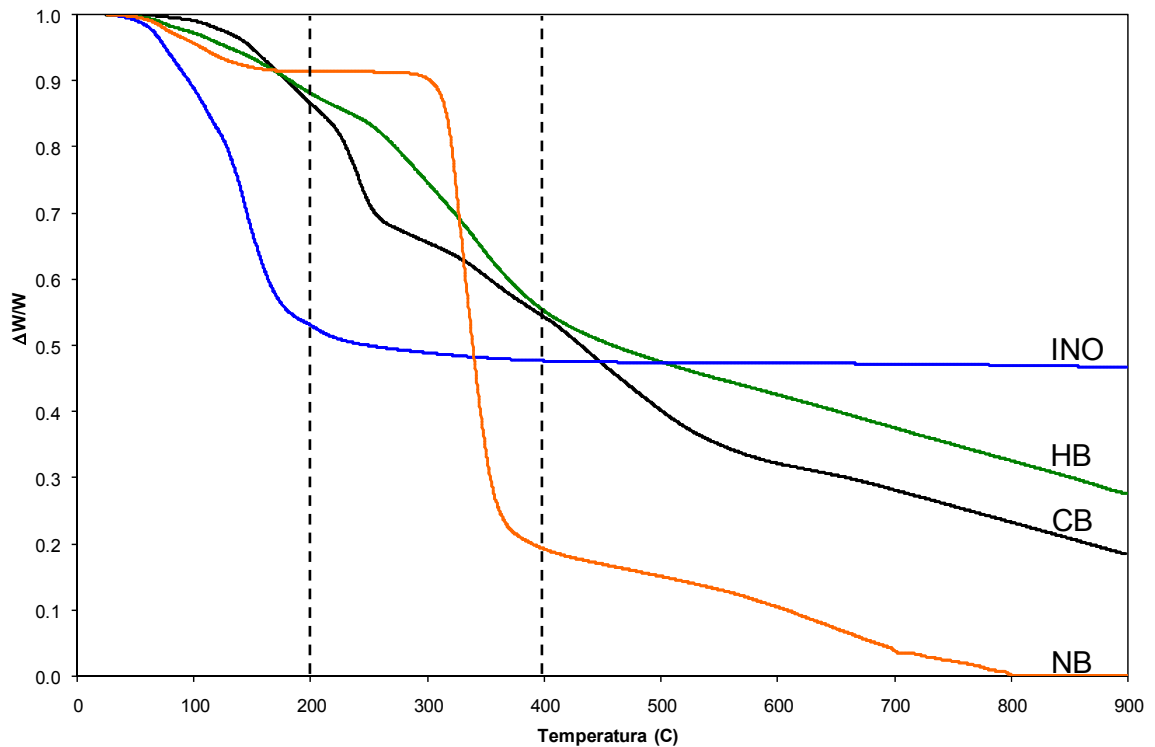


Figura 6.1. Análisis termogravimétrico.

Debido a la composición química de cada resina las curvas obtenidas del TGA son diferentes entre ellas (Figura 6.1). La pérdida de peso que experimentan las resinas en un rango de temperatura inferior a los 200°C corresponde a los solventes y compuestos de bajo peso molecular presentes en la formulación de las resinas CB y HB, para el caso de las resinas INO y NB corresponde la evaporación del agua.

El rango de temperatura de los 200 a 400 °C corresponde a los compuestos de medio peso molecular para las resinas CB, HB y es el rango en el cual ocurre la principal descomposición de la resina NB, ver Tabla 6.1. Las resina de CB y HB pierden el 21.7 y 19.9% respectivamente en un rango de temperatura de los 400 a 900 °C, la resina NB pierde el 15.3% y la resina INO solo pierde el 0.65%.

Tabla 6.1. Pérdida en peso de las resinas (($\Delta W/W$)*100).

Resina	Rango de Temperatura °C			Remanente
	27 - 200	200 - 400	400 - 900	
CB	13.49	46.38	21.77	18.36
HB	11.82	40.58	19.95	27.65
INO	47.21	5.67	0.65	46.47
NB	8.54	76.15	15.31	0

La estabilidad térmica de las resinas se calculó mediante el procedimiento descrito por Doyle ^[76] el cual correlaciona las partes volátiles de la resinas para determinar la estabilidad térmica inherente de los polímeros, conocido por sus siglas en Inglés como IPDT (Integral procedure decomposition temperatura). El IPDT se calculó a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{IPDT (}^\circ\text{C)} = A \cdot K \cdot (T_f - T_i) + T_i$$

$$A = (S_1 + S_2) / (S_1 + S_2 + S_3)$$

$$K = (S_1 + S_2) / S_1$$

Donde A es la relación del área total de la curva experimental definida por el TGA. T_i y T_f son la temperatura inicial y final del TGA respectivamente. En la figura 6.2 se muestra una representación de las áreas S_1 , S_2 y S_3 utilizadas para el cálculo de A y K.

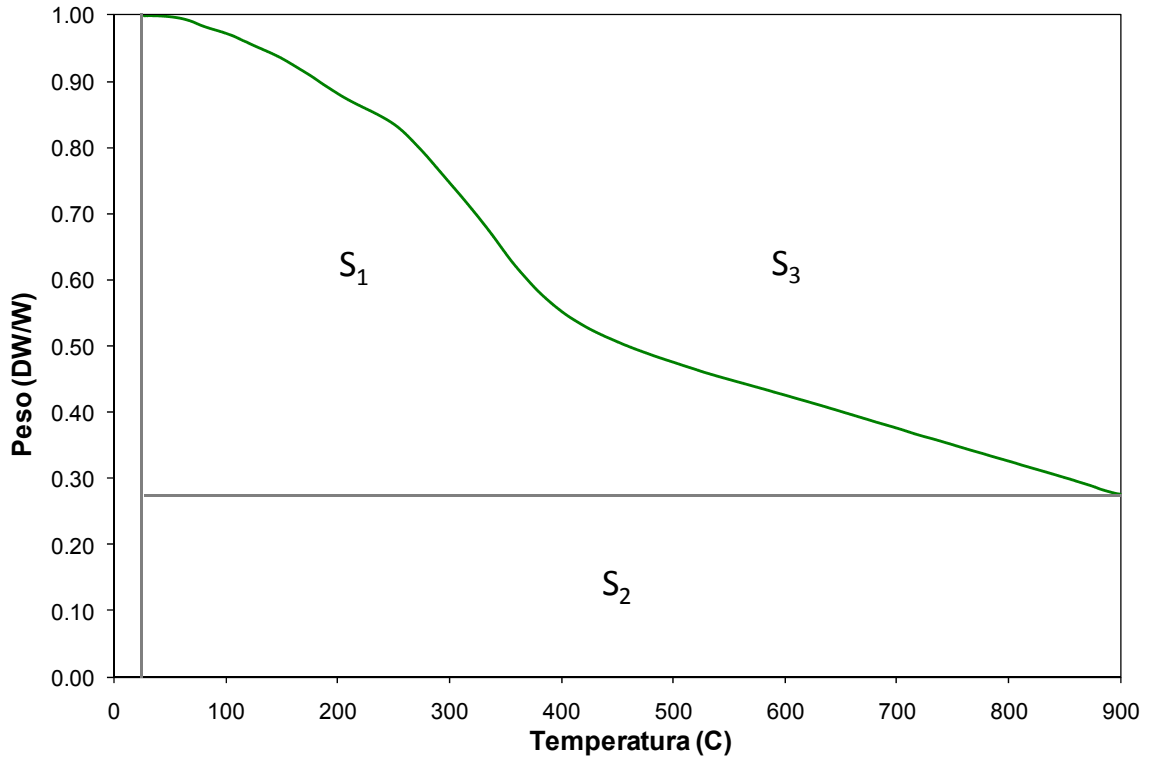


Figura 6.2. Representación esquemática de la curva del TGA.

La resina INO fue la que mayor estabilidad térmica presentó, seguida de las resinas HB y CB, la resina NB presentó la menor estabilidad térmica, ver Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Estabilidad térmica inherente de las resinas.

Resina	IPDT (°C)
CB	734.2
HB	993.4
INO	345.1
NB	367.8

6.3. Contenido de sólidos.

Se analizó el contenido de sólidos de cada una de las resinas utilizadas en esta investigación para determinar la cantidad de solventes y resina presentes en cada muestra, ver Figura 6.3. La resina caja fría (CB) fue la que presentó el mayor contenido de sólidos cuyo valor fue de 64%, seguida de la resina de caja caliente (HB) con valor de 52.4%. Estas dos resinas son base petróleo y el contenido de solventes fueron de 36 y 47.5% respectivamente.

El contenido de sólidos de la resina inorgánica (INO) y Nemak Binder® (NB) fue de 47.6 y 18.7% respectivamente. El análisis estadístico de los datos del contenido de sólidos se encuentra en el Apéndice B.

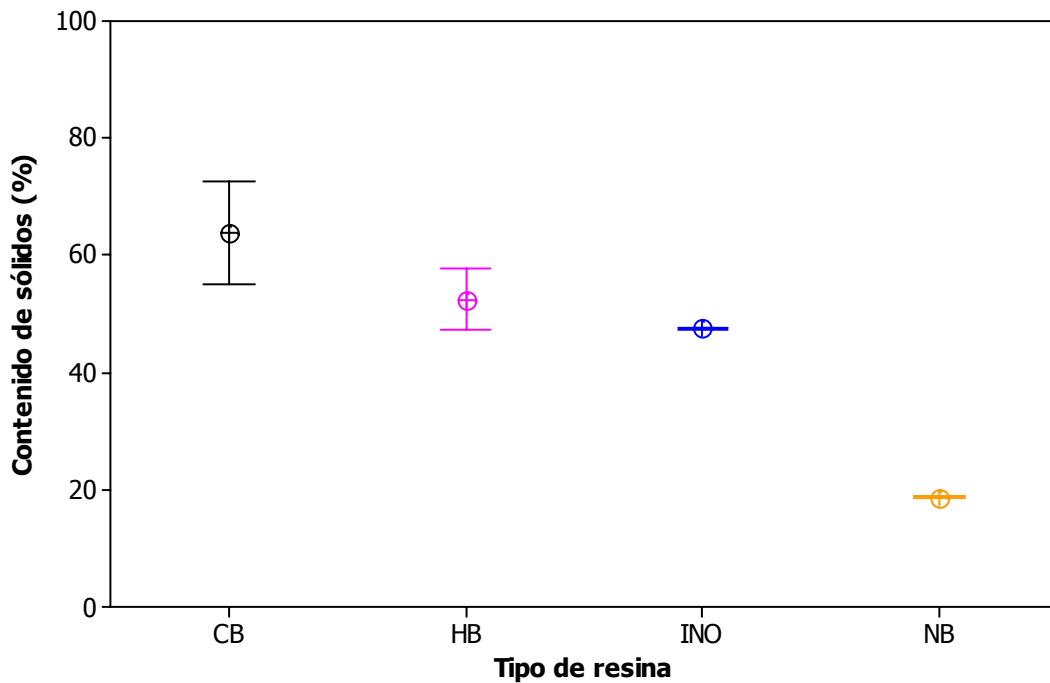


Figura 6.3. Contenido de sólidos.

6.4. Espectrofotometría de infrarrojo.

La espectrofotometría de infrarrojo (FTIR) permite evaluar e identificar los grupos funcionales presentes en las resinas. En la Figura 6.4 se observan los espectros obtenidos del análisis de las muestras de caja fría (CB), GMBOND[®] (GMB), caja caliente (HB), inorgánico (INO) y Nematik Binder[®] (NB). En el Apéndice C se encuentran las gráficas individuales del análisis por espectrofotometría de infrarrojo de cada una de las resinas.

El FTIR de la resina de CB presentó señales de baja intensidad a 3500 cm^{-1} y 2300 cm^{-1} correspondiente a los grupos OH^- y NCO^- respectivamente, presentes en el poliuretano ^[77]. También se observó una señal de mayor intensidad en la región de 1750 cm^{-1} correspondiente a los grupos amino del enlace uretano ^[78]. Las señales de 1000 , 800 y 750 cm^{-1} corresponden al fenol ^[77] y el pico de 1770 cm^{-1} representa al formaldehído ^[79]. La muestra de GMB analizada presentó una señal de alta intensidad a 1250 cm^{-1} , la cual es característica del dióxido de silicio ^[80], debido a que era una muestra de arena recubierta, sin embargo, el resto del perfil espectroscópico sugiere la presencia de una mezcla de proteínas y compuestos derivados de furfural. La proteína se observa en la región de $1650 - 1700\text{ cm}^{-1}$ caracterizada por la presencia de grupos carboxílicos ^[81].

El FTIR de la resina HB presentó una señal de mediana intensidad a 3250 cm^{-1} característica de los grupos NH ^[78,79]; la región de 1680 cm^{-1} es característica de urea ^[79]. Las señales de 1000 , 800 y 750 cm^{-1} corresponden al fenol ^[77], y el pico de 1770 cm^{-1} representa al formaldehído ^[79]. En la muestra de INO se observó un pico en la región de 1100 cm^{-1} el cual es representativo de los silicatos ^[80]. La muestra NB muestra un perfil espectroscópico característico de un polisacárido. La región de $1200 - 800\text{ cm}^{-1}$ es característica de los carbohidratos ^[81]. La presencia de grupos OH^- se encuentran en la zona de $3000 - 3500\text{ cm}^{-1}$ ^[77].

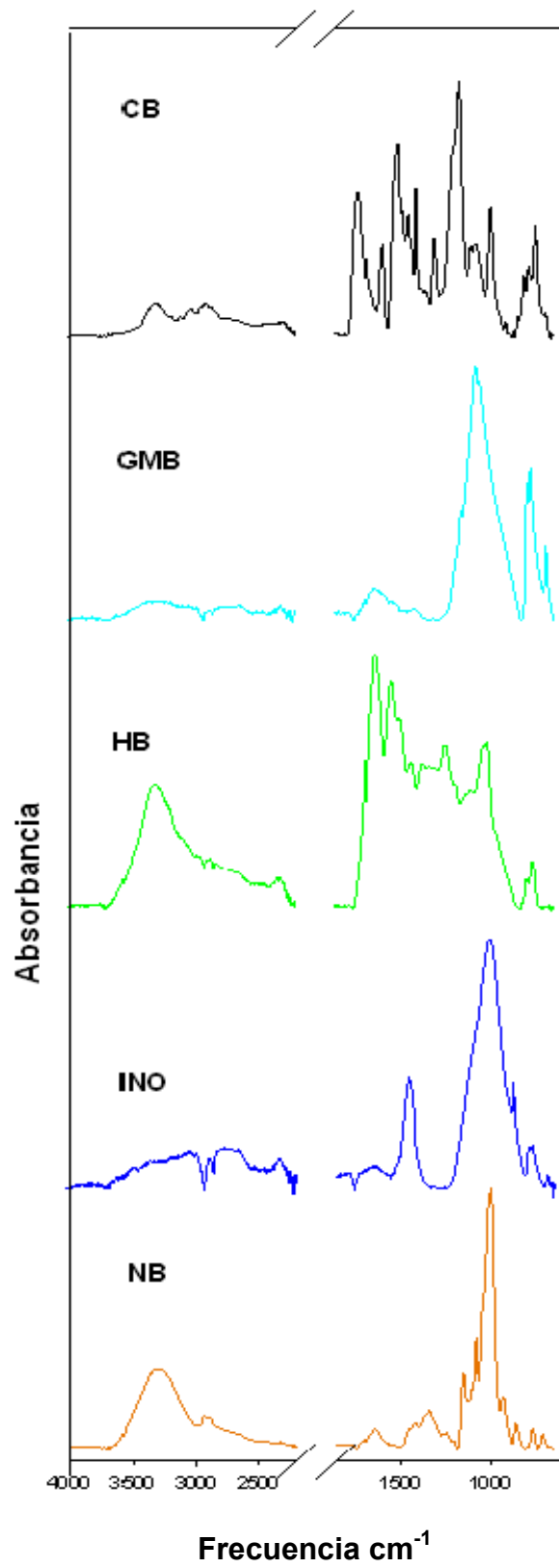


Figura 6.4. Espectrofotometría de infrarrojo (FTIR).

6.5. Vida de banco de mezcla.

La vida de banco de la mezcla arena mas resina representa el tiempo de vida útil de la mezcla, es decir, el tiempo durante el cual una mezcla elaborada deberá de mantener sus propiedades bajo condiciones de almacenaje, de tal manera que en el momento de ser utilizada se asegure la resistencia de los corazones.

Los resultados obtenidos de la vida de banco, de cada una de las mezclas de arena mas resina (caja fría (CB), GMBOND[®] (GMB), caja caliente (HB), inorgánica (INO) y Nemak Binder[®] (NB)) se reportan en la Figura 6.5. Cada punto en esta gráfica es el promedio de 9 ensayos de tensión. La resistencia mínima que debe obtener una probeta tipo guitarra es de 0.55 MPa (80 PSI) para garantizar el manejo de los corazones al momento de ser fabricados ^[34,66].

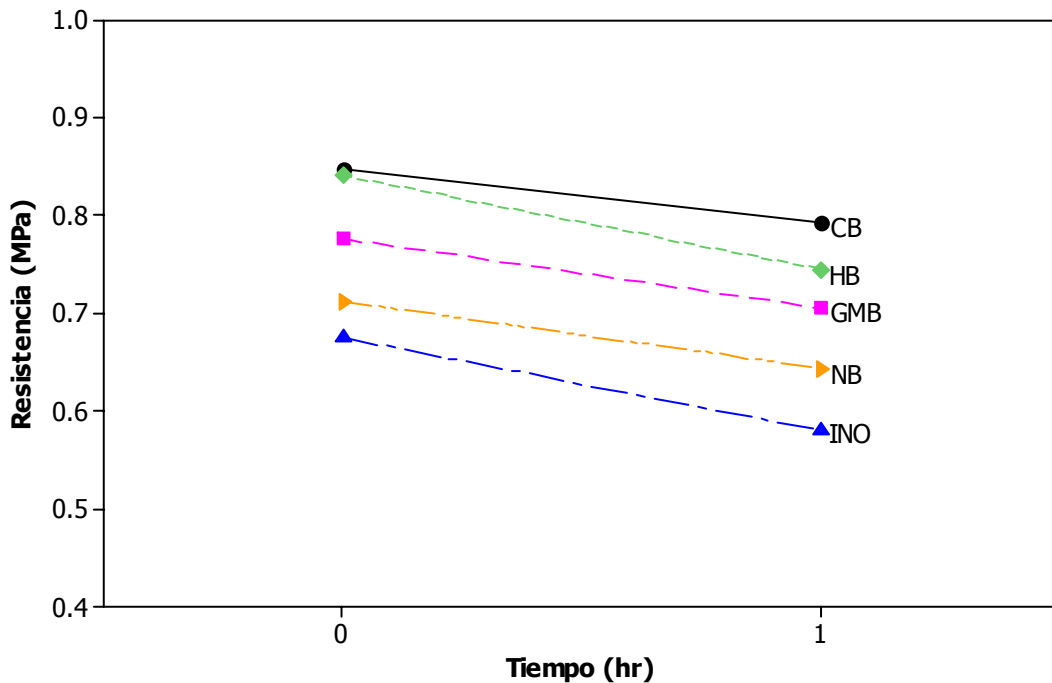


Figura 6.5. Vida de banco de las mezclas de arena y resina.

De acuerdo con diseño de experimentos propuesto para la vida de banco (Tabla 5.6) y el análisis estadístico (Apéndice D) de los datos mostrados en la Figura 6.4, existe una diferencia significativa, con respecto al tiempo y al tipo de resina utilizada. Esto es congruente con lo que se observa en la Figura 6.5 y se demuestra que todas, independientemente del tipo de resina con la cual las mezclas fueron fabricadas, se degradan en función de tiempo. Por lo tanto la resistencia inmediata será mayor con respecto a una mezcla almacenada (vida de banco a 1 hora).

En la Figura 6.6 se muestran los resultados de la resistencia inmediata de las 5 resinas utilizadas. El análisis estadístico (Apéndice D) demuestra que los valores de resistencia inmediata obtenidos con la resina Nemark Binder® (NB) son estadísticamente similares a los valores conseguidos con la resina GMBOND® (GMB) e inorgánica (INO). La resistencia inmediata promedio alcanzada con la resina NB es 15 y 16% inferior los valores obtenidos con la resina de caja caliente (HB) y caja fría (CB) respectivamente, sin embargo, ésta es 29% superior a la especificación mínima requerida para fabricar corazones.

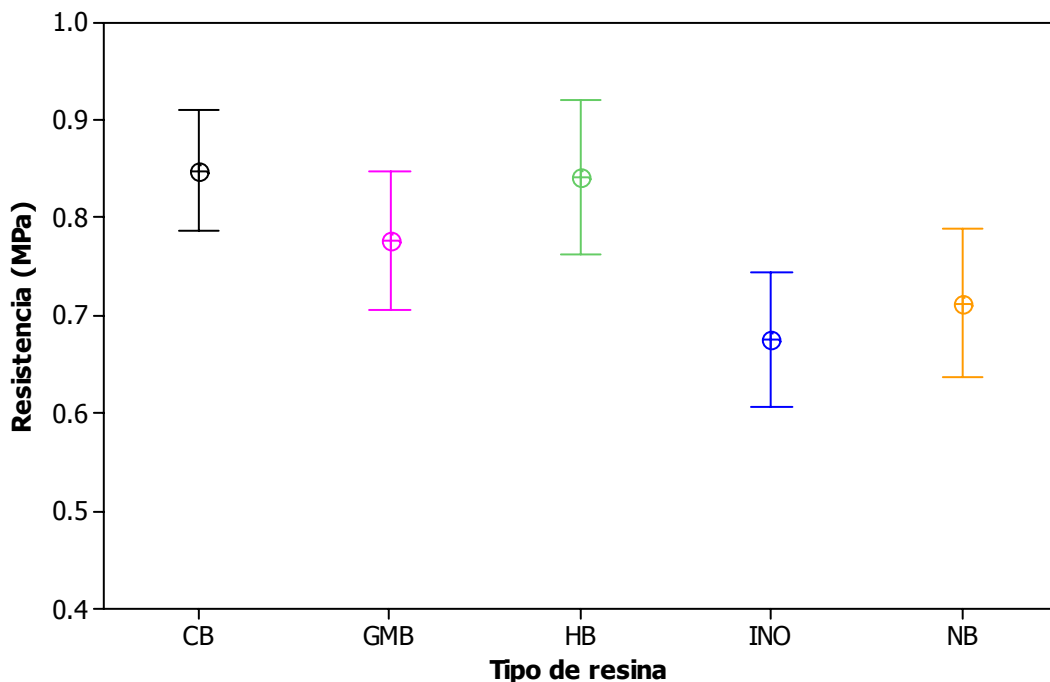


Figura 6.6. Resistencia inmediata.

La Figura 6.7 contiene los resultados obtenidos de la vida de banco a 1 hora y el análisis estadístico (Apéndice D) demuestra que las resina NemaK Binder® (NB) GMBOND® (GMB) e inorgánica (INO) son estadísticamente similares. El promedio obtenido de la vida de banco con la resina NB es 13 y 18% inferior los valores alcanzados con la resina de caja caliente (HB) y caja fría (CB) respectivamente, sin embargo, ésta es 16% superior a la especificación mínima requerida para fabricar corazones.

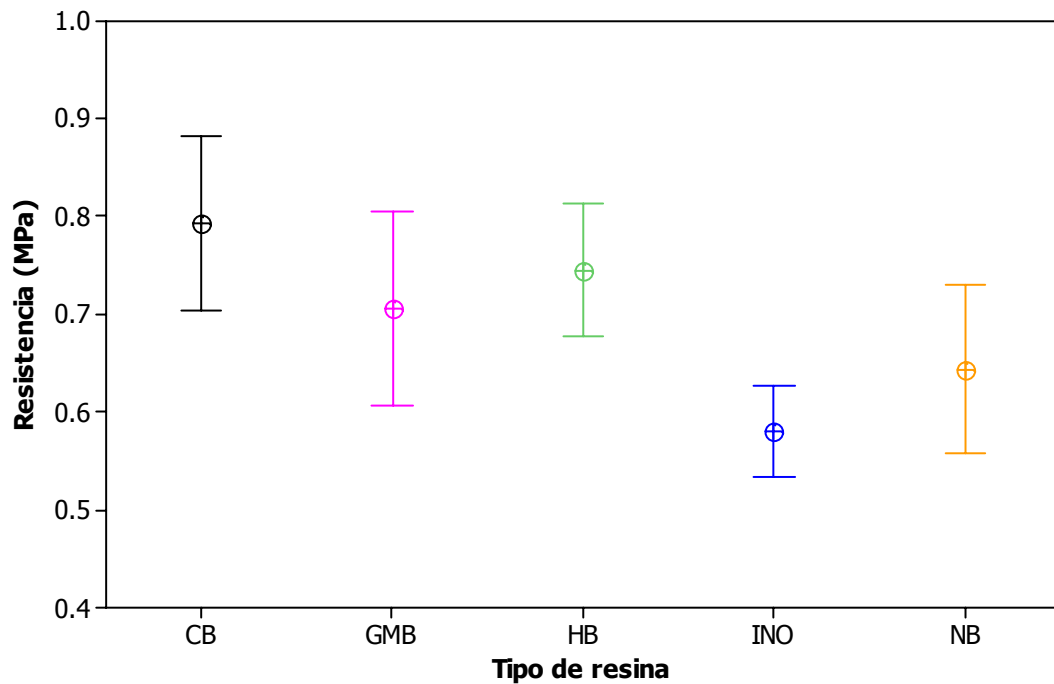


Figura 6.7. Vida de banco a 1 hora.

6.6. Densidad aparente y fracción de poros de los corazones.

La densidad aparente de los corazones fabricados con cada una de las resinas se reporta en la Figura 6.8. Las probetas fabricadas con la resina CB presentaron la mayor densidad aparente cuyo valor fue de 1.61 g/cm³ seguidas de las probetas elaboradas con la resina GMB y HB, cuyos valores fueron 1.57 y 1.53 g/cm³ respectivamente. La densidad aparente que presentaron los corazones fabricados con la resina INO y NB fueron 1.48 y 1.46 g/cm³

respectivamente. El análisis estadístico de densidad aparente se encuentra en el Apéndice E. Cabe mencionar que la densidad aparente de los corazones fabricados con la resina NB sólo es 1.3% inferior a la obtenida con los corazones elaborados con la resina INO y 9% con respecto a los corazones de CB.

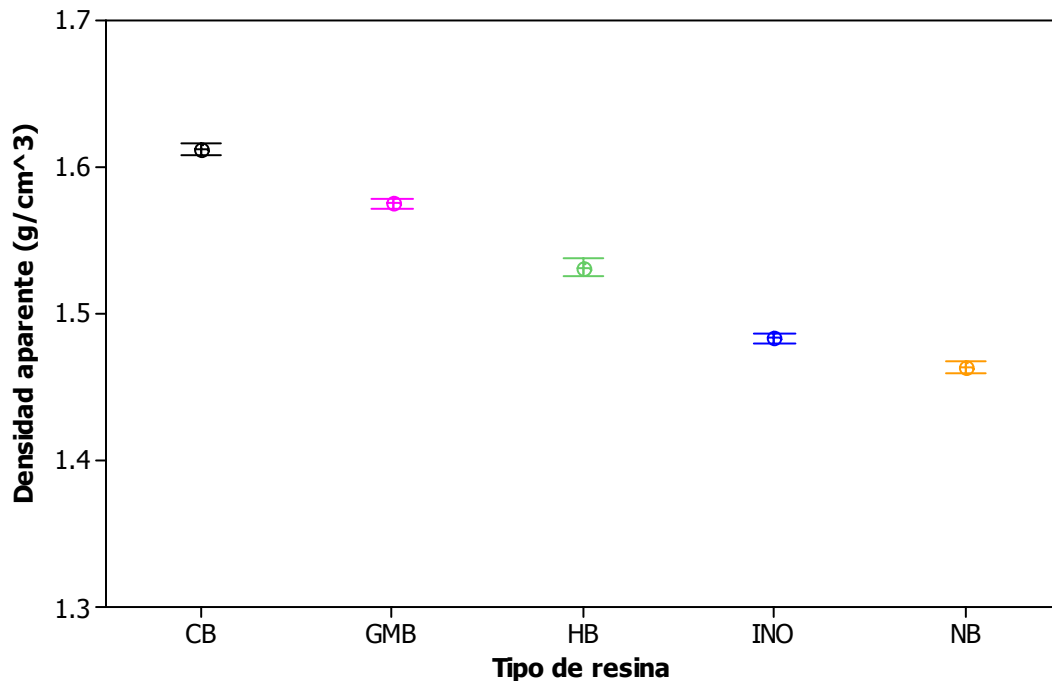


Figura 6.8. Densidad aparente de los corazones.

La fracción de poros de los corazones fabricados con los 5 tipos de resinas se muestra en la Figura 6.9. El análisis estadístico (Apéndice F) de los datos reportados en la Figura 6.9 establece que existe una diferencia significativa con respecto al tipo de resina utilizada. Los corazones elaborados con la resina NB tienen una fracción de poros 14% mayor que los fabricados con la resina CB y 1.7% con relación a la resina INO.

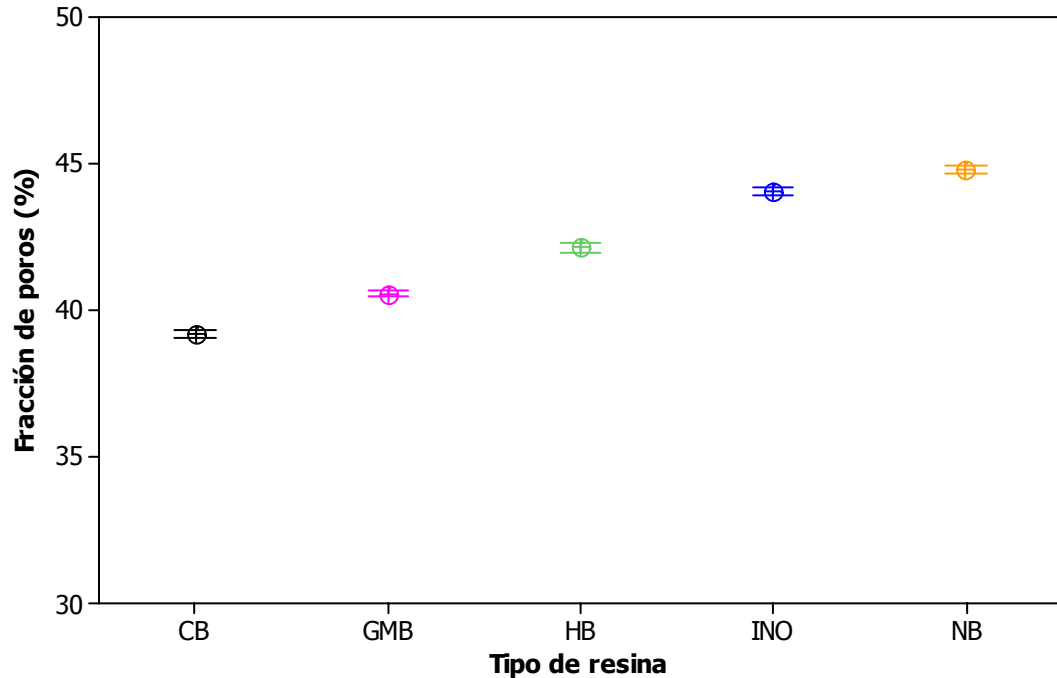


Figura 6.9. Fracción de poros de los corazones.

6.7. Desarrollo de resistencia de los corazones.

El desarrollo de resistencia de los corazones es una prueba que se realiza para evaluar el comportamiento de los mismos en función del tiempo después de haber sido fabricados (Figura 6.10). Todos los corazones presentan el mismo comportamiento, una baja resistencia inmediata para un tiempo igual a cero horas, independientemente del tipo de resina con la cual fueron fabricados y un incremento de su resistencia a 1 y 2 horas de almacenaje. El análisis estadístico (Apéndice G) del desarrollo de resistencia de los corazones determinó que existe una diferencia significativa con respecto al tipo de resina utilizada para elaborar los corazones y el tiempo de almacenaje de los mismos.

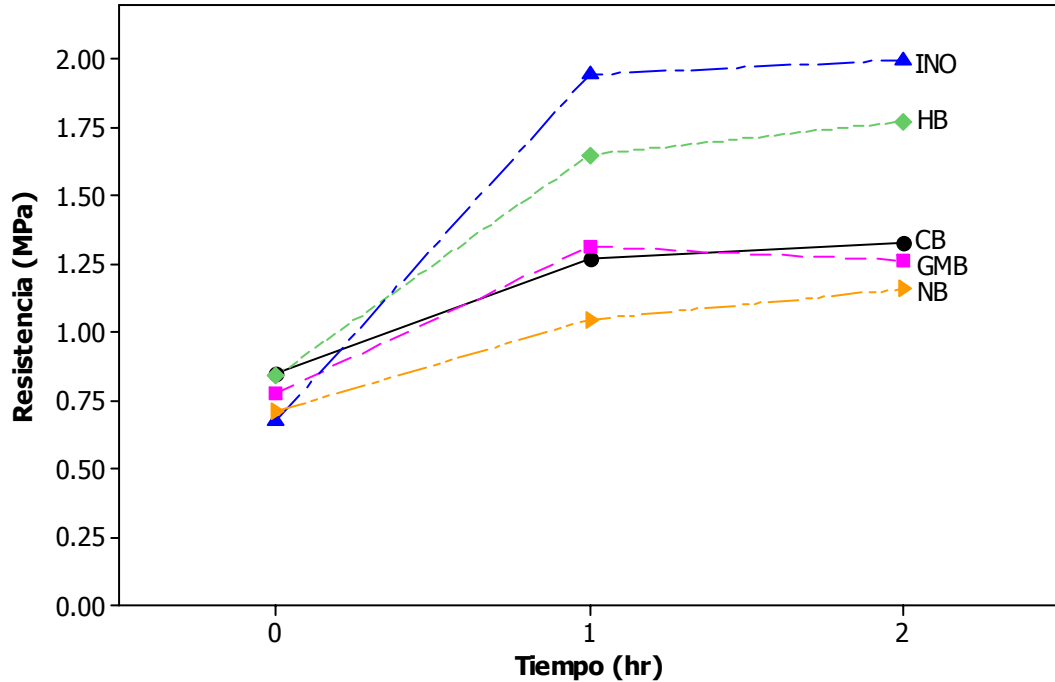


Figura 6.10. Desarrollo de resistencia de los corazones.

En la figura 6.11 se muestra la dispersión de los datos del desarrollo de resistencia a una hora. Los corazones preparados con la resina NB desarrollaron una resistencia 89.9% superior en relación a la especificación mínima requerida para fabricar corazones y 17% menor con respecto a la resistencia desarrollada por los corazones elaborados con la resina CB.

El desarrollo de resistencia de los corazones a 2 horas se muestra en la figura 6.12. El análisis estadístico (Apéndice G) de los datos, demuestra que el desarrollo de resistencia alcanzada de los corazones fabricados con la resina NB es estadísticamente similar de los corazones preparados con GMB, estos valores son 110% superiores con respecto a la especificación mínima requerida para fabricar corazones y 13% inferior con relación al desarrollo de resistencia de los corazones de caja fría CB.

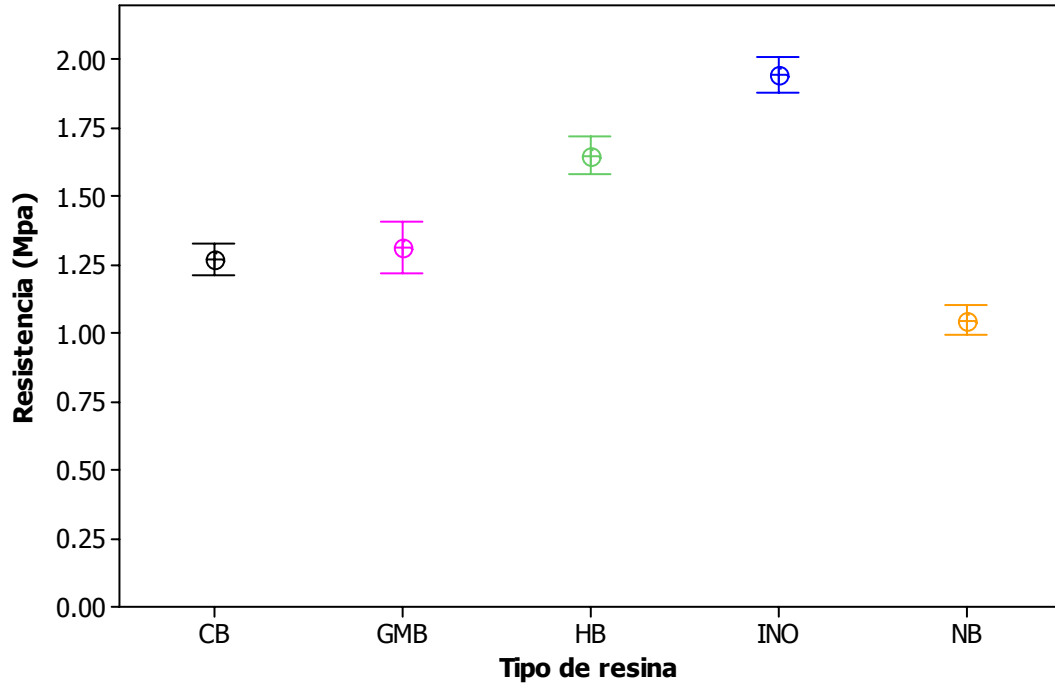


Figura 6.11. Desarrollo de resistencia a 1 hora.

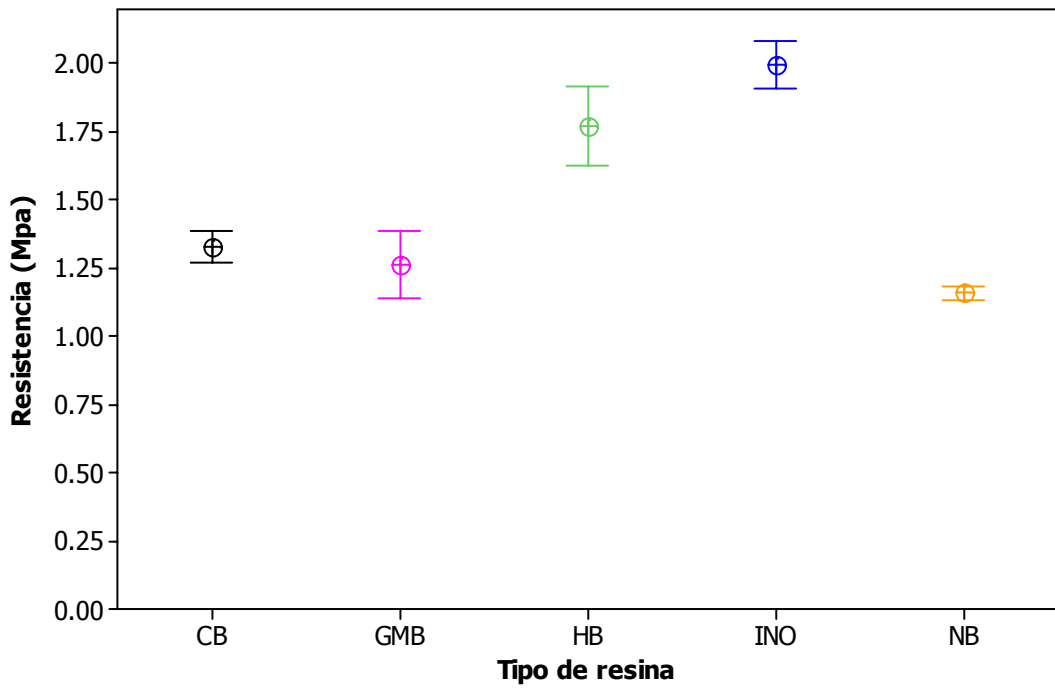


Figura 6.12. Desarrollo de resistencia a 2 horas.

6.8. Desarrollo de resistencia de los corazones en la cámara húmeda.

El desarrollo de resistencia de los corazones en cámara húmeda se realiza para evaluar el efecto de la humedad sobre las propiedades mecánicas de los corazones en condiciones extremas de almacenaje (90% de humedad relativa).

En la Figura 6.13 se muestra el comportamiento del desarrollo de resistencia de los corazones, después de haber sido almacenados en la cámara húmeda por espacio de 1 y 2 horas. El análisis estadístico (Apéndice H) confirma que existe diferencia significativa en relación al tipo de resina utilizada para la fabricación de los corazones y al tiempo de almacenaje de los mismos en la cámara. Todos los corazones, independientemente del tipo de resina con la cual se elaboraron, tienen una disminución significativa del desarrollo de resistencia a 2 horas en cámara húmeda con respecto a la resistencia inmediata.

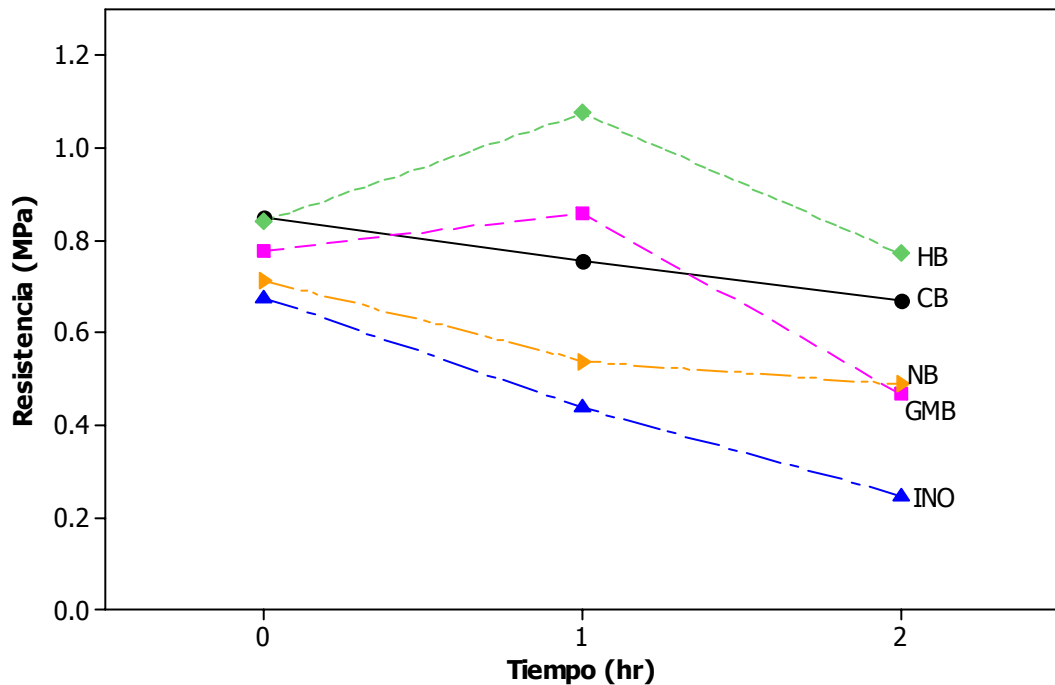


Figura 6.13. Desarrollo de resistencia en cámara húmeda.

El análisis (Apéndice H) de los datos mostrados en la Figura 6.14 demuestra que el desarrollo de resistencia a una hora en cámara húmeda en los corazones preparados con la resina NB es estadísticamente igual a la de los fabricados con INO y 28.6% menor con respecto a la resistencia promedio desarrollada por los corazones elaborados con la resina CB.

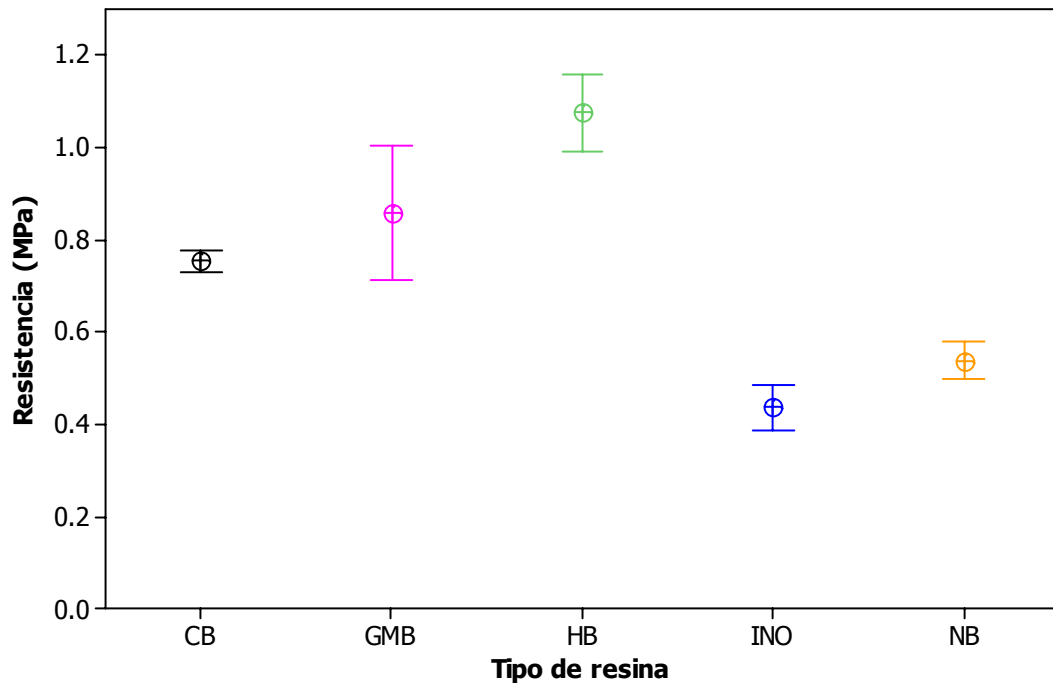


Figura 6.14 Desarrollo de resistencia a 1 hora en cámara húmeda.

De acuerdo con el análisis (Apéndice H) de desarrollo de resistencia en cámara húmeda a 2 horas y de los datos mostrado en la figura 6.15, se establece que corazones fabricados con la resina NB son estadísticamente iguales a los preparados con GMB y son 97.8% superiores en relación al desarrollo de resistencia promedio de los corazones elaborados con resina INO y 27.2% inferior con respecto al desarrollo de resistencia de los corazones de caja fría CB.

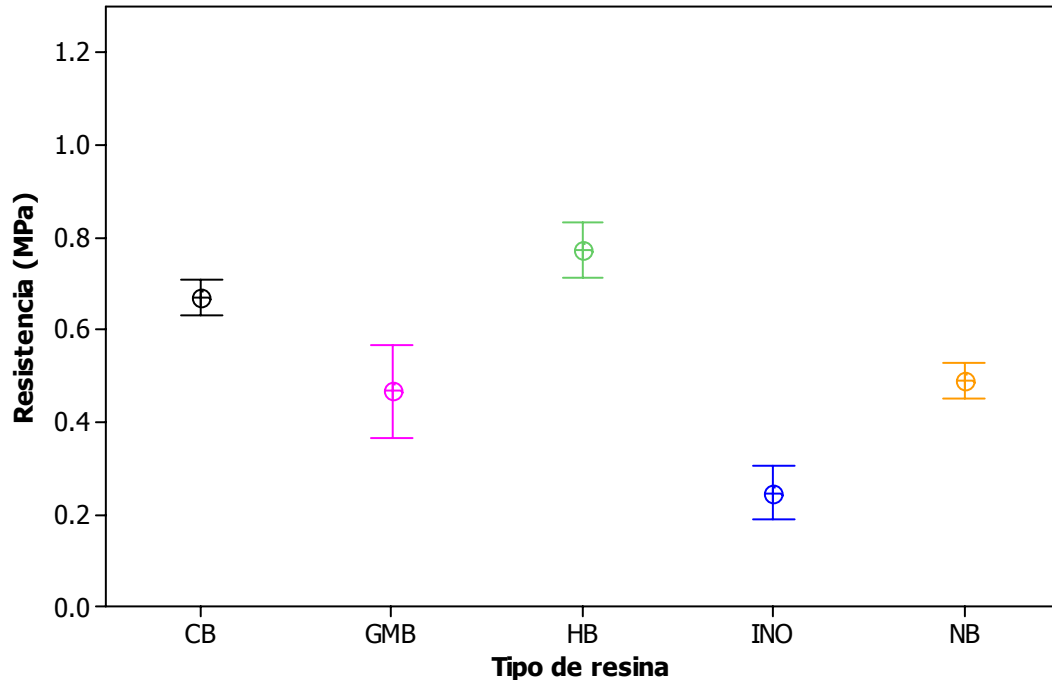


Figura 6.15. Desarrollo de resistencia a 2 horas en cámara húmeda.

El desarrollo de resistencia de los corazones a una hora se ve fuertemente afectado por el incremento de la humedad relativa (Figura 6.16) sin importar el tipo de resinas que se haya utilizado para su fabricación.

Los corazones de GMB y HB almacenados en la cámara húmeda, solamente desarrollan el 65% de la resistencia alcanzada en condiciones controladas del laboratorio. Para el caso de los corazones preparados con la resina CB y NB el desarrollo de resistencia en cámara húmeda fue del 59 y 51% respectivamente, con relación a los almacenados en 40% de humedad. Los corazones más afectados por la humedad fueron los fabricados con la resina INO que sólo alcanzaron el 22% de la resistencia con respecto a los corazones almacenados en el laboratorio.

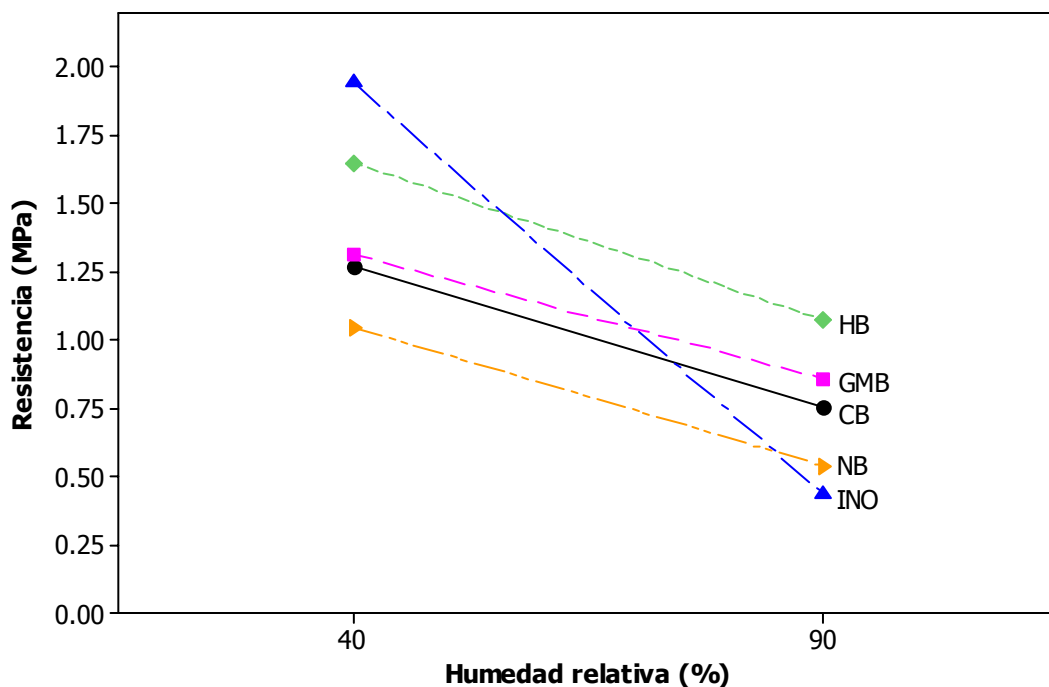


Figura 6.16. Efecto de la humedad relativa sobre el desarrollo de resistencia a una hora.

El desarrollo de resistencia de los corazones a dos horas se vio más afectado por el aumento de la humedad relativa, ver Figura 6.17. Los corazones de CB desarrollaron sólo el 50% de la resistencia en relación de los corazones almacenados en el laboratorio.

Los corazones de HB y NB desarrollaron 43 y 42% respectivamente de la resistencia obtenida por los corazones almacenados bajo condiciones de 40% de humedad relativa. Los corazones de GBM sólo desarrollan el 36% de la resistencia de sus similares almacenados en el laboratorio. Los corazones más afectados por la humedad fueron los INO que solamente alcanzaron el 12% de la resistencia obtenida en condiciones de baja humedad.

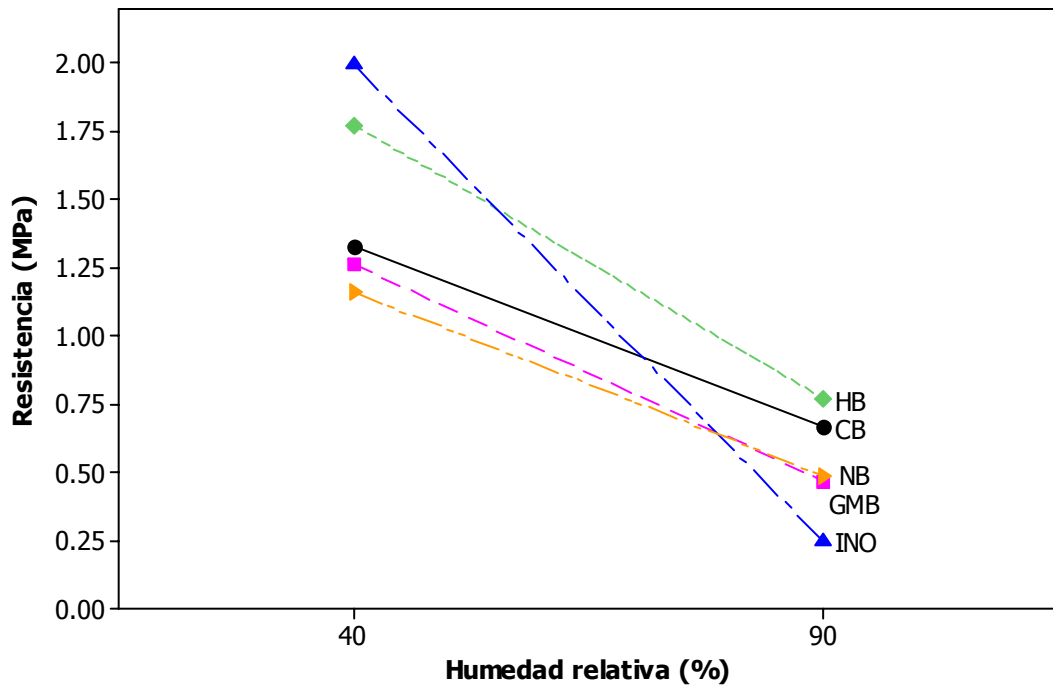


Figura 6.17. Efecto de la humedad relativa sobre el desarrollo de resistencia dos horas.

6.9. Distorsión en caliente.

Se selecciona una curva de distorsión de cada tipo de resina utilizada en esta investigación para comparar esta propiedad (Figura 6.18). En el Apéndice I se encuentran las gráficas individuales de la distorsión en caliente de cada una de las resinas.

Como se puede observar en la figura 6.18 cada resina tiene un comportamiento diferente, por tal motivo se decidió analizar por separado los datos de distorsión máxima (Figura 5.19), el tiempo al cual ocurre la distorsión máxima (Figura 6.20) y el tiempo total a la fractura (Figura 6.21) para determinar el efecto de cada una de las resinas sobre estas propiedades.

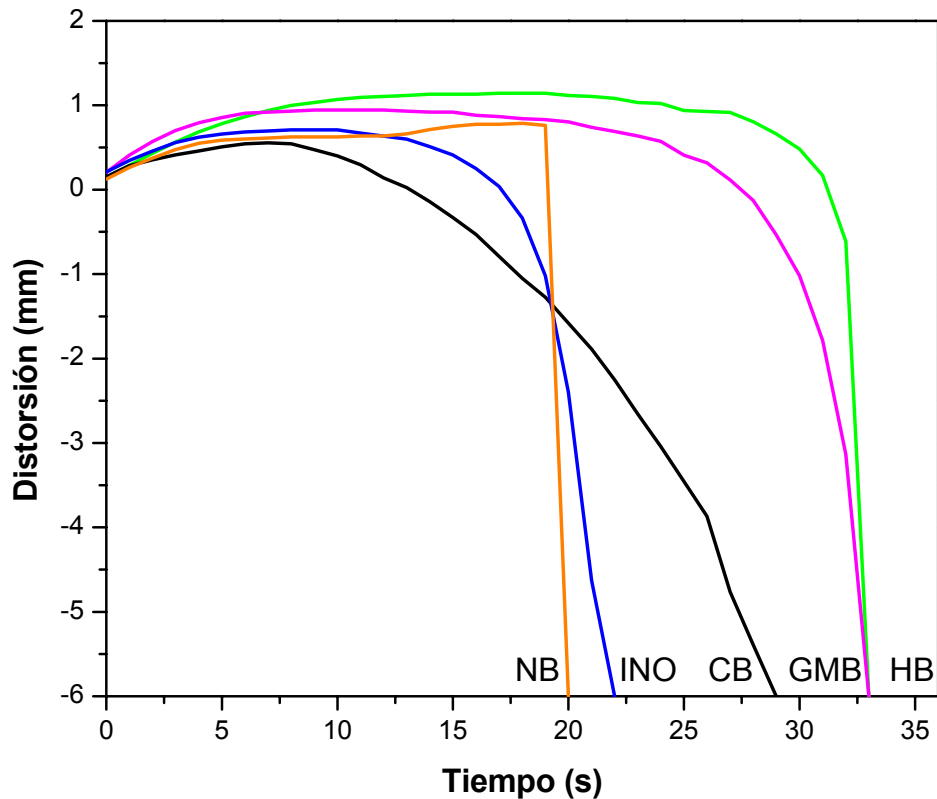


Figura 6.18. Distorsión en caliente.

De acuerdo con el análisis estadístico de los datos, los corazones que presentaron la mayor distorsión fueron los fabricados con la resina HB cuyo valor promedio fue de 1.1322 mm, los corazones que menos se distorsionaron fueron los elaborados con CB, los corazones preparados con la resina NB presentaron un distorsión máxima de 0.8394 lo que representa un 25% menor que la distorsión con respecto a los corazones fabricados con HB, ver figura 6.19.

El tiempo al cual ocurre la distorsión máxima de los corazones elaborados con la resina HB y NB, es estadísticamente mismo, ver Figura 6.20. Los corazones de CB son los que se distorsionan más rápidamente en 7.6 segundos, seguidos de los INO y GMB que alcanzan la distorsión máxima en 8.3 y 9.0 segundos.

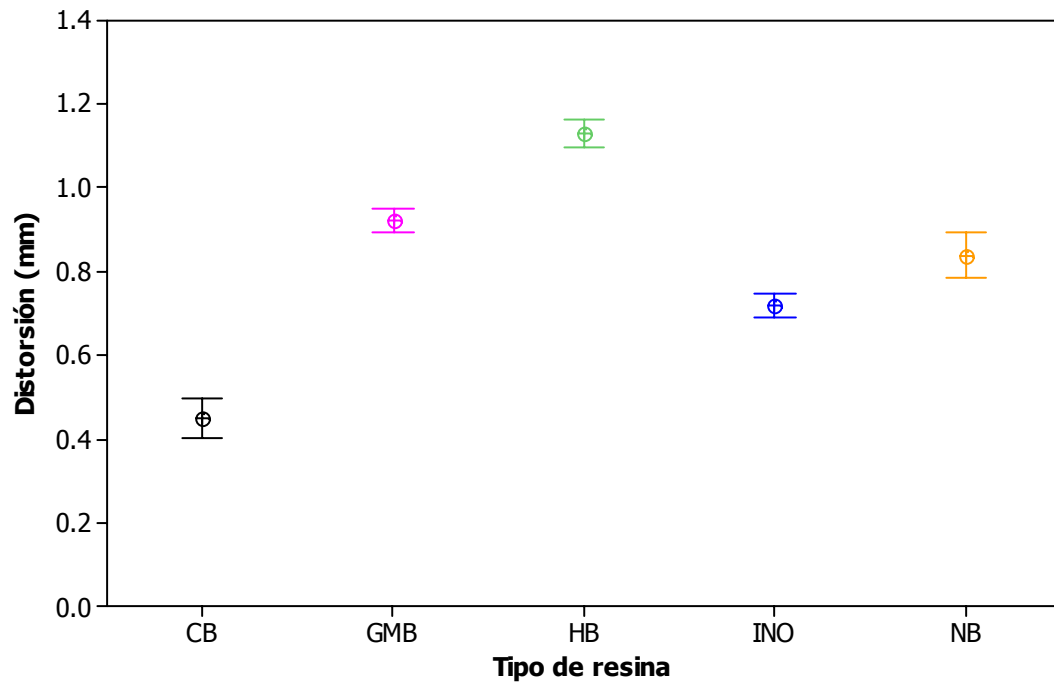


Figura 6.19. Distorsión máxima.

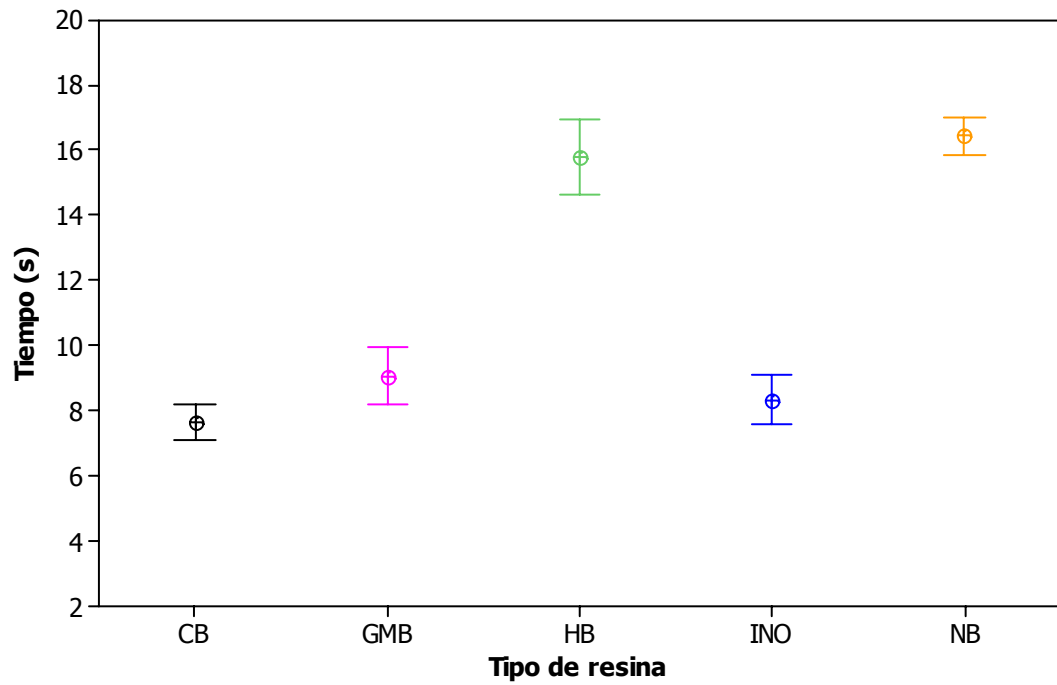


Figura 6.20. Tiempo en el cual ocurre la distorsión máxima.

Los corazones fabricados con NB e INO resisten el mismo tiempo total hasta la fractura (Figura 6.21). Su valor promedio fue de 19.5 segundos, inferior al de los corazones de CB cuyo valor promedio fue de 26.8 segundos. Los corazones que resistieron por más tiempo hasta la fractura fueron los preparados con la resina GMB.

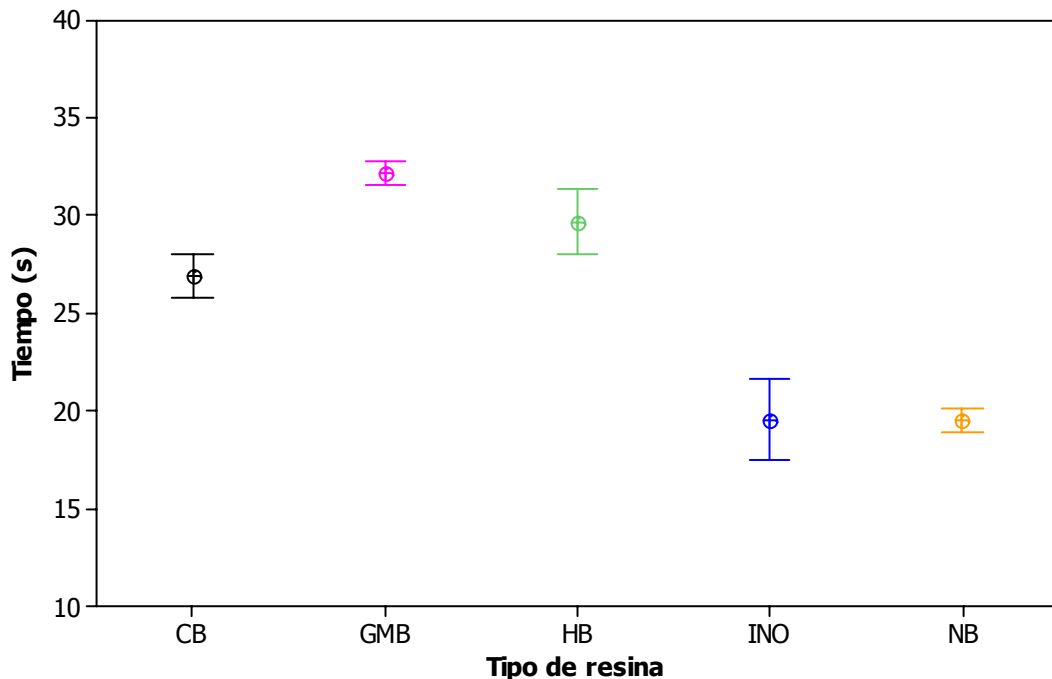


Figura 6.21. Tiempo total en el cual ocurre la fractura.

6.10. Evolución de gases.

En la Figura 6.22 se muestran los resultados de la evolución de gases de los corazones elaborados con las resinas CB, GMB, HB, INO y NB. En el Apéndice J se encuentran los resultados individuales de la evolución de gases para cada resina. Las resinas que presentaron la mayor evolución de gases fueron la GMB y NB cuyo valor promedio fue de 5.67 y 5.43 cm^3/g respectivamente, las resinas CB y HB presentaron una evolución de gases de 4.21 y 4.10 cm^3/g respectivamente, la resina que menor cantidad de gases generó fue la INO con 1.16 cm^3/g , ver Figuras 6.22 y 6.23.

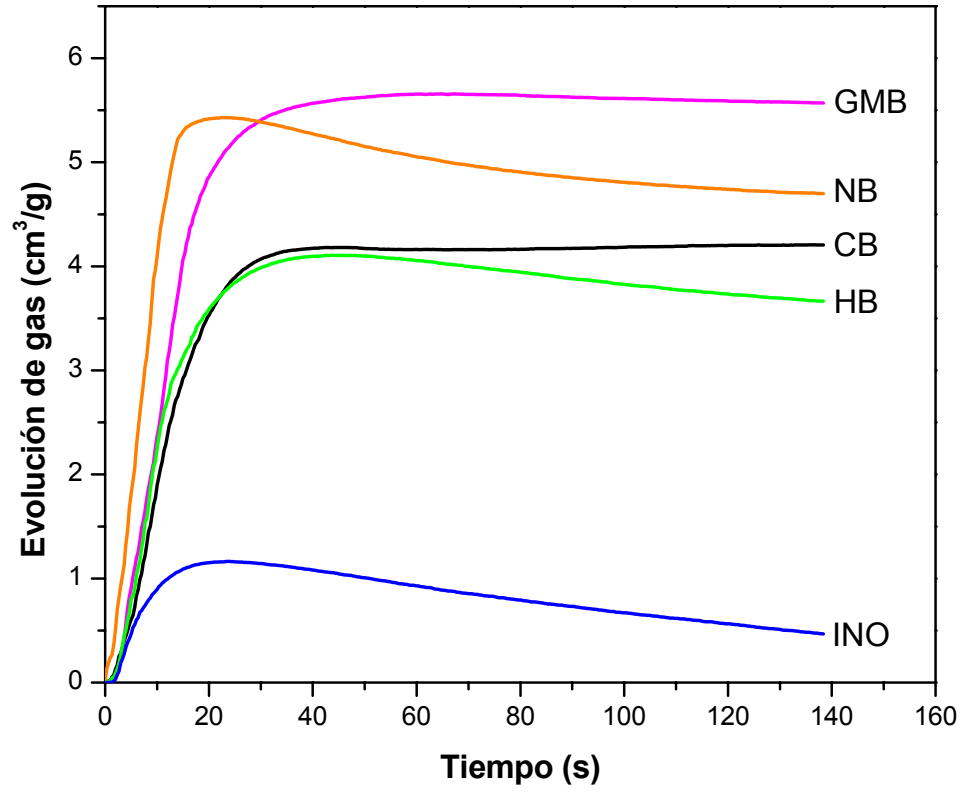


Figura 6.22. Evolución de gas.

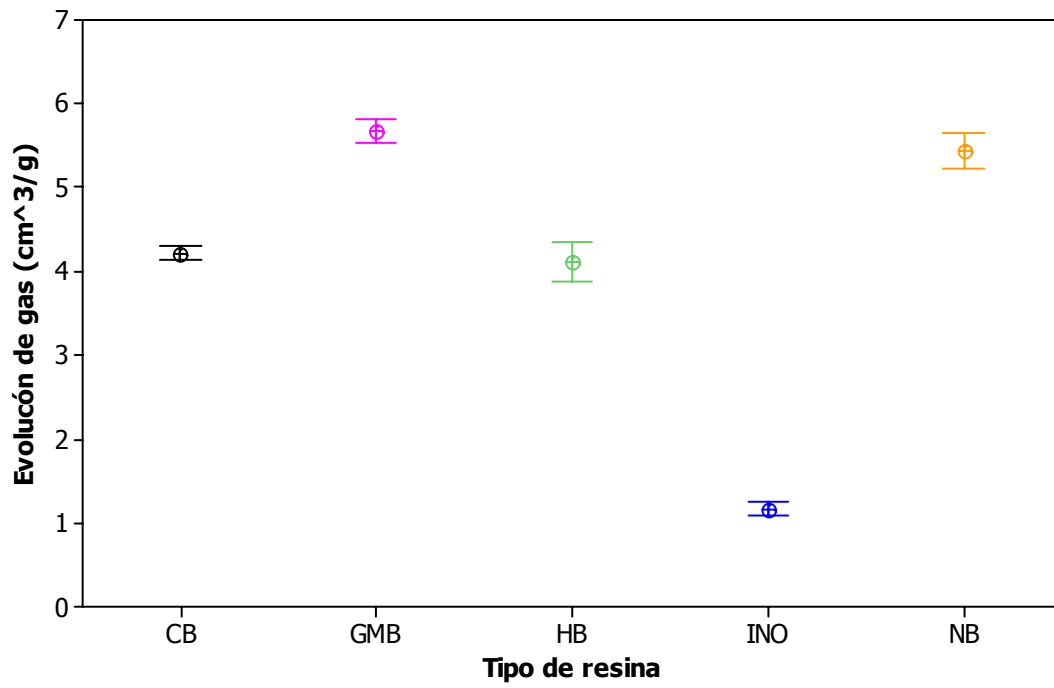


Figura 6.23. Máxima evolución de gas.

El análisis estadístico de la máxima evolución de gases (Figura 6.23 y Apéndice J), establece que estadísticamente las resinas GMB y NB generan la misma cantidad de gas, de igual manera las resina CB y HB son estadísticamente similares.

La razón de evolución de gases (derivada de la evolución de gas con respecto al tiempo) se reporta en la Figura 6.24. La resina NB es la que mayor razón de evolución de gas tiene $0.44 \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$ a 6.3 s, seguida de la resina GMB con $0.32 \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$ en 11.3 s, la resina de HB tiene un valor de $0.28 \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$ en 7.6 s, la resina de CB obtuvo $0.24 \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$ en 9 s, la resina INO fue la que presentó la menor razón de evolución de gas en el menor tiempo $0.10 \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$ en 5.3 s.

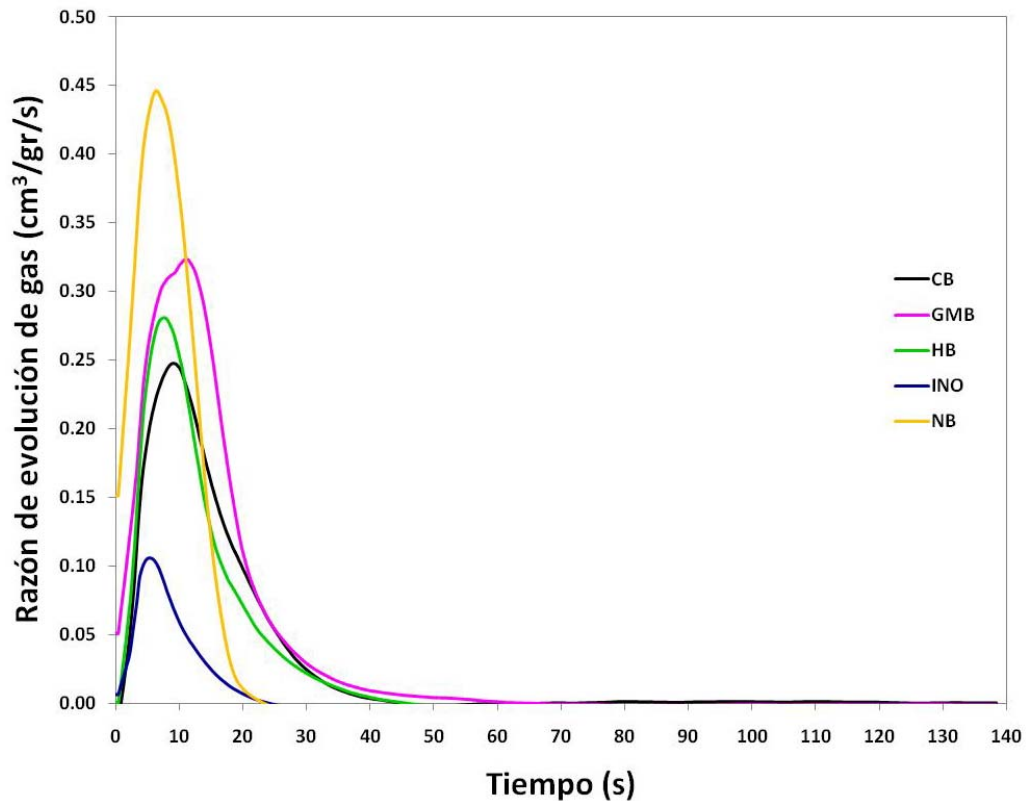


Figura 6.24. Razón de evolución de gas.

6.11. Cromatografía de gases.

La pirólisis combinada con la cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas es una técnica utilizada para la caracterización de polímeros y el análisis de la termo-degradación de los mismos. La temperatura del vaciado de piezas de aluminio se encuentra en el rango de 700 a 750°C, la cual depende específicamente del tipo de aleación utilizada. La resina contenida en los corazones que están en contacto con el metal líquido durante el proceso de vaciado se descompondrá generando gases debido a la pirólisis. La cantidad y variedad de compuestos químicos generados dependerá principalmente del tipo de resina y la cantidad de ésta utilizada para la fabricación de los corazones.

El objetivo de esta prueba fue identificar los compuestos generados por la pirolisis de las resinas CB, GMB, HB, INO y NB en condiciones de laboratorio y reproducir el fenómeno que sucede en el momento del vaciado. Los compuestos se identificaron mediante el tiempo de retención de los mismos en el cromatografo de gases. Ver Tabla 6.3. El Apéndice K contiene los cromatogramas individuales de la pirólisis de cada una de las resinas.

De acuerdo con el análisis de la cromatografía de gases-masas del condesando de las resinas (Tabla 6.3), se establece que la resina de caja fría (CB) es la que genera una mayor cantidad de compuestos en el momento de vaciado, se identificaron 47 compuestos presentes en los gases generados por la pirólisis resina de CB, entre de los compuestos identificados están presentes tolueno, xileno, trimetilbenceno, etildimetilbenceno, fenol, cresol y naftaleno por mencionar algunos de ellos. Estos compuestos son considerados como contaminantes peligrosos del aire, conocidos por su siglas en Inglés como HAPs (Hazardous Air Pollutants).

En los condensados de las resinas de caja caliente HB y GMBOND[®] GMB se identificaron 24 y 23 compuestos respectivamente, entre los cuales se encuentran el alcohol furfurílico, fenol, cresol, piridina, dimetilpiridina, pirrol, isoquinoleina, benzopirrol.

En los condensados de la resina NB sólo se identificaron 14 compuestos lo que representa una disminución 70% de los compuestos generados por la resina de caja fría CB. Sin embargo también estuvieron presentes compuestos como el fenol, cresol, furfural y alcohol furfurílico. La resina inorgánica fue la que menor cantidad de compuestos generó en la pirólisis, sólo se identificaron 3 compuestos fenol, n-octanol y n-dodecanol, lo que representa 93% menos de compuestos generados con respecto a la resina de caja fría CB.

Tabla 6.3. Compuestos identificados mediante cromatografía de gases-masas.

CB	HB	GMB	NB	INO
Tolueno	Alcohol furfurilico	Piridina	Acido propanoico	Fenol
2-Etil-1-henano	Tetrahydro-2-furanmetanol	1H-Pirrol	3-Hidroxi-2-butanona	n-Octanol
m-Xileno	2,5-Dimetilpiridina	4-Metilpiridina	1-Hidroxi-2-butanona	n-Dodecanol
Anilina	3,5-Dimetilpiridina	2-Metilpirrol	Furfural	
Fenol	Fenol	2-Metilpiridina	Alcohol furfurilico	
1,3,5-Trimetilbenceno	o-Cresol	Fenol	2-Metil-2-ciclopentanona	
1,2,3-Trimetilbenceno	p-Cresol	2-Aminopiridina	2-Acetilfurano	
3-n-Propiltolueno	5-Ciano-2-metilpiridina	4-Etil-2-metil-pirrol	gama-Butilrolacetona	
o-Cresol	3-Piridinmetanol	o-Cresol	5-Metil-2-furfural	
p-aminotolueno	6-Metil-3-piridina	2-Pirrolmetilcetona	Fenol	
p-Cresol	1,4-dimetil-2(1H)-Piridina	2-Cianopiridina	3-Metil-ciclopentanodiona	
p-Isopropiltolueno	Pirrol-[1,2-a]pirazina	Pentanodinitrilo	o-Cresol	
2,6-Dimetilfenol	3-metil-pirrol-[2,3-b]pirazina	p-Cresol	p-Cresol	
1,2,3,5-Tetrametilbenceno	Isoquinoleina	Benzil-acetil-nitrilo	5-hidroximetil-2-furaldeido	
1,2,4,5-Tetrametilbenceno	2,2'-metilenebis[5-metil-furan]	1H-Pirrol-3-carbonitrilo		
Dimetilglutarato	1,6-Naftiridina	3,4-Dimetilmaleimida		
2,4-Dimetilfenol	2,3-Benzopirrol	Piperidinona		
1-Etil-3,5-dimetilbenceno	1-hidroximetil-5,5-dimetilimidazolidina	2,3-Benzopirrol		
2,4-Xilidina	5-Aminoindan-1-one	1H-Pirrol-2-carbonitrilo		
2-Etil-1,3-dimetilbenceno	4-Metilquinoleina	2-Acetilpirrol		
Naftaleno	Triptamina	2-Metilindol		
Pentametilbenceno	2-Metil-1,6-Naftaridina	Quinolona		
Dimetiladipato	2,5-Dimetilindole	Subereno		
Pentametilbenceno	2,6-Dimetil-1,8-Naftaridina			
2-Metilnaftaleno				
1-Metilnaftaleno				
3,3-Dimetilciclobutanona				
2-Etilnaftaleno				
1-Tetradeceno				
2,6-Dimetilnaftaleno				
2,3-Dimetilnaftaleno				
1,5-Dimetilnaftaleno				
2,3-Dimetilnaftaleno				
1,2-Dimetilnaftaleno				
4-Metilbifenil				
2-Isopropilnaftaleno				
1,6,7-Trimetilnaftaleno				
1,4,5-Trimetilnaftaleno				
2,2'-Dimetilbifenil				
1,6,7-Trimetilnaftaleno				
1,4,6-Trimetilnaftaleno				
4,4'-Dimetilbifenil				
4,4'-Dimetilbifenilmetano				
Acridina				
9-Metilacridina				
4,4'-Difenilmetanodiamina				
Di(2-etilhexil)adipato				

7. Discusión de los Resultados.

Las curvas del TGA de las resinas presentan diferentes fases de descomposición (pérdidas en peso) las cuales varían en magnitud y temperatura para cada una de ellas, ver Apéndice A. Los TGA son distintos para cada tipo de resina, debido a que las resinas tienen formulaciones diferentes, las cuales se describieron en el Capítulo 4 de esta Tesis, específicamente en las Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5. La diferencia química de las resinas donde se comprueba, además, por el método analítico FTIR, ver Figura 6.3. En el caso de las resinas CB y HB estas descomposiciones corresponden de menor a mayor temperatura, a solventes, compuestos de bajo y alto peso molecular, característicos de los polímeros.

En base al análisis de la cromatografía de gases, los compuestos de bajo peso molecular identificados en los gases generados por la pirólisis de la resina CB fueron tolueno, xileno, fenol, cresol, trimetilbenceno, etildimetilbenceno, todos estos con un punto de ebullición inferior a 200°C, los cuales representan el 13.49% de la pérdida en peso reportada en el TGA de la resina CB. Los compuestos de medio peso molecular con punto de ebullición entre los 200 y 400°C encontrados fueron el naftaleno, dimetilnaftaleno, metilbifenil, trimetilnaftaleno, dimetilbifenil y representan el 46.38% de la pérdida en peso de la resina CB.

Como se mencionó en el Capítulo de Resultados, la vida de banco representa el tiempo de vida útil de la mezcla arena con resina. En la figura 6.4 se observa que todas las mezclas, independientemente de tipo de resina con la

cual fueron fabricados, se degradan. Por lo tanto los corazones fabricados una hora después de que la mezcla se preparó, presentan una disminución en la resistencia con respecto a la resistencia inmediata.

En el caso de la resina de caja fría (CB) y caja caliente (HB), desde que la mezcla se fabrica comienza a perder solventes derivados del petróleo (Figura 7.1) y provoca que la mezcla pierda fluidez al momento del soplado, ocasionando que exista un mayor espaciamiento entre cada grano de arena, lo que genera bajas propiedades mecánicas. En la resinas GMBOND® (GMB), inorgánica (INO) y Nemak Binder® (NB) el solvente que se pierde es agua. Esto representa una ventaja ya que el agua se puede agregar nuevamente para rehidratar la mezcla.

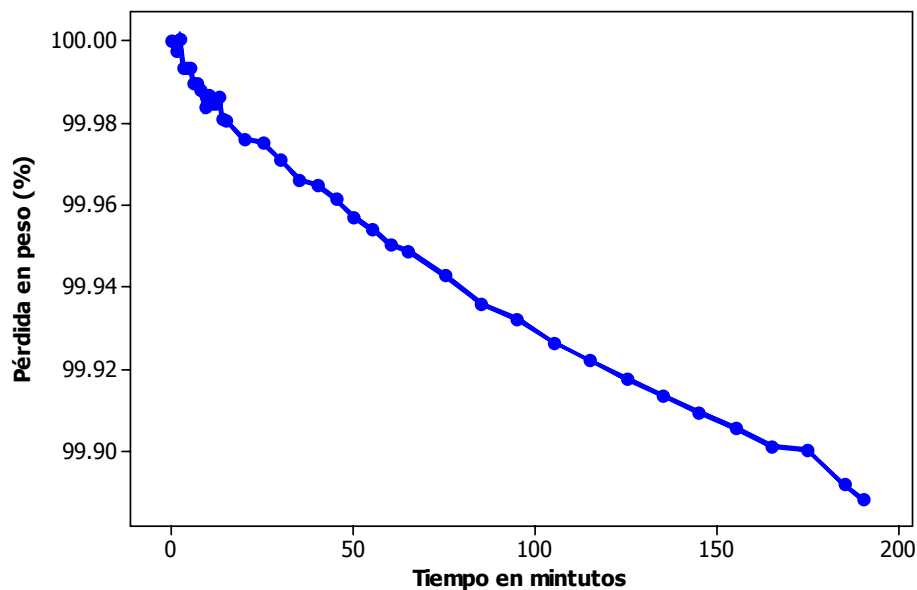


Figura 7.1 Pérdida de solventes resina caja fría.

Otro factor importante es la cantidad de sólidos presentes en la resina NB, mientras que en la resina CB tiene un contenido de sólidos del 64% y los solventes presentes en la formulación hacen que la mezcla fluya con facilidad, la resina NB sólo contiene al 18.7% de sólidos y el resto de los solventes (agua) se evaporan al momento de fabricar el corazón, lo cual provoca una

disminución en la densidad y un aumento en la fracción volumétrica de poros presentes en el corazón. Ver Figuras 6.7 y 6.8.

La pérdida de solventes también promueve un incremento en la viscosidad de las resinas y una disminución en la movilidad de las moléculas que la forman, haciendo más difícil el entrecruzamiento de las resinas, esto explica la diferencia entre los valores de la resistencia inmediata y la vida de banco a 1 hora.

Desde el inicio del mezclado de la arena con las resinas, estas últimas empiezan a reaccionar en la superficie de los granos (Figura 7.2) sin la presencia de algún catalizador, provocando una disminución en los compuestos. Esto explica la diferencia entre las propiedades mecánicas de una mezcla recién fabricada (mezcla fresca) y una almacenada (vida de banco a la hora).

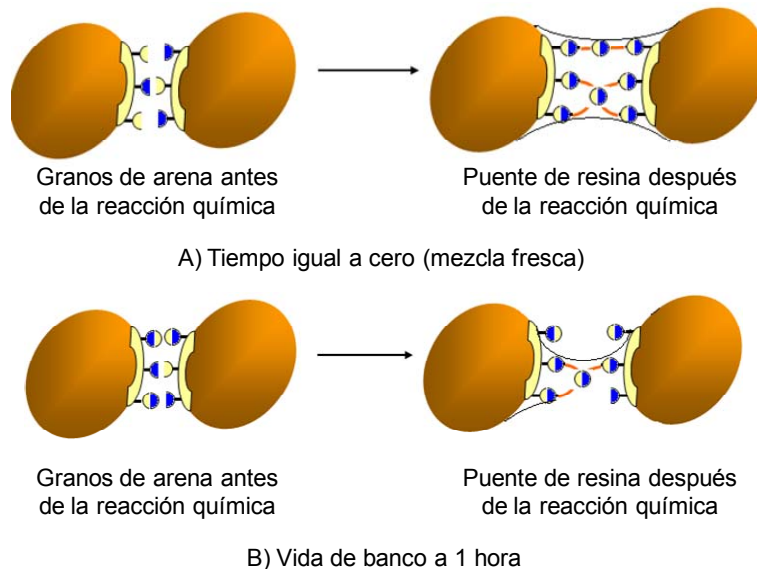


Figura 7.2. A) Esquema de la reacción química idealizada en la superficie del grano con mezcla fresca. B) Reacción química en la superficie del grano con mezcla vieja (vida de banco a 1 hora).

En el desarrollo de resistencia, todos los corazones con las distintas resinas presentan el mismo comportamiento, una baja resistencia inmediata para un tiempo igual a cero y un incremento de resistencia a 1 y 2 horas independientemente de la resina con la cual fueron fabricados. Esto es debido principalmente a que la reacción de polimerización (entrecruzamiento de cadenas) no se lleva al 100% al momento del curado (fabricación de los corazones) y después de una hora el entrecruzamiento de las resinas se hace más fuerte lo cual explica el incremento de la resistencia a la tensión de los corazones.

La resistencia inmediata de los corazones fabricados con la resina CB representa el 63.7% de la resistencia máxima alcanzada a las 2 horas después de haber sido fabricados. De igual manera para los corazones elaborados con la resinas NB la resistencia inmediata representa el 61.5% del desarrollo de resistencia a 2 horas.

La humedad relativa afecta seriamente el desarrollo de resistencia de los corazones, independientemente del tipo de resina que se utilice para su fabricación. Los corazones fabricados con la resina CB pierden a las 2 horas el 21% de la resistencia con respecto a la resistencia inmediata, esto es debido a que el isocianato presente en la resina parte 2 reacciona con el agua, generando una poliurea que tiene menor resistencia que el poliuretano, ver Figura 7.3.

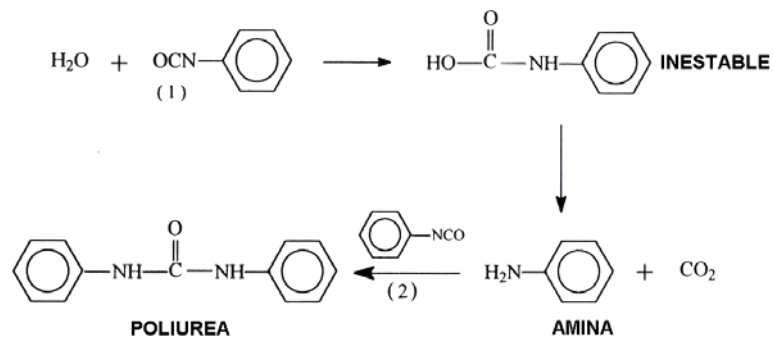


Figura 7.3. Reacción de la resina parte 2 con el agua [28].

El en caso de los corazones fabricados con las resinas GMB, INO y NB la disminución de la resistencia con respecto a la resistencia inmediata es, 39.9%, 63.5% y 31.5% menos respectivamente, debido a la rehidratación, ya que el agua es el principal solvente de estas tres resinas provocando la disminución de las propiedades mecánicas. En la Figura 7.4 se puede observar un puente de resina inorgánica agrietado por efecto de alta la humedad relativa.

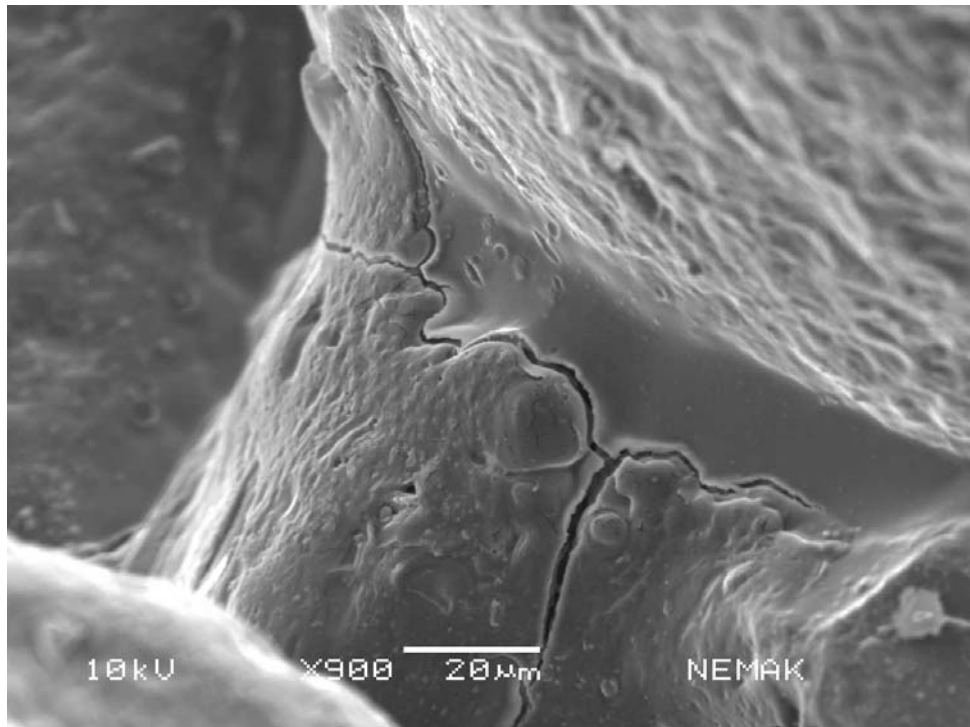


Figura 7.4. Puente de resina inorgánica afectado por la humedad.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada y la información disponible, no se encontró referencia alguna correspondiente al análisis termogravimétrico de la resina inorgánica (INO) para fundición.

La curva del TGA de la resina NB corresponde con los resultados obtenidos por Zohuriaan y Shokrolahi ^[82] en su investigación realizada para determinar la estabilidad térmica de diferentes gomas naturales y modificadas. También es similar a lo reportado por Kato y colaboradores ^[13]. La primera descomposición está asociada con la pérdida de agua y la principal

descomposición de esta resina se encuentra en el rango de los 275 y 410°C. La ventaja de este proceso es que el pH de la arena no afecta, porque el proceso de endurecimiento del corazón es por el proceso de secado, a diferencia del proceso de CB que es un proceso de reacción química el cual es catalizado por un agente básico como es la amina y el proceso HB que utiliza nitrato de amonio como catalizador.

El análisis de la estabilidad térmica inherente de la resinas (IPDT) determinó que la resinas INO es la que mayor estabilidad térmica presenta, lo cual representa un serio problema para el desarenado de las piezas, debido a que la temperatura del vaciado de piezas de aluminio se encuentra en el rango de 700 a 750°C y a esta temperatura la resina INO es completamente estable. Además se hace imposible la recuperación térmica de los corazones, este resultado también acredita las recomendaciones de Cedillo Saucedo ^[83] y Sáenz Valdez ^[84] en sus Tesis de Maestría respectivamente; ambos recomiendan la recuperación mecánica de la arena si se utiliza la resina inorgánica para la fabricaciones de corazones.

En el caso de la resinas CB y HB el valor del IPDT es de 734.2 y 993.4 respectivamente, este valor justifica el uso de ambas resinas para la fabricación de corazones de arena utilizados en el vaciado de piezas de aluminio. De acuerdo con el valor de IPDT de la resina CB se establece que esta resina tendrá un mejor desarenado que la resina HB. También hace posible la recuperación térmica de la arena empleando cualquiera de estas dos resinas.

El valor del IPDT obtenido para la resina NB corresponde con los resultados reportados por Zohuriaan y Shokrolahi ^[82]. Los corazones fabricados con la resina NB tendrán un mejor desarenado con respecto a la utilización de las resina CB, HB e INO. También es posible la recuperación térmica de la arena utilizando esta resina.

Los resultados de la determinación del contenido de sólidos mostrados en la figura 6.2, coinciden con la información encontrada en la revisión bibliográfica y las hojas de seguridad de las resinas. La resina NB fue la que menor contenido de sólidos presentó 18.7%. Esto abre una pauta para el desarrollo de resinas (CB, HB e INO) con bajos contenidos de sólidos utilizadas para la fabricación de corazones, al reducir el contenido de sólidos presentes en las resinas también se reducirá la cantidad de compuestos generados en la pirólisis de los corazones. También se puede incrementar el contenido de sólidos en la resina NB para mejorar la estabilidad térmica inherente a la misma y las propiedades mecánicas de los corazones fabricados con esta resina.

Los corazones fabricados con la resina NB presentaron una densidad aparente 9% inferior con respecto a los elaborados con la resina de CB, esto es debido a varios factores, uno de ellos debido al diseño del herramental (caja de corazones) que tienen una área de venteo 25% menor de la parte inferior con respecto a que el área de venteo de la parte superior de la caja. Esta relación se debe cumplir debido a que el sistema de las resinas de CB utiliza una amina terciaria en forma de gas como catalizador para acelerar la reacción entre las resinas y producir el corazón. Al tener menor área de venteo en la parte inferior de la caja la amina permanece más tiempo en contacto con la mezcla debido a la restricción del flujo de gas.

Los herramientas utilizados para la fabricación de corazones con resina HB requieren menor área de venteo con relación a los de caja fría (CB) debido a que el catalizador se agrega en forma líquida al preparar la mezcla y la reacción química de polimerización es acelerada por la temperatura. Esta restricción impide que la mezcla de fabricación con las resinas INO y NB fluya libremente y que el vapor de agua sea liberado de manera eficiente.

En las Figura 7.5, 7.6 y 7.7 son imágenes de los puentes de resina que une los granos de arena tomadas con el microscopio electrónico de barrido. En la figura 7.5 observa que el puente de resina de CB es uniforme y no presenta ningún tipo de fallas, lo cual se relaciona con su buena densidad. En las Figuras 7.6 y 7.7 se muestran los puentes formados por las resinas inorgánica (INO) y Nemak Binder® (NB) en los cuales se puede observar la presencia de poros, generados por la evaporación del agua utilizada como solvente en la formulación de ambas resinas. Lo cual explica su baja densidad con respecto a los corazones fabricados con la resina CB.

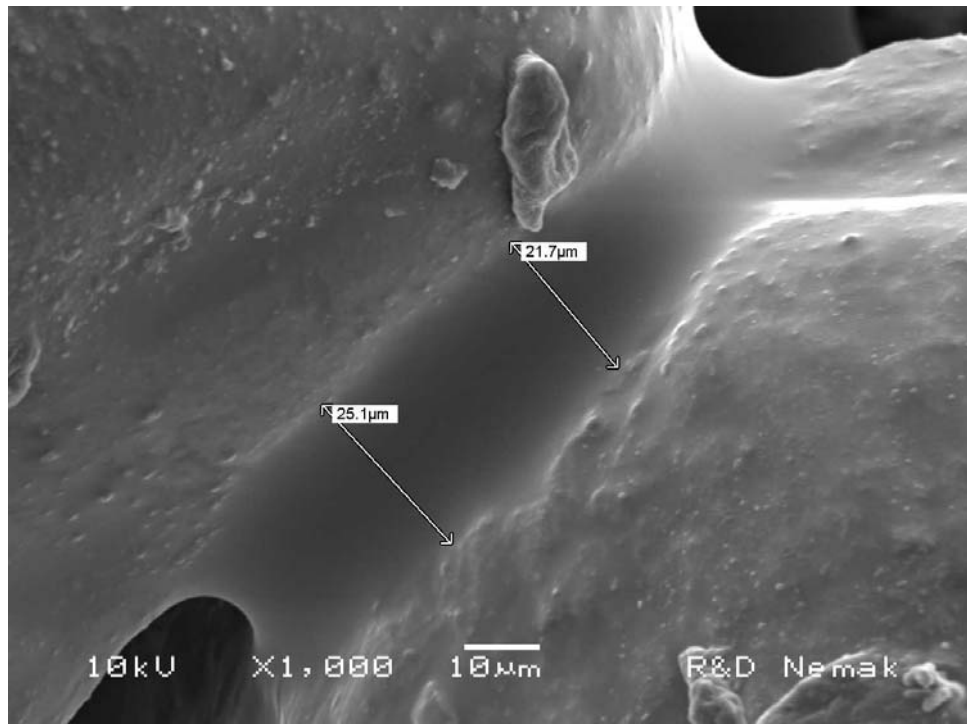


Figura 7.5. Puente de resina CB

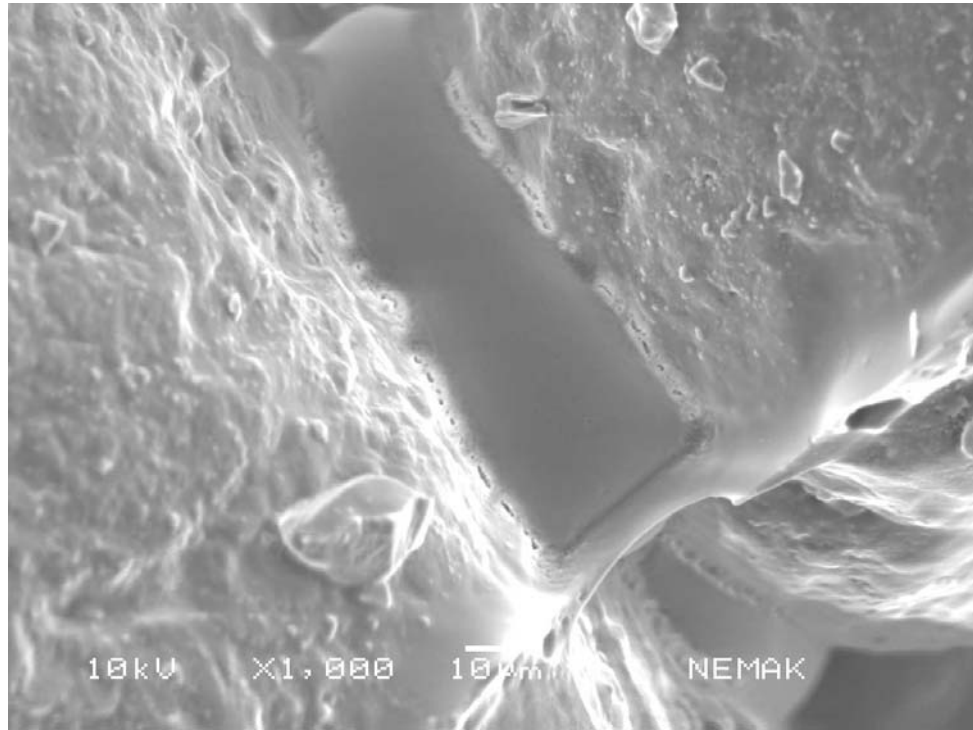
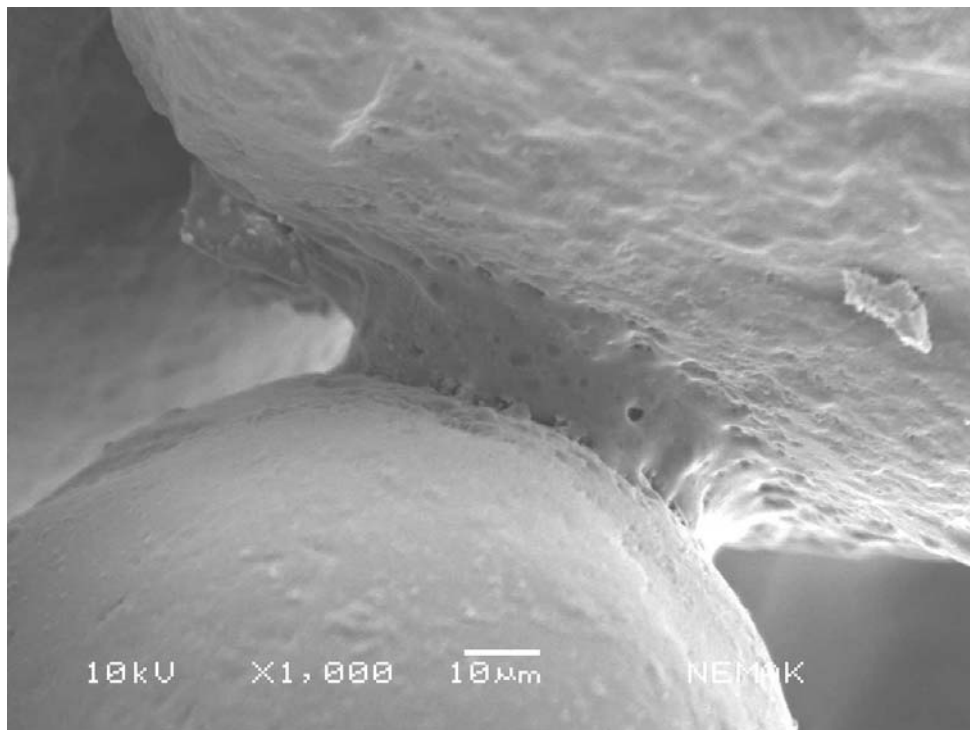


Figura 7.6. Puente de resina INO.



7.7. Puente de resina NB.

Los resultados de la evolución de gases demostraron que las resinas fabricadas con proteínas GMB y polisacáridos NB generan una mayor cantidad de gases que las resinas derivadas del petróleo CB y HB. Si consideramos el análisis termogravimétrico y la estabilidad térmica inherente (IPDT), Tabla 6.2, de las resinas, al tener un valor bajo de IPDT las resinas se descompondrán más rápido y generan más gas en el momento de vaciado.

Los compuestos de gas identificados por cromatografía de gases en los condensados de la resina CB corresponden con los reportados por Lytle y colaboradores ^[75], los resultados de las pirólisis de las resinas GMB y NB coinciden con los estudios realizados de la degradación térmica y pirólisis de diferentes polisacáridos reportados por Paine ^[85], Scaroni ^[86], Trotta ^[87], Ross ^[88].

Sin embargo, la razón de evolución de gas de las resinas no derivadas del petróleo GMB y NB fue más alta en relación con las resinas CB y HB. Por lo tanto el gas generado por las resinas GMB y NB saldrá más rápido que el gas de las resinas CB y HB.

Así mismo, la resina INO fue la que obtuvo el valor más alto de la estabilidad térmica inherente y el menor volumen de gas producido en la prueba de evolución de gases, debido a que no cuenta con material orgánico en su formulación. Los resultados de la cromatografía de gases masas de la resina INO indican la presencia de alcoholes, lo cual nos indica que es posible que se estén utilizando formulaciones de tetraetilsilicato y/o metilsilicato en la resina INO.

En la investigación realizada por Miyazawa en 1986 ^[9] recomendó el uso de un almidón fosfatado para la fabricación de corazones utilizados en el vaciado de hierro. La mezcla que él evaluó contenía, 2.8% de almidón fosfatado, 0.2% de zirconio, 0.1% de grafito y el porcentaje de agua varía del 7

al 19%. El proceso de fabricación de corazones descrito por Miyazawa es por soplado en un herramental a 200°C y un poscurado a 130°C por 2 horas.

Las principales ventajas de esta investigación comparada contra la de Miyazawa es que la resina NB es una mezcla de polisacáridos y solo se requiere 1% de resina para fabricar corazones contra el 2.8% propuesto por Miyazawa. Tampoco se requieren aditivos adicionales como los utilizados por Miyazawa. Al tener menor porcentaje de resina los corazones elaborados con la resina NB generan menor cantidad de gas comparados contra mezcla propuesta por Miyazawa. Además el proceso desarrollado junto con la resina NB no se requiere un poscurado de los corazones después de haber sido extraídos de la maquina sopladora.

En el 2005 Kato y colaboradores ^[13] propusieron una resina de polisacárido soluble en agua; la cual se mezcla al 1.4% con arena para fabricar corazones. Sin embargo, también reportan ^[14] que la mezcla de arena con esta resina tiene una alta viscosidad que impide la fabricación de corazones por soplado, por ello recomendaron proceso de inyección de la mezcla en el herramental para la fabricación de los corazones.

La mezcla de arena fabricada con la resina NB desarrollada en esta investigación tiene la suficiente fluidez para fabricar los corazones mediante el soplado. Esta es la principal diferencia con respecto a la resina elaborada por Kato y colaboradores. Además que los corazones fabricados con la resina NB solo requieren 1% de la misma y no 1.4% como lo sugiere Kato.

En una reciente investigación Zhou y colaboradores ^[15] proponen una mezcla para fabricar corazones que contiene 2.5% de almidón modificado, 0.5% de bentonita, 0.3% de grafito, 0.01% de fosfato y del 12 al 15% de agua. Al tener esa cantidad de agua, la mezcla no se puede soplar. La bentonita y el grafito son compuestos que se utilizan en el moldeo en verde, lo cual impide la

recuperación térmica de la arena para su reutilización en la fabricación de corazones. El porcentaje de resina que se utiliza para la fabricación de corazón con la resina NB desarrollada en esta investigación es solo el 1%, sin aditivos y el proceso de fabricación de corazones es por soplado; a diferencia de proceso recomendado por Zhou que hornea los corazones por 1 hora.

Además, la resistencia a la tensión reportada por Zhou es de 1.54 MPa, más del doble de la obtenida con resina NB que fue de 0.71 MPa. Sin embargo, Zhou utilizó 2.5% de almidón modificado y 0.5% de bentonita y comparado contra el 1% utilizado con la resina NB. La evolución de gases reportada por Zhou fue 16 cm³/g, 296% superior a la evolución de gases obtenida con la resina NB que fue de 5.4 cm³/g. Por lo tanto el proceso de elaboración de corazones y la mezcla de arena con NB son menos costosos que la mezcla y proceso propuesto por Zhou. En resumen el aglutinante NB tiene menor evolución de gases, utiliza un menor cantidad de resina y la arena se puede recuperar térmicamente al no contener bentonita.

En la publicación de Yu y colaboradores ^[16] del 2009, la composición química de resina contiene del 28 al 30% de almidón de papa, 1% de formaldehído, 0.1% de ácido fosfórico, 2% de alcohol polivinílico, 1% de urea y agua. Las mezclas utilizadas por Yu ^[16] para realizar las pruebas mecánicas contienen del 4 a 7% de resina, 2 al 3% de bentonita. El porcentaje de resina que se utiliza en las mezclas con NB solo es del 1% y sin ningún otro aditivo.

Por otra lado, Yu propone el horneado de los corazones a 160°C por dos horas, lo cual hace este proceso muy lento para su implementación en la industria de la fundición. La resistencia inmediata reportada por Yu después del horneado de los corazones fue de 0.75 MPa con una mezcla de 4% de resina y 2% bentonita, mientras que con la resina NB fue de 0.71 MPa con 1% de resina; cabe mencionar que el proceso de fabricación de los corazones con la

resina NB es de 1 minuto, lo cual lo hace más competitivo que el proceso propuesto por Yu.

La evolución de gases reportada por Yu fue $14.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ lo cual representa un 286 % mayor comparados contra los resultados obtenidos con la resina NB que fueron $5.4 \text{ cm}^3/\text{g}$. Yu recomienda utilizar 6% de resina y 3% de bentonita para fabricar corazones, lo cual lo hace un proceso más costoso comparado contra el proceso que utiliza la resina NB ya que solamente se requiere el 1% de la resina, además que la mezcla recomendada por Yu para fabricar los corazones no puede ser recuperada térmicamente debido a que la bentonita incrementa el pH y ADV de la arena después de su recuperación a alta temperatura. Los corazones fabricados con la resina NB pueden ser recuperados térmicamente debido a que no contienen aditivos inorgánicos y la arena es compatible con las resinas CB, HB y GMB.

Los resultados de análisis termogravimétrico, FTIR y cromografía de gases, demostraron que la resina desarrollada NB tiene una composición diferente a las resinas CB, GMB, HB e INO. Si bien, otros autores [9,12,13,14,15,16,17,18,19,20,22] también reportan el uso de polisacáridos para resinas de fundición; la resina NB desarrollada en esta investigación, es una mezcla de polisacáridos solubles en agua, libre de aditivos o compuestos químicos derivados del petróleo, que cumple con todos los requerimientos para la fabricación de moldes y corazones de arena que se utilizan en la industria de la fundición dedicada al vaciado de piezas de aluminio.

8. Conclusiones y Recomendaciones.

8.1. Conclusiones.

Los resultados de análisis termogravimétrico, FTIR y cromografía de gases, demostraron que la resina desarrollada NB tiene una composición diferente a las resinas CB, GMB, HB e INO.

La resina NB desarrollada en esta investigación, es una mezcla de polisacáridos solubles en agua, libre de aditivos o compuestos químicos derivados del petróleo, que cumple con todos los requerimientos para la fabricación de moldes y corazones de arena que se utilizan de la industrial de la función dedicada al vaciado de piezas de aluminio.

Todas las pruebas realizadas en esta investigación indican la posibilidad de fabricar corazones y moldes de arena con aglutinantes no derivados del petróleo (polisacáridos).

La resina Nemak Binder[®] (NB) tiene las siguientes ventajas:

- Una menor temperatura de descomposición térmica que las resinas de caja fría (CB), caja caliente (HB) y la resina inorgánica (INO). Lo cual facilitará el desarenado de las piezas después del vaciado y es posible reducir la temperatura para la recuperación térmica. El análisis termogravimétrico y la determinación de la estabilidad térmica inherente

(IPDT) junto con la prueba de distorsión en caliente (BCIRA) son una buena manera de evaluar el comportamiento de la resina y el corazón a alta temperatura.

- Es posible elaborar corazones con resinas de bajo contenido de sólidos porque tiene menor contenido de sólidos que las resinas de caja fría (CB), caja caliente (HB) e inorgánica (INO) cumpliendo con las propiedades mecánicas necesarias para la fabricación de corazones.
- La mezcla con NB cumple con las especificaciones para la vida de banco establecida para mezclas fabricadas con las resinas de caja fría. Por lo tanto es posible el uso de polisacáridos en la formulación de resinas para fundición sin afectar las propiedades mecánicas de la mezcla y de los corazones.

Los corazones elaborados con la resina Nematik Binder ofrecen la siguientes ventajas:

- Tienen menor densidad aparente que los corazones fabricados con las resinas de caja fría (CB), GM Bond[®] (GMB), caja caliente (HB) e inorgánica (INO).
- Cumplen con la resistencia mecánica requerida para los corazones de caja fría.
- Tienen mayor fracción de poros que los corazones fabricados con las resinas de caja fría (CB), GM Bond[®] (GMB), caja caliente (HB) e inorgánica (INO), lo cual se traduce en una mayor permeabilidad del corazón permitiendo la salida de los gases con mayor facilidad que la resina de caja fría.
- Cumplen con la especificación del desarrollo de resistencia en ambiente establecida para los corazones fabricados con las resinas de caja fría

(CB). Al tener una menor resistencia que los corazones de caja fría se facilita el desarenado de las piezas después del vaciado.

- Presentan mejor desarrollo de resistencia en cámara húmeda que corazones fabricados la resina inorgánica (INO) y menor que los corazones elaborados con la resina de caja fría (CB).
- Tienen una menor distorsión en caliente que los fabricados con resina de caja caliente (HB) y GMBond® (GMB).
- Poseen un tiempo menor a la fractura en la prueba de distorsión en caliente que los fabricados con resina caja fría (CN), caja caliente (HB) y GMBond® (GMB) lo cual facilita el desarenado de las piezas después del vaciado.
- Generan el mismo volumen de gas que los corazones de elaborados con la resina GMB y tiene la mayor razón de evolución de gas lo cual facilita la salida de los gases generados por la pirólisis de los corazones en el momento del vaciado.

La pirólisis de los corazones elaborados con la resina Nematik Binder® genera menos del 70% de los compuestos generados con los corazones fabricados con la resina CB, 41% menos en relación a la resina de HB y 39% menos que la resina GMB.

El utilizar polisacáridos en la formulación de los aglutinantes para la fabricación de moldes y corazones de arena disminuye la cantidad de compuestos emitidos en las fundiciones de aluminio.

8.2. Recomendaciones.

Desarrollar nuevas mezclas de polisacáridos para incrementar la estabilidad térmica inherente (IPDT) de la resina NB.

Desarrollar nuevos aglutinantes con polisacáridos que cuya temperatura de deshidratación sea inferior a 100°C.

Diseñar herramientas para la resina Nematik Binder[®] con igual área de venteo en la parte inferior y superior de la caja de corazones, para facilitar la salida del vapor de agua que se evapora en el momento del curado de los corazones e incrementar la densidad aparente de los corazones.

Desarrollar aditivos para mejorar el desarrollo de resistencia en la cámara húmeda de los corazones fabricados con la resina Nematik Binder[®].

Realizar un análisis cuantitativo de los compuestos generados en la pirolisis de los corazones.

Desarrollar resinas híbridas para reducir las emisiones y mejorar el desarrollo de resistencia de los corazones.

Desarrollar pruebas para evaluar la fluidez de la mezcla arena-resina.

Bibliografía.

1. Tackes George. "Core binders: A look into the future". Modern Casting Vol.10, Num. 10. E.U.A. 2001.
2. Torres Torres Carlos. "Sistemas de aglutinación química". Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 1997.
3. Gómez Moyeda Ernesto. "Tecnología de las arenas de moldeo". Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 1997.
4. Instituto Mexicano del Petróleo. "Precios del petróleo". www.imp.mx
5. Centro de Estudios de Finanzas Públicas. "Informe diario sobre la evolución del precio del petróleo". Cámara de Diputados LX Legislatura. México. 2008.
6. C. Yearley, "Why we use sand additives". Foundry. E.U.A. 1967.
7. Sanders C. A. "Foundry additives". Castings. E.U.A. 1969.
8. Gilson D. M, Vandebos S, Archibald J. J. "Sand additives, past, present and future". AFS Transactions. E.U.A. 1995.
9. Miyazawa N. "Properties of starch bonded cores for iron castings". The British foundryman. England. 1986.
10. Bralower P. M, Granluand M. J. "Controlling properties of molding sand". Modern casting. Vol. 79. E.U.A. 1989.
11. "Sand, binder, sand preparation, coremaking". Foundry management technology. Vol. 118. E.U.A. 1990.
12. Brummer G. "Organic glues as a sufficient supplementation to the sand binder bentonite". Giesserei. Vol. 87. Germany. 2000.
13. Kato Y, Zenpo T, Asano N. "New core binder system for aluminum casting based polysaccharide". AFS Transactions. E.U.A. 2005.
14. Makino H, Kato Y, Zenpo T, Asano N. "Molding simulation and experiment of new coremaking system with polysaccharide-based binder". AFS Transactions. E.U.A. 2005.

15. Zhou X, Yang J, Qu G. "Study on synthesis and properties of modified starch binder for foundry". Journal of materials processing technology. 2007.
16. Yu W, He H, Cheng N, Gan B, Li X. "Preparation and experiments for a novel kind of foundry core binder mad from modified potato starch". Materials and design. 2009.
17. Zhou X, Ji C, Qu G. "A study on the application of alpha – starch compound ind molding sand". Foundry technology China. Vol. 4. 1996.
18. Zhou X, Yang J, Gao Q, Ren G. "Survey and tendency of study on starch binders for foundry at home and abroad". Foundry China. Vol. 49. 2000.
19. National research institute. "Water soluble foundry core for light alloys containing refractory particles, calcium chloride and organic binder". Patent number J5 2050, 922. Japan. 1975.
20. National research institute. "Water soluble foundry core for light alloys". Patent number J5 2050, 923. Japan. 1975.
21. Liu J, Rynersin M. "Method for article fabrication using carbohydrate binder". Patent number US6585930. E.U.A. 2001.
22. Both K, Dautzenberg H, Borrmeister B, Schierbaum F, Stöbe R. "Casting molds and cores for aluminum". Patent number DD 224 780A. Germany. 1984.
23. "Chemically bonded core and molds", American Foundry Society. E.U.A. 1987.
24. Clyde Anton Sanders. "Foundry sand practice". American Colloid Company Bulletin. E.U.A. 1960.
25. Garcia Sosa Victor. "Tecnología del control de las arenas". México. 2008.
26. "ASM casting handbook", Vol. 15, 2nd Edition, E.U.A, 1992.
27. "Manual de entrenamiento para el proceso de caja fría". Delta-HA. México. 2001.
28. "Sand binder systems". Foundry Management Technology. Penton Publication. E.U.A. 1989.

29. Castro García Pablo. "Proceso de corazones Nematik". Nematik S.A. México. 1997.
30. Velazquez Garcia J P. "Curso de arena y corazones", Nemek S.A. Mexico. 2007
31. "Core manufacturing". Hidro Aluminium Deutschland GmbH. Germany. 2003.
32. Kuhs Bernd. "Inorganic binder formulations". Germany. 2005.
33. "El proceso Ashland". Ashland Chemical México. Mexico. 1999.
34. Guajardo Hernandez P. "Penetración de aluminio en los moldes de arena sílica unidos por un sistema de cold box". Tesis de Maestría. UANL, FIME. México. 2006.
35. W.L. Tordoff. "Test casting evaluation of chemical binder systems". AFS Transactions. E.U.A. 2006.
36. Macho Christoph, Psimenos Angelos. "Thermosetting resins for warm and hot box system". Giesserei – Rundschau. Germany. 2007.
37. Siak J S, Schreck R M. Shah K K. "Expendable core for casting processes". United States patent number 5,320,157. 1994.
38. Siak J S, Whited W T, Datte M A, Schreck R M. "Sand mold member and method". United States patent number 5,582,231. 1996.
39. Sanders G. "GMBOND[®] sand binder system". Hormel Foods. E.UA. 2004.
40. Jacobson P. "The GMBOND[®] sand binder from Hormel". Hormel Foods. E.UA. 2003.
41. Eastman J. "GMBOND[®] sand binder and process". Hormel Foods. E.UA. 2004.
42. Sanders G. "GMBOND[®] the sand binder of the future". Hormel Foods. USEPA Meeting on Innovative Binders for the Iron and Steel Foundries. 2005.
43. Babui Dergal S. "Química de los alimentos". Mexico, 1996.

44. Gómez Ballesteros D. "Evaluación de las propiedades mecánicas de un aglutinante orgánico para la fabricación de corazones". Tesis de Ingeniería. Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 2003.
45. Wilfried Bender, "Inorganic binders" Hydro F&E Bonn, Germany. 2003
46. Informe anual de la Asociación Alemana de Fundición (DVG), 2005.
47. Martin Sobczyk. "Untersuchung zur Nutzung der Vakuumtrocknungshärtung für die Herstellung und den Einsatz magnesiumsulfatgebundener Kerne für den Leichtmetallguss". Tesis para obtener el grado Doctor en Ingeniería. Universität Magdeburg. Germany. 2008.
48. Genzler C. "Silicate bonded moulding sand". Foseco Netherlands.
49. Archer R D. "Inorganic and organometallic polymers". United States. 2001.
50. "Binders for making ceramic moulds and cores". Wacker Chemie GmbH. Germany.
51. Wallenhorst C, Müller J, Daniels B. "Series production with an inorganic binder system in foundries producing light metal casting of fittings". Germany. 2009.
52. Gerlach R J, "AWB - The Binder System for a Clean Foundry" USEPA Meeting on Innovative Binders for the Iron and Steel Foundries. 2005.
53. Reich D, "Inorganic Binder Laempe Beachbox Process using Laempe + Kuhs Binders, 2005 Current Stage of Development" USEPA Meeting on Innovative Binders for the Iron and Steel Foundries. 2005.
54. Löchte K, Boehm R. "CORDIS – The Inorganic Binder System Properties and Experience" Germany. 2005.
55. Heinze T, Libert T, Koschella A. "Esterification of polysaccharides", Germany. 2006.
56. Garritz Ruiz A, Chamizo J A. "Del tequesquite al ADN algunas facetas de la química en México". México. 1997
57. González V A, Guerrero C A, Ortiz U. "Estructura y compatibilidad de mezclas de poliamidas con quitina y quitosán". México, 2001.

58. Velasco Tellez A, Valtierra Gallardo S, Garcia G, Esquivel Herrera A. "Binder composition and method of forming foundry sand cores and molds". International application patent number PCT/IB2007/004242. 2008.
59. "Mold and core test handbook". American foundry society. 2nd Edition. E.U.A. 2000.
60. Hoja de seguridad de la resina parte 1 de caja fría.
61. Hoja de seguridad de la resina parte 2 de caja fría.
62. Hoja de seguridad de la GM Bond.
63. Hoja de seguridad de la resina parte 1 de caja caliente.
64. Hoja de seguridad de la resina parte 2 de caja caliente.
65. Hoja de seguridad de la resina inorgánica.
66. Esquivel Herrera A. "Efecto 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". Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Saltillo, México. 2003.
67. Domínguez Rodríguez R, "El efecto de los componentes de una mezcla de arena utilizada en la fabricación de moldes y corazones sobre el fenómeno de distorsión", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Saltillo, México. 2001.
68. Ramrattan S N, Vellanki S, Jideaku O, Huang C. " Thermal distortion in process control of chemically bonded sands". AFS Transactions. E.U.A. 1997.
69. McIntyre S, Strobl S M. "Adapting hot distortion curves to process control". Foundry Management & Technology. E.U.A. 1998.
70. González López J. "Efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de moldes y corazones producidos por el proceso fenoluretano en caja fría", Tesis de Maestría, UANL, FIME, México. 2001.
71. "Casting Emission Reduction Program (CERP)". www.cerp-us.org

72. Kauffmann P, Voigt R C. "Empirical study of impact of casting process changes on VOC and Benzene emission levels and factors". AFS Transactions. E.U.A. 1997.
73. Manual of core gas measuring system. MK Industrievertretungen GmbH. 2003.
74. Prass I. "koreanische Kernmacherschulung". Hydro Aluminium Mandl&Berger GmbH. 2004.
75. Lytle C.A, Bertsch W, McKinley. "Determination of novolac resin thermal decomposition products by pyrolysis – gas chromatography – mass spectrometry". Journal of analytical and applied pyrolysis. 1998.
76. Doyle C.D. "Estimating thermal stability of experimental polymers by empirical thermogravimetric analysis. 1961.
77. Poljansenk, I., Krajnc, M. "Characterization of phenol-formaldehyde prepolymer resins by in line FT-IR spectroscopy". Acta Chim. Slov. 52: 238-244. 2005.
78. Jung-Ohk, Kweon., Shin-Choon, Kang, Si-Tae, N. "In-situ real-time IR monitoring of N-alkylation of poly(ethylene oxide) polyurethane". Applied Chemistry. 9: 9-12. 2005.
79. Schanzer, Ch., Bühner, H. "Investigating the curing of amino resins with TGA-MS and TGA-FT-IR". Spectroscopy Europe. 14:21-23. 2002.
80. Jovanovski, G., Boev, B., Makreski, P., Najdoski, M., MChemistrladenovski, G. "Minerals from Macedonia". Bulletin of the chemists and technologists of Macedonia. 22; 111-141. 2003.
81. Thygesen, L.G., Lokke, M.M. Micklander, E., Engelsen, S.B. "Vibrational microspectroscopy of food". Raman vs FT-IR. Trends in Foods Science & Technology 14(03) 50-57. 2003.
82. Zohuriaan M.J., Shokrolahi F. "Thermal studies on natural and modified gums". Polymer Testing. 23 575-579. 2004.
83. Cedillo Saucedo E. "Arenas alternativas para la fabricación de corazones en la fundición de aluminio". Tesis de Maestría, UANL, FIME, México. 2009.

84. Sáenz Valdez A. "Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industria automotriz". Tesis de Maestría, UANL, FIME, México. 2010.
85. Paine III J. B, "Carbohydrate pyrolysis mechanisms from isotopic labeling part 4. The pyrolysis of D-glucose: The formation of furans". Journal of analytical and applied pyrolysis. 83, 37-63. 2008.
86. Scalarone D. Chiantore O. Riedo C. "Gas chromatographic/mass spectrometric analysis of on-line pyrolysis silylation products of nonosaccharides". Journal of analytical and applied pyrolysis. 83, 157-164. 2008.
87. Trotta F. Zanetti M. Camino G. "Thermal degradation of cyclodextrins". Polymer degradation and stability. 69, 373-379. 2000.
88. Ross A.B. Anasyasakis K. Kubacki M. Jones J.M. "Investigation of the pyrolysis behavior of brown algae before and after pre-treatment using PY-G/MS and TGA. Journal of analytical and applied pyrolysis. 2008.

Lista de Tablas.

Tabla 3.1. Lista los diferentes procesos de aglutinación química así como el año de su introducción al mercado.	18
Tabla 3.2. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al pH del catalizador.	19
Tabla 3.3. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al mecanismo del curado.	20
Tabla 3.4. Nombre y la formula estructural de los 20 principales aminoácidos.	31
Tabla 3.5. Lista de nuevas resinas inorgánicas.	34
Tabla 5.1. Composición química de la arena sílica.	51
Tabla 5.2. Composición química de la resina parte 1 de caja fría.	53
Tabla 5.3. Composición química de la resina parte 2.	53
Tabla 5.4. Composición química de la resina GMBOND® (GMB).	53
Tabla 5.5. Composición de la resina inorgánica.	54
Tabla 5.6. Diseño de experimentos para la vida de banco.	62
Tabla 5.7. Diseño de experimentos para el desarrollo de resistencia.	63
Tabla 5.8. Diseño de experimentos para desarrollo de resistencia de los corazones en cámara húmeda.	64
Tabla 5.9. Diseño de experimentos para evaluar el efecto de la humedad relativa sobre el desarrollo de resistencia de los corazones.	65
Tabla 6.1. Pérdida en peso de las resinas.	72
Tabla 6.2. Estabilidad térmica inherente de las resinas.	73
Tabla 6.3. Compuestos identificados mediante cromatografía de gasas masas.	96

Lista de Figuras.

Figura 1.1. Monoblock y cabeza de aluminio.	3
Figura 1.2. Precio del petróleo.	4
Figura 3.1. Morfología de los grano de arena.	14
Figura 3.2. Representación esquemática del proceso de caja fría.	21
Figura 3.3. Corazones obtenidos por el proceso de caja fría.	22
Figura 3.4 Reacción para el proceso fenólico uretánico (CB).	24
Figura 3.5. Efecto del contenido de resina sobre la puente de unión entre los granos de arena con 0.8% de resina (izq) y 1.3% de resina (der).	25
Figura 3.6. Reacción de la resina parte 2 con el agua.	25
Figura 3.7. Corazón de caja caliente.	27
Figura 3.8. Elementos estructurales de la resina alcohol furfúrico, urea - formaldehído.	28
Figura 3.9. Elementos estructurales de la resina fenol formaldehído.	28
Figura 3.10. Esquema de la reacción fenólica.	29
Figura 3.11. Reacción entre aminoácidos.	32
Figura 3.12. Proceso de recubrimiento de la arena con la resina GM Bond®.	33
Figura 3.13. Reacción de polimerización del $\text{Na}_2\text{SiO}_2(\text{OH})_2$.	36
Figura 3.14. Efecto de la humedad sobre los corazones inorgánicos.	37
Figura 3.15. Enlace de dos granos de arena mediante resina inorgánica.	38
Figura 3.16. Formación de sacarosa por condensación.	39
Figura 3.17. a) Muestra el acomodo espacial de la glucosa. b) Formula simplificada de la glucosa. c) Almidón. d) Celulosa.	39
Figura 3.18. A) Estructura de la amilopectina. B) Estructura de la amilosa.	41
Figura 3.19. Dextrina.	41

Figura 3.20. Alginato.	42
Figura 3.21. Goma guar.	42
Figura 3.22. Quitina.	43
Figura 3.23. Quitosan.	43
Figura 3.24. Estructura de la quitina y quitosán.	43
Figura 3.25. Consumo de resinas para fundición.	44
Figura 3.26. Incremento del precio de la resina de caja fría.	45
Figura 5.1. Distribución granulométrica de la arena.	52
Figura 5.2. TGA-50 Shimadzu.	54
Figura 5.3. Molino Hobart.	55
Figura 5.4. Sopladora de laboratorio Redford Carver.	56
Figura 5.5. Sopladora de laboratorio marca Simpson Gerosa.	56
Figura 5.6. Maquina universal Simpson Gerosa.	57
Figura 5.7. Cámara húmeda marca ESPEC modelo ESL-3CA.	57
Figura 5.8. Equipo de distorsión en caliente.	58
Figura 5.9. Equipo de evolución de gases.	58
Figura 5.10. Probeta de pruebas tipo guitarra.	61
Figura 5.11. Probeta utilizada para la prueba de distorsión en caliente.	66
Figura 5.12. Representación esquemática del ensayo de distorsión en caliente.	66
Figura 5.13. Gráfica idealizada del BCIRA.	67
Figura 5.14 Equipo utilizado para realizar la pirolisis y obtener los gases condensados.	69
Figura 6.1. Análisis termogravimétrico.	71
Figura 6.2. Representación esquemática de la curva del TGA.	73
Figura 6.3. Contenido de sólidos.	74
Figura 6.4. Espectrofotometría de infrarrojo (FTIR).	76
Figura 6.5. Vida de banco de las mezclas de arena y resina.	77
Figura 6.6. Resistencia inmediata.	78
Figura 6.7. Vida de banco a 1 hora.	79
Figura 6.8. Densidad aparente de los corazones.	80

Figura 6.9. Fracción de poros.	81
Figura 6.10. Desarrollo de resistencia en ambiente.	82
Figura 6.11. Desarrollo de resistencia a 1 hora.	83
Figura 6.12. Desarrollo de resistencia a 2 horas.	83
Figura 6.13. Desarrollo de resistencia en cámara húmeda.	84
Figura 6.14. Desarrollo de resistencia a 1 hora en cámara húmeda.	85
Figura 6.15. Desarrollo de resistencia a 2 horas en cámara húmeda.	86
Figura 6.16. Efecto de la humedad relativa (%) sobre el desarrollo de resistencia a una hora.	87
Figura 6.17. Efecto de la humedad relativa (%) sobre el desarrollo de resistencia a dos horas.	88
Figura 6.18. Distorsión en caliente.	89
Figura 6.19. Distorsión máxima.	90
Figura 6.20. Tiempo en el cual ocurre la distorsión máxima.	90
Figura 6.21. Tiempo total en el cual ocurre la fractura.	91
Figura 6.22. Evolución de gas.	92
Figura 6.23. Máxima evolución de gas.	92
Figura 6.24. Razón de evolución de gas.	93
Figura 7.1 Pérdida de solventes resina caja fría.	98
Figura 7.2. A) Esquema de la reacción química idealizada en la superficie del grano con mezcla fresca. B) Reacción química en la superficie del grano con mezcla vieja (vida de banco a 1 hora).	99
Figura 7.3. Reacción de la resina parte 2 con el agua.	100
Figura 7.4. Puente de resina inorgánica afectado por la humedad.	101
Figura 7.5. Puente de resina CB.	104
Figura 7.6. Puente de resina INO.	105
Figura 7.7. Puente de resina NB.	105
Figura A1. Análisis termogravimétrico CB.	126
Figura A2. Análisis termogravimétrico HB.	127
Figura A3. Análisis termogravimétrico INO.	127

Figura A4. Análisis termogravimétrico NB.	128
Figura B1. FTIR CB.	130
Figura B2. FTIR GMB.	131
Figura B3. FTIR HB.	131
Figura B4. FTIR INO.	132
Figura B5. FTIR NB.	132
Figura I1. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina CB.	152
Figura I2. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina GMB.	153
Figura I3. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina HB.	153
Figura I4. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina INO.	154
Figura I5. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina NB.	154
Figura J1. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina CB.	162
Figura J2. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina GMB.	163
Figura J3. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina HB.	163
Figura J4. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina INO.	164
Figura J5. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina NB.	164
Figura K1. Cromatografía de gases resina CB.	168
Figura K2. Cromatografía de gases resina GMB.	169
Figura K3. Cromatografía de gases resina HB.	169
Figura K4. Cromatografía de gases resina INO.	170
Figura K5. Cromatografía de gases resina NB.	170

Apéndice A.

Análisis termogravimétrico de las resinas.

El análisis termogravimétrico (TGA) se empleó para evaluar la estabilidad térmica de las resinas, debido a que el TGA monitorea y registra los cambios de peso que ocurren en las resinas cuando son sometidas a una rampa de calentamiento; esta técnica ha sido ampliamente utilizada para el estudio de polímeros ya que proporciona información acerca de la descomposición térmica de las resinas. En este apéndice se encuentran las gráficas individuales del análisis termogravimétrico de cada una de las resinas evaluadas en esta investigación.

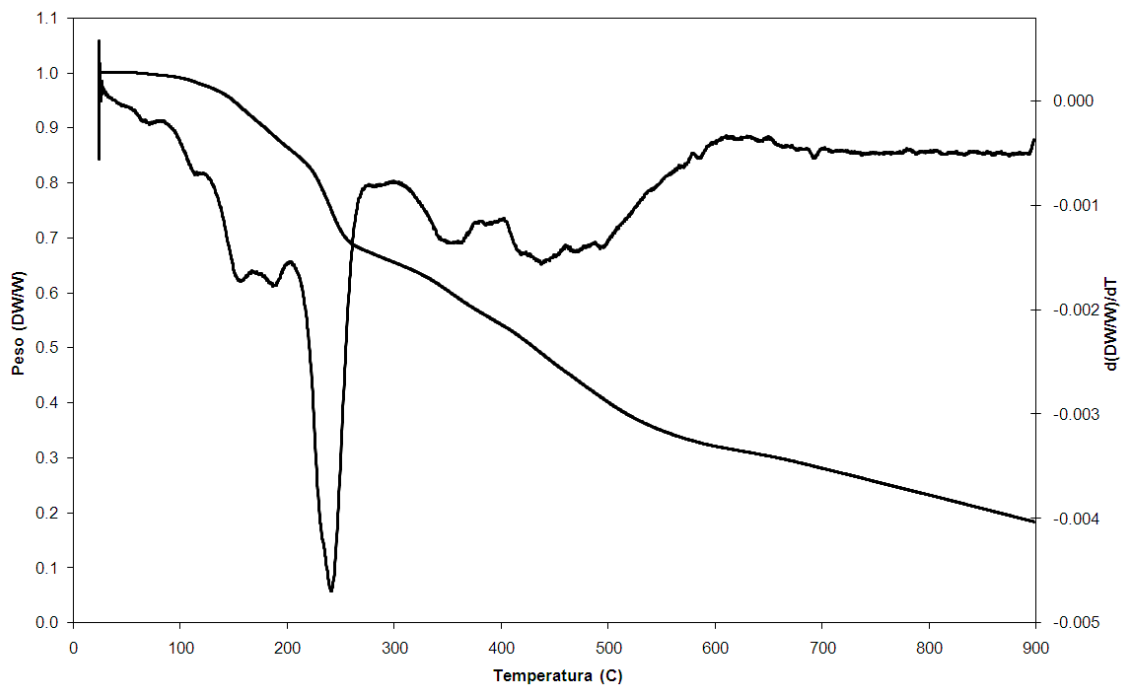


Figura A1. Análisis termogravimétrico CB.

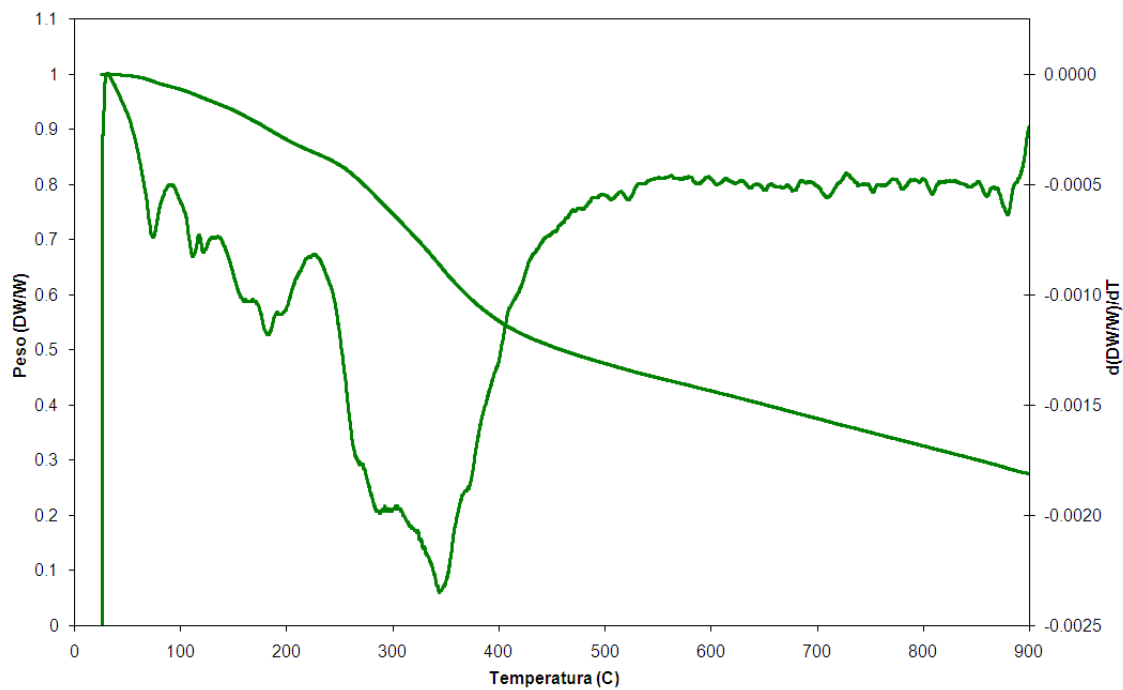


Figura A2. Análisis termogravimétrico HB.

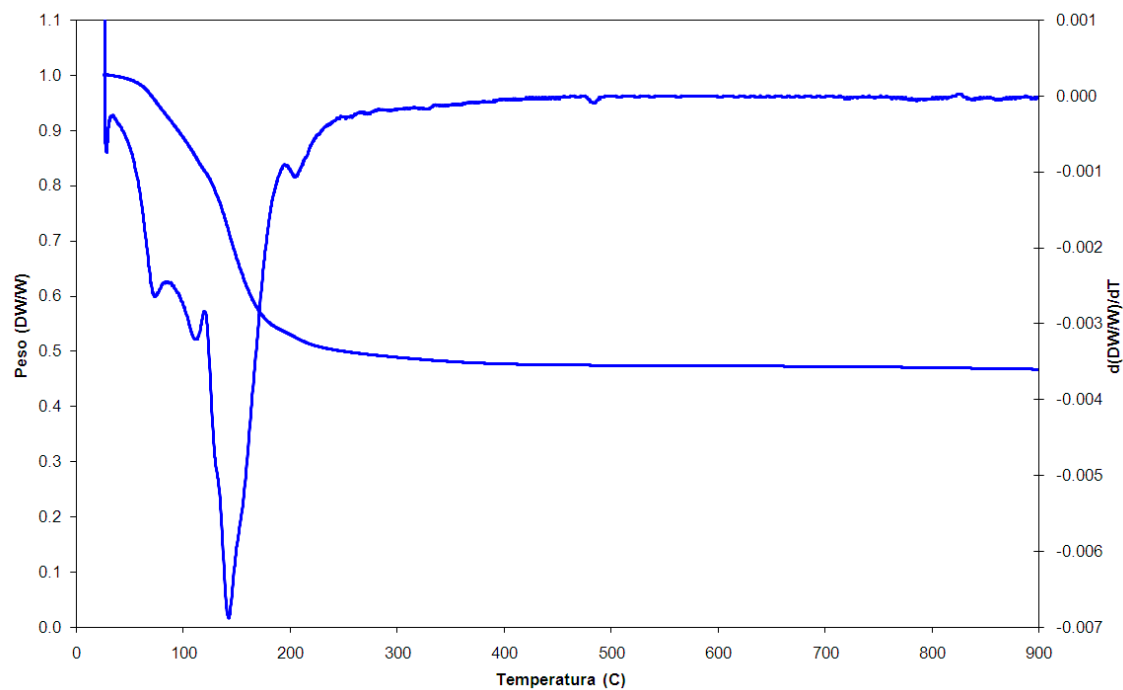


Figura A3. Análisis termogravimétrico INO.

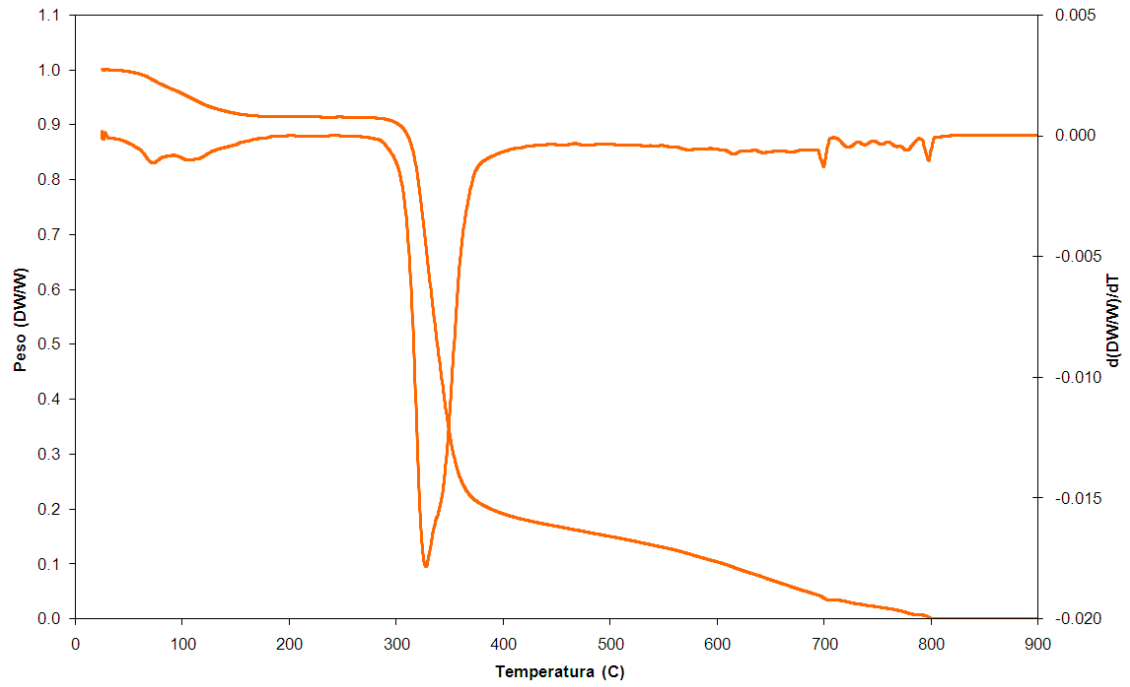


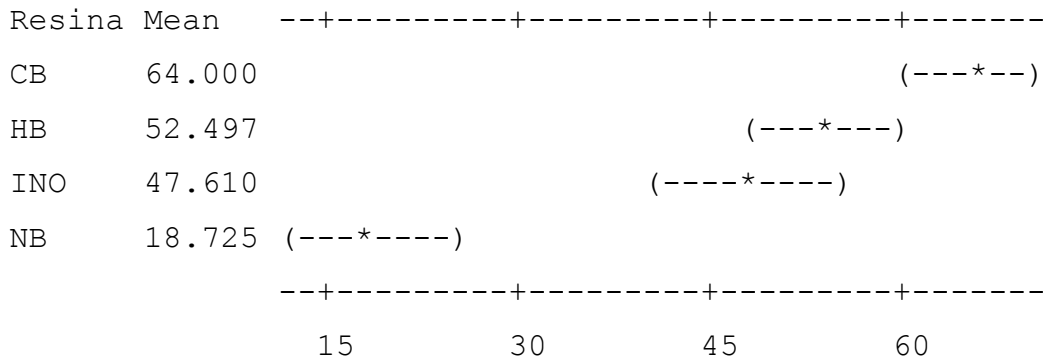
Figura A4. Análisis termogravimétrico NB.

Apéndice B.

Análisis de varianza para el contenido de sólidos de las resinas.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	3	8115.3	2705.1	35.08	0.000
Error	30	2313.7	77.1		
Total	33	10429.0			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Apéndice C.

Espectrofotometría de infrarrojo (FTIR) de la resinas.

La espectrofotometría de infrarrojo (FTIR) permite evaluar e identificar los grupos funcionales presentes en las resinas. En este apéndice se encuentran las gráficas individuales del análisis por espectrofotometría de infrarrojo de cada una de las resinas evaluadas en esta investigación.

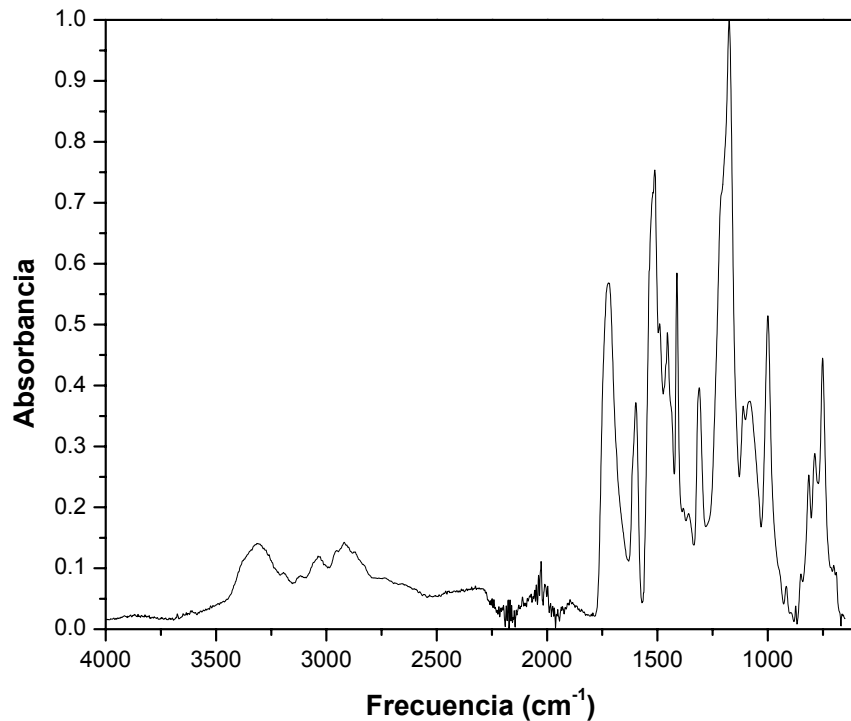


Figura B1. FTIR CB

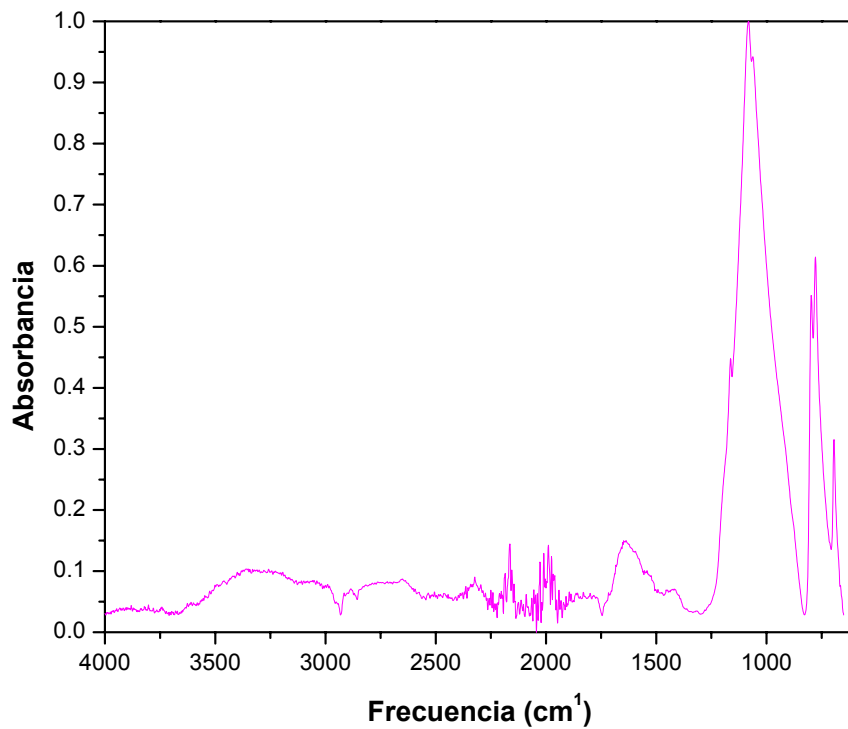


Figura B2. FTIR GMB

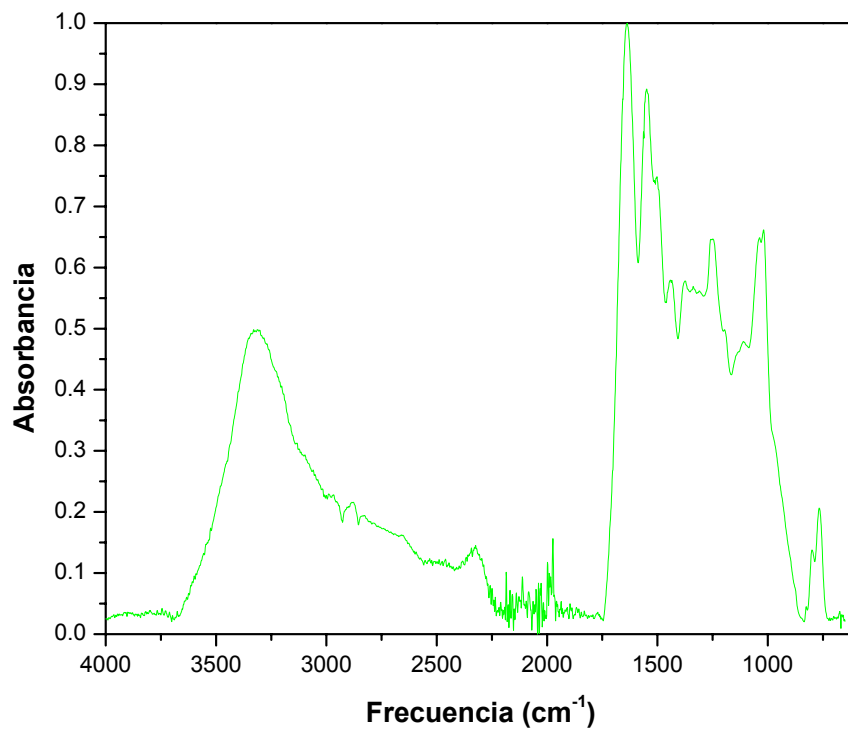


Figura B3. FTIR HB

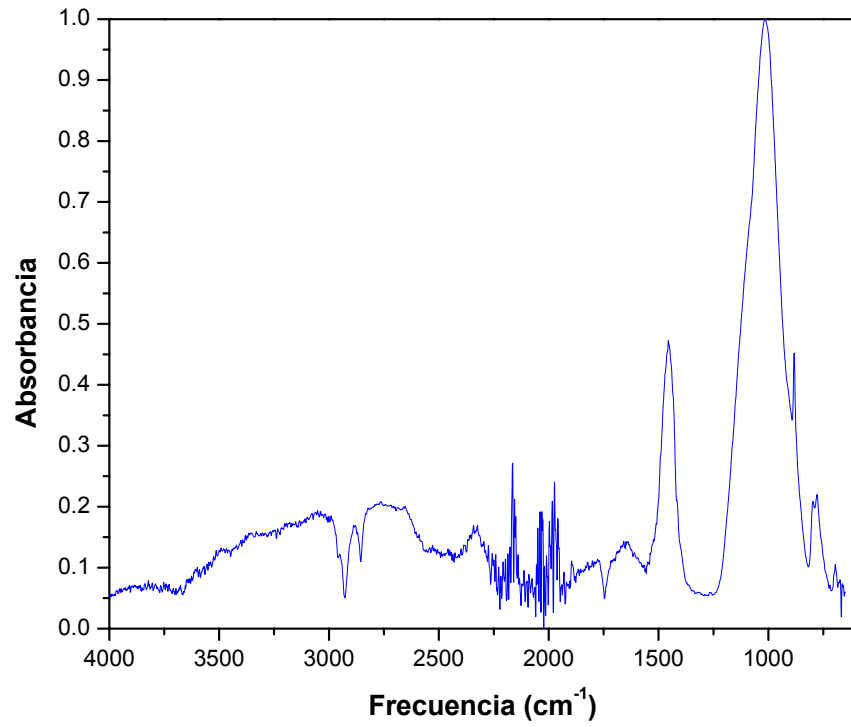


Figura B4. FTIR INO

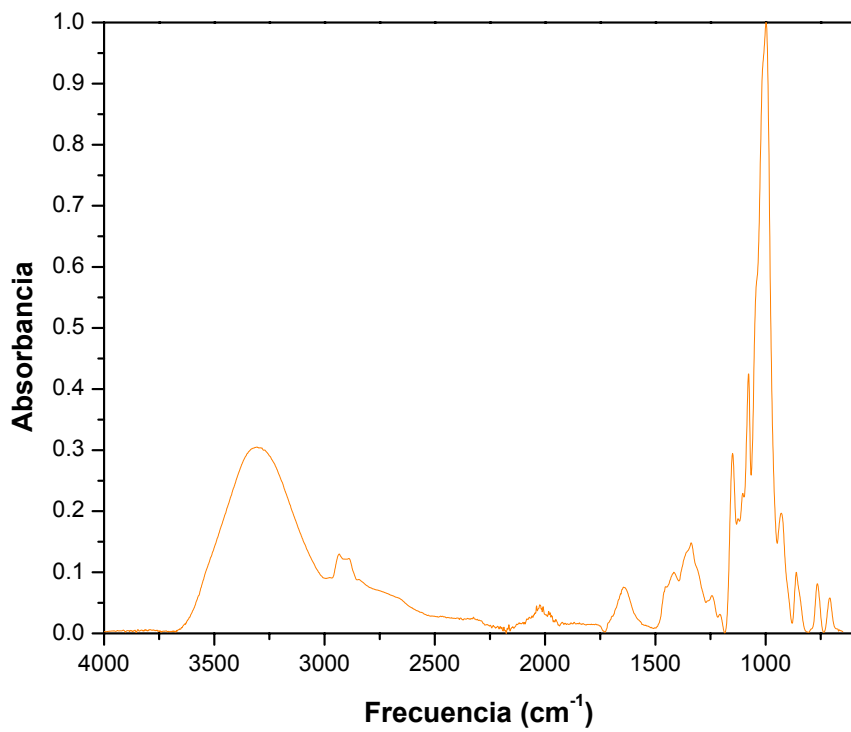


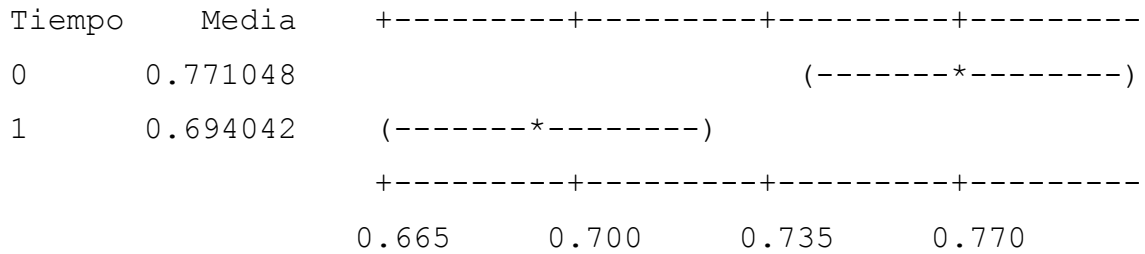
Figura B5. FTIR NB

Apéndice D.

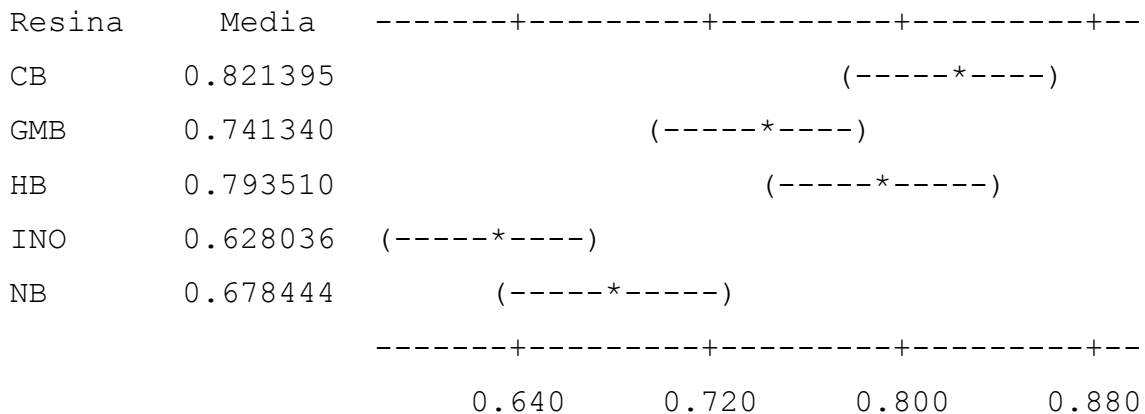
Análisis de varianza para la vida de banco.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tiempo	1	0.13343	0.133426	13.72	0.000
Resina	4	0.45968	0.114919	11.81	0.000
Interacción	4	0.00577	0.001443	0.15	0.963
Error	80	0.77821	0.009728		
Total	89	1.37708			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Pruebas simultáneas de Bonferroni.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.0801	0.03220	-2.486	0.1490
HB	-0.0279	0.03220	-0.866	1.0000
INO	-0.1934	0.03220	-6.004	0.0000
NB	-0.1430	0.03220	-4.439	0.0003

DM = Diferencia de medias

DES = Diferencia del error estándar

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.0522	0.03220	1.620	1.0000
INO	-0.1133	0.03220	-3.518	0.0070
NB	-0.0629	0.03220	-1.953	0.5413

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.1655	0.03220	-5.139	0.0000
NB	-0.1151	0.03220	-3.573	0.0059

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.05041	0.03220	1.565	1.000

Pruebas simultáneas de Sidak.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.0801	0.03220	-2.486	0.1394

HB	-0.0279	0.03220	-0.866	0.9927
INO	-0.1934	0.03220	-6.004	0.0000
NB	-0.1430	0.03220	-4.439	0.0003

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.0522	0.03220	1.620	0.6845
INO	-0.1133	0.03220	-3.518	0.0070
NB	-0.0629	0.03220	-1.953	0.4268

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.1655	0.03220	-5.139	0.0000
NB	-0.1151	0.03220	-3.573	0.0059

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.05041	0.03220	1.565	0.7255

Pruebas simultáneas de Tukey.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.0801	0.03220	-2.486	0.1036
HB	-0.0279	0.03220	-0.866	0.9085
INO	-0.1934	0.03220	-6.004	0.0000
NB	-0.1430	0.03220	-4.439	0.0003

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.0522	0.03220	1.620	0.4890
INO	-0.1133	0.03220	-3.518	0.0062
NB	-0.0629	0.03220	-1.953	0.2980

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.1655	0.03220	-5.139	0.0000
NB	-0.1151	0.03220	-3.573	0.0052

Tipo de resina = INO:

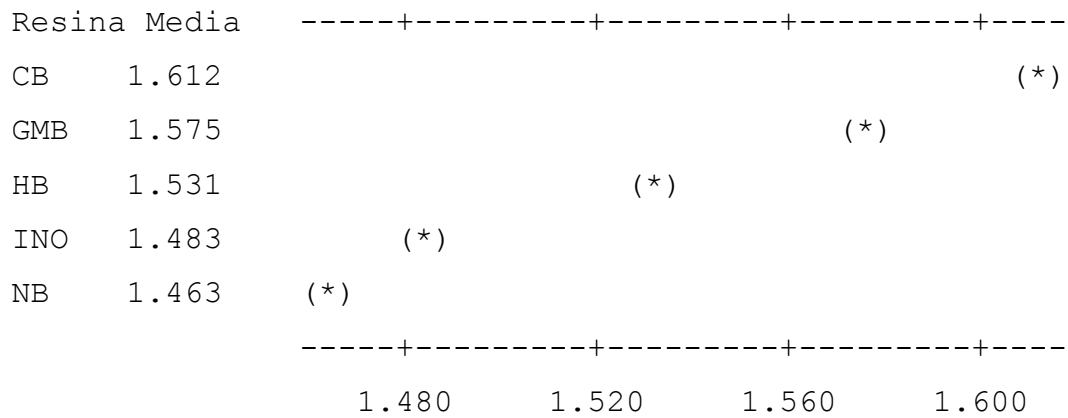
Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.05041	0.03220	1.565	0.5236

Apéndice E.

Análisis de varianza de la densidad aparente de los corazones.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	0.2766751	0.0691688	930.99	0.000
Error	85	0.0063151	0.0000743		
Total	89	0.2829902			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.

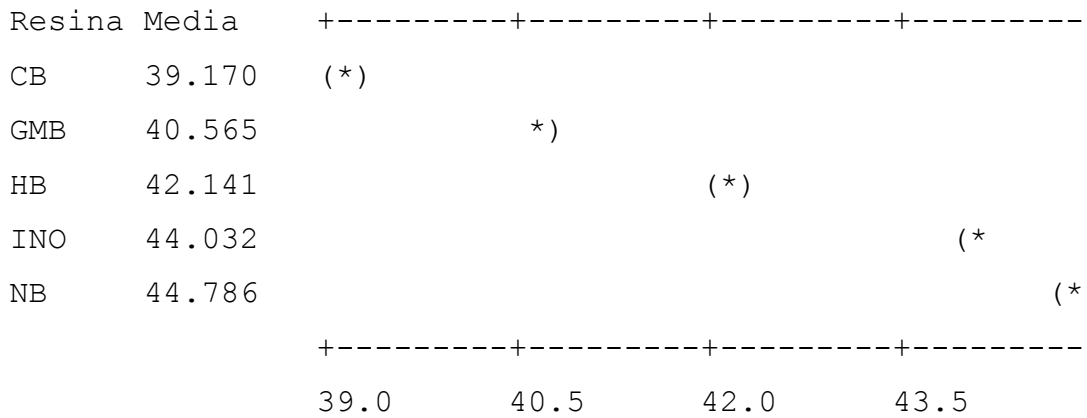


Apéndice F.

Análisis de varianza para la fracción de posos de los corazones.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	393.8932	98.4733	1146.48	0.000
Error	84	7.2149	0.0859		
Total	88	401.1081			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada



Apéndice G.

Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia de los corazones.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tiempo	2	14.9673	7.48364	671.94	0.000
Resina	4	5.8610	1.46526	131.56	0.000
Interacción	8	3.5484	0.44355	39.83	0.000
Error	120	1.3365	0.01114		
Total	134	25.7132			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.

Tiempo	Media	
0	0.77105	(-*)
1	1.44609	(*-)
2	1.50499	(*-)

---+-----+-----+-----+-----
 0.80 1.00 1.20 1.40

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.

Resina	Media	
CB	1.15076	(-*-)
GMB	1.11833	(-*-)
HB	1.42165	(-*-)
INO	1.53993	(-*-)
NB	0.97288	(-*-)

---+-----+-----+-----+-----

1.00 1.20 1.40 1.60

Pruebas simultáneas de Bonferroni.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.0324	0.05317	-0.610	1.0000
HB	0.2709	0.05317	5.095	0.0000
INO	0.3892	0.05317	7.320	0.0000
NB	-0.1779	0.05317	-3.346	0.0108

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.3033	0.05317	5.705	0.0000
INO	0.4216	0.05317	7.930	0.0000
NB	-0.1455	0.05317	-2.736	0.0711

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	0.1183	0.05317	2.225	0.2785
NB	-0.4488	0.05317	-8.441	0.0000

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	-0.5671	0.05317	-10.67	0.0000

Pruebas simultáneas de Sidak.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.0324	0.05317	-0.610	0.9996
HB	0.2709	0.05317	5.095	0.0000

INO	0.3892	0.05317	7.320	0.0000
NB	-0.1779	0.05317	-3.346	0.0107

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.3033	0.05317	5.705	0.0000
INO	0.4216	0.05317	7.930	0.0000
NB	-0.1455	0.05317	-2.736	0.0689

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	0.1183	0.05317	2.225	0.2461
NB	-0.4488	0.05317	-8.441	0.0000

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	-0.5671	0.05317	-10.67	0.0000

Pruebas simultáneas de Tukey.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.0324	0.05317	-0.610	0.9733
HB	0.2709	0.05317	5.095	0.0000
INO	0.3892	0.05317	7.320	0.0000
NB	-0.1779	0.05317	-3.346	0.0094

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.3033	0.05317	5.705	0.0000
INO	0.4216	0.05317	7.930	0.0000
NB	-0.1455	0.05317	-2.736	0.0543

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	0.1183	0.05317	2.225	0.1773
NB	-0.4488	0.05317	-8.441	0.0000

Tipo de resina = INO:

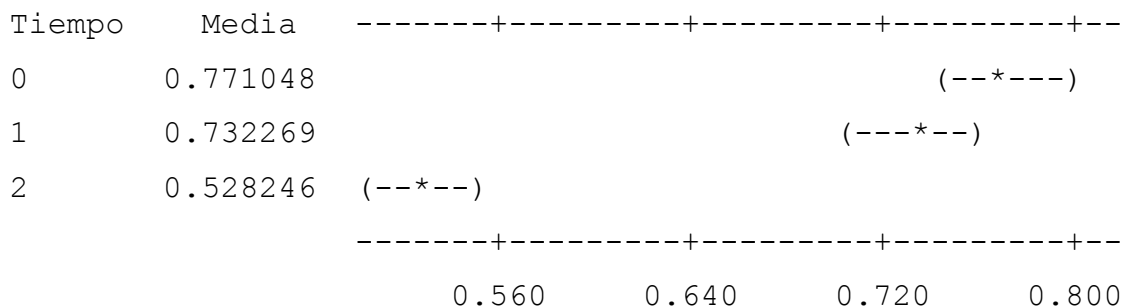
Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	-0.5671	0.05317	-10.67	0.0000

Apéndice H.

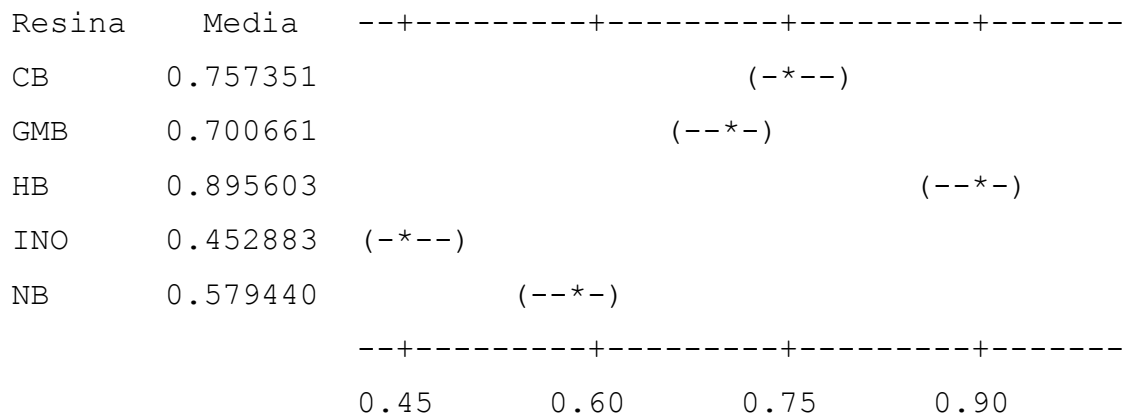
Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia de los corazones en la cámara húmeda.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tiempo	2	1.53124	0.765619	86.90	0.000
Resina	4	3.09284	0.773209	87.76	0.000
Interacción	8	0.92158	0.115198	13.07	0.000
Error	120	1.05728	0.008811		
Total	134	6.60294			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



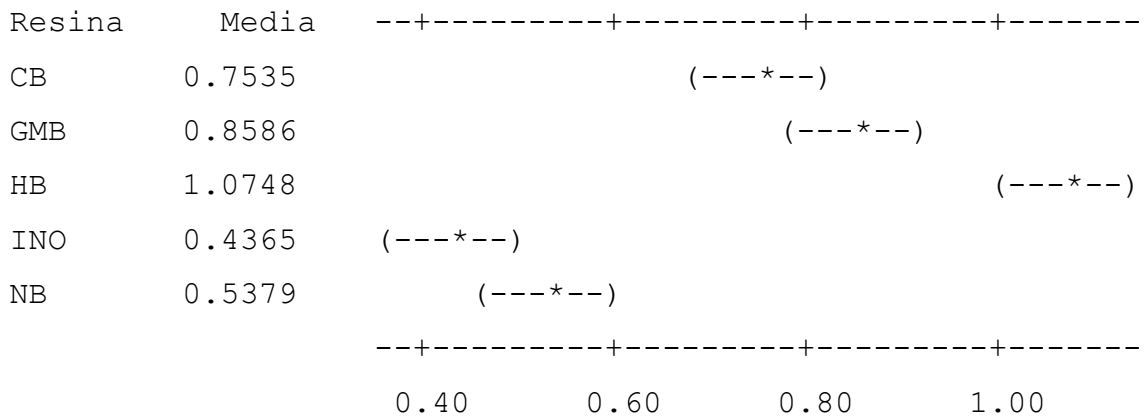
ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia a 1 hora de los corazones en cámara húmeda.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	2.3312	0.5828	53.17	0.000
Error	40	0.4384	0.0110		
Total	44	2.7696			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Pruebas simultáneas de Bonferroni.

Resina = CB

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	0.1051	0.04935	2.130	0.3941
HB	0.3213	0.04935	6.510	0.0000
INO	-0.3170	0.04935	-6.423	0.0000
NB	-0.2157	0.04935	-4.370	0.0009

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.2162	0.04935	4.380	0.0008
INO	-0.4221	0.04935	-8.553	0.0000
NB	-0.3208	0.04935	-6.499	0.0000

Resina = HB

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.6383	0.04935	-12.93	0.0000
NB	-0.5369	0.04935	-10.88	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.1014	0.04935	2.054	0.4659

Pruebas simultáneas de Sidak.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	0.1051	0.04935	2.130	0.3310
HB	0.3213	0.04935	6.510	0.0000
INO	-0.3170	0.04935	-6.423	0.0000
NB	-0.2157	0.04935	-4.370	0.0009

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.2162	0.04935	4.380	0.0008
INO	-0.4221	0.04935	-8.553	0.0000
NB	-0.3208	0.04935	-6.499	0.0000

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.6383	0.04935	-12.93	0.0000
NB	-0.5369	0.04935	-10.88	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.1014	0.04935	2.054	0.3794

Pruebas simultáneas de Tukey.

Tipo de Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	0.1051	0.04935	2.130	0.2279
HB	0.3213	0.04935	6.510	0.0000
INO	-0.3170	0.04935	-6.423	0.0000
NB	-0.2157	0.04935	-4.370	0.0008

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.2162	0.04935	4.380	0.0008
INO	-0.4221	0.04935	-8.553	0.0000
NB	-0.3208	0.04935	-6.499	0.0000

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.6383	0.04935	-12.93	0.0000
NB	-0.5369	0.04935	-10.88	0.0000

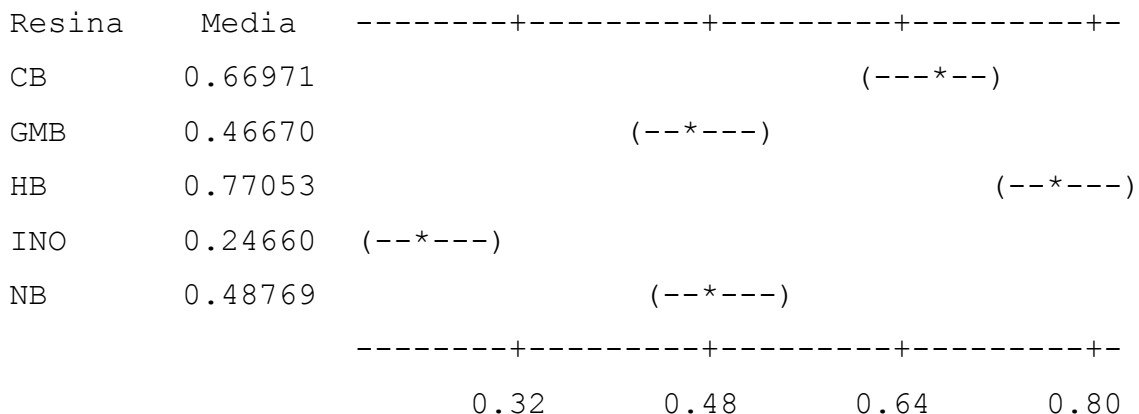
Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.1014	0.04935	2.054	0.2601

Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia a 2 horas de los corazones en cámara húmeda.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	1.47122	0.36780	53.95	0.000
Error	40	0.27268	0.00682		
Total	44	1.74390			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Pruebas simultáneas de Bonferroni.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.2030	0.03892	-5.22	0.0001
HB	0.1008	0.03892	2.59	0.1332
INO	-0.4231	0.03892	-10.87	0.0000
NB	-0.1820	0.03892	-4.68	0.0003

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.3038	0.03892	7.806	0.0000
INO	-0.2201	0.03892	-5.655	0.0000
NB	0.0210	0.03892	0.539	1.0000

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.5239	0.03892	-13.46	0.0000
NB	-0.2828	0.03892	-7.27	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.2411	0.03892	6.194	0.0000

Pruebas simultáneas de Sidak.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.2030	0.03892	-5.22	0.0001
HB	0.1008	0.03892	2.59	0.1255
INO	-0.4231	0.03892	-10.87	0.0000
NB	-0.1820	0.03892	-4.68	0.0003

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.3038	0.03892	7.806	0.0000
INO	-0.2201	0.03892	-5.655	0.0000
NB	0.0210	0.03892	0.539	0.9999

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.5239	0.03892	-13.46	0.0000
NB	-0.2828	0.03892	-7.27	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.2411	0.03892	6.194	0.0000

Pruebas simultáneas de Tukey.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	-0.2030	0.03892	-5.22	0.0001
HB	0.1008	0.03892	2.59	0.0915
INO	-0.4231	0.03892	-10.87	0.0000
NB	-0.1820	0.03892	-4.68	0.0003

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	0.3038	0.03892	7.806	0.0000
INO	-0.2201	0.03892	-5.655	0.0000
NB	0.0210	0.03892	0.539	0.9826

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-0.5239	0.03892	-13.46	0.0000
NB	-0.2828	0.03892	-7.27	0.0000

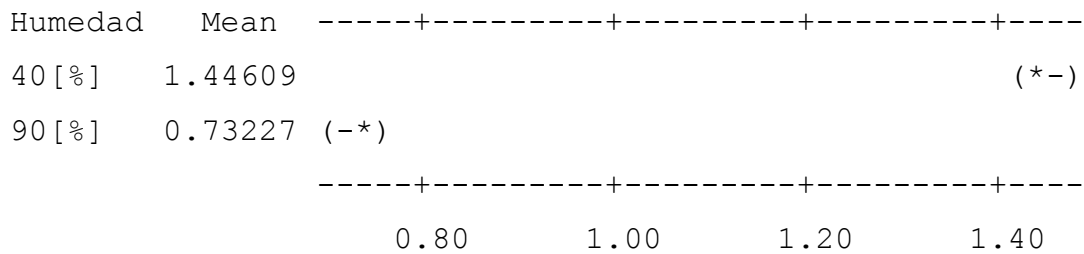
Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	0.2411	0.03892	6.194	0.0000

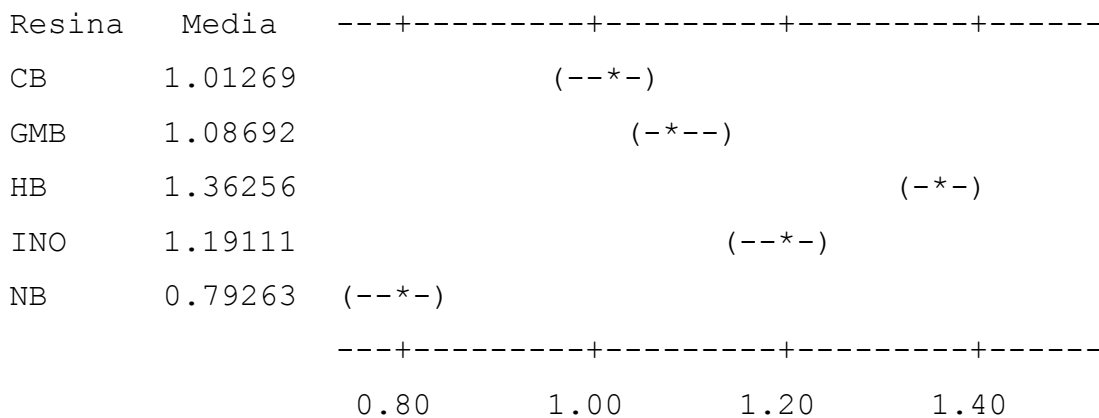
Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia a 1 hora versus la humedad relativa (%).

Fuente	GL	SC	MC	F	P
% Humedad	1	11.4647	11.4647	1190.33	0.000
Resina	4	3.2206	0.8052	83.60	0.000
Interacción	4	3.5904	0.8976	93.19	0.000
Error	80	0.7705	0.0096		
Total	89	19.0462			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



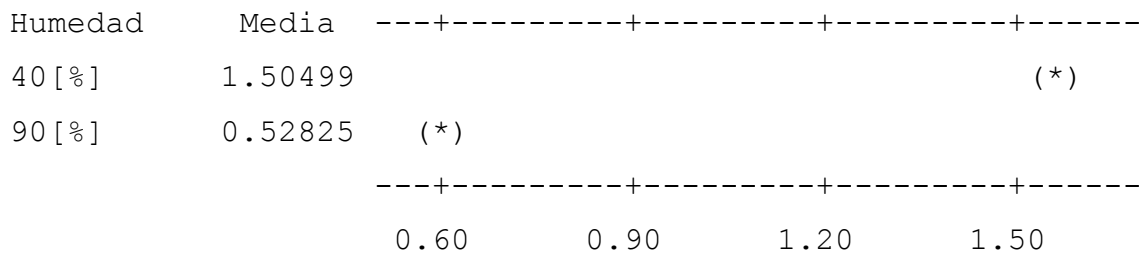
ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



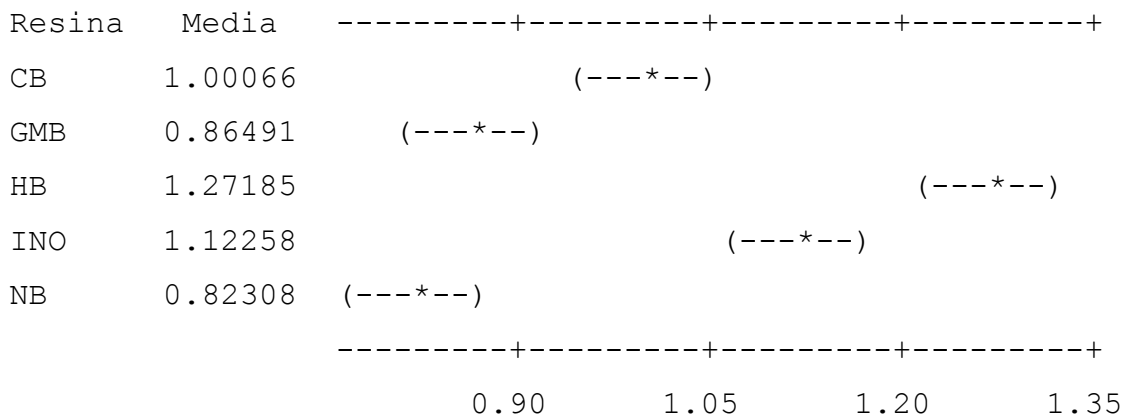
Análisis de varianza para el desarrollo de resistencia a 2 horas versus la humedad relativa (%).

Fuente	GL	SC	MC	F	P
% Humedad	1	21.4656	21.4656	1844.67	0.000
Resina	4	2.4678	0.6170	53.02	0.000
Interacción	4	3.7210	0.9302	79.94	0.000
Error	80	0.9309	0.0116		
Total	89	28.5853			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Apéndice I.

Distorsión en caliente (BCIRA).

Esta prueba fue desarrollada por la Asociación Británica de Investigación de Fundición de Hierro en 1966 y es conocida por sus siglas en inglés BCIRA (British Cast Iron Research Association). Está diseñada para evaluar la expansión y la termoplasticidad de los corazones a alta temperatura. Lo cual es indispensable para resolver problemas dimensionales relacionados con los corazones.

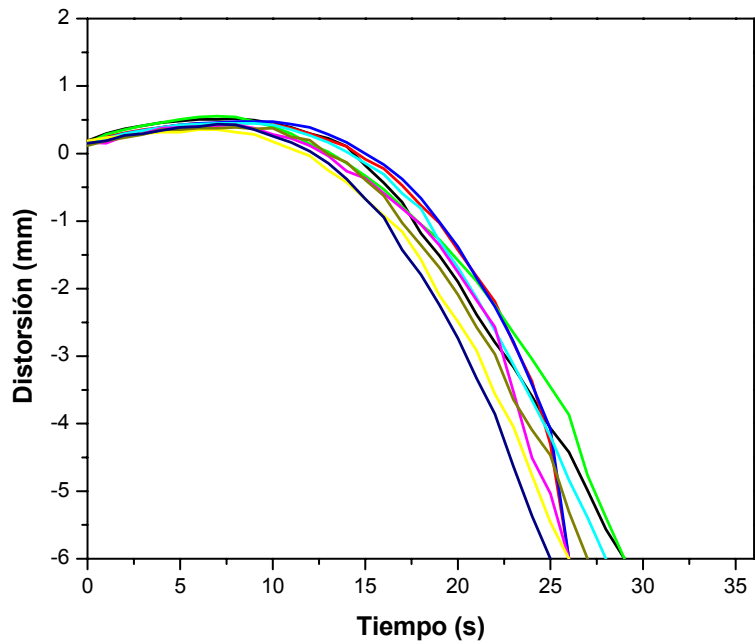


Figura I1. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina CB.

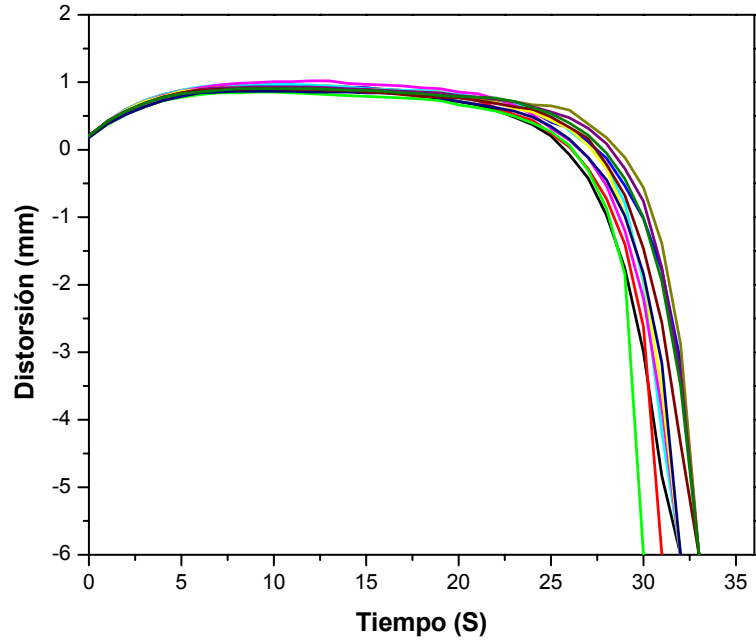


Figura I2. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina GMB.

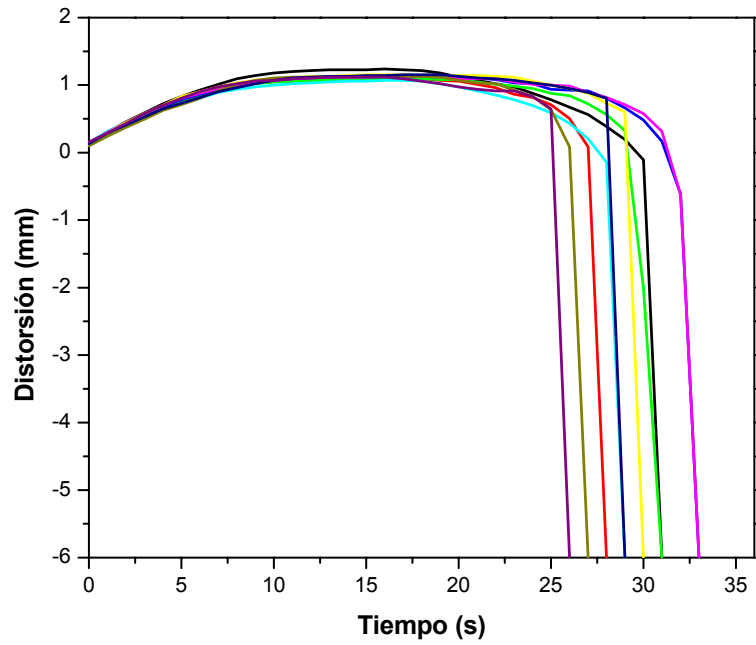


Figura I3. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina HB.

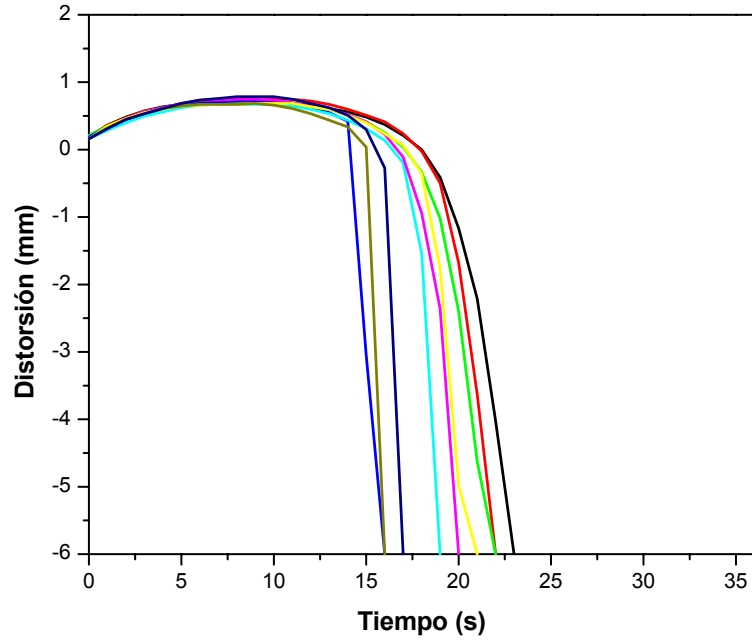


Figura I4. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina INO.

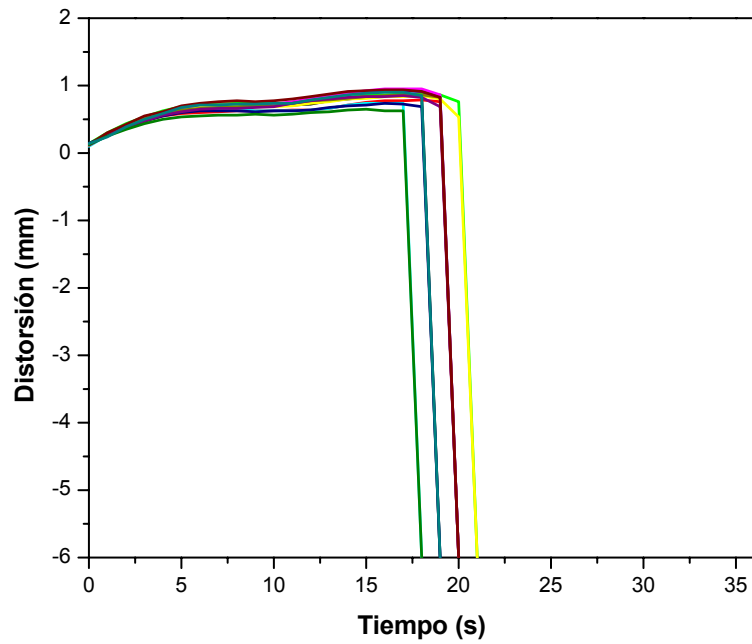
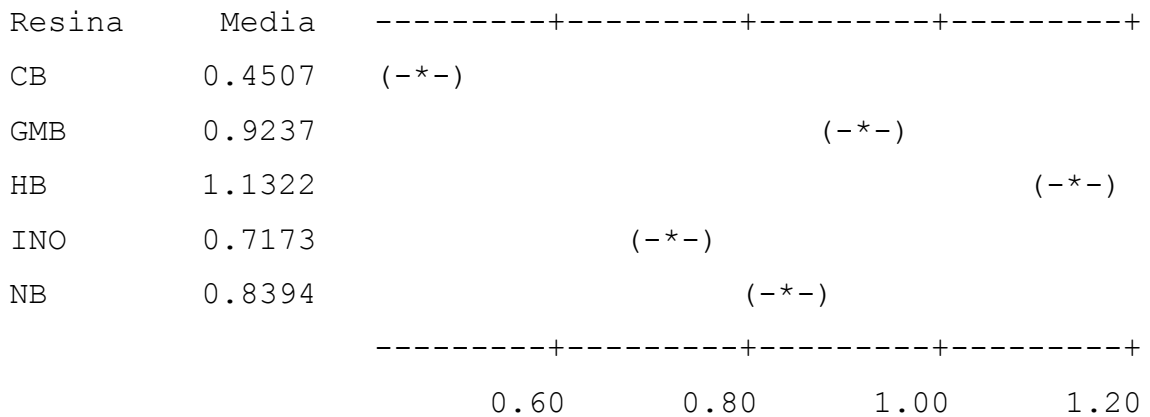


Figura I5. Distorsión en caliente de los corazones fabricados con resina NB.

Análisis de varianza para la distorsión máxima en milímetros.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	2.42825	0.60706	165.20	0.000
Error	48	0.17639	0.00367		
Total	52	2.60464			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Análisis de varianza para el tiempo en el cual ocurre la distorsión máxima.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	792.97	198.24	140.46	0.000
Error	48	67.75	1.41		
Total	52	860.72			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.

Resina	Media	-----+-----+-----+-----+---
CB	7.667	(--*-)
GMB	9.083	(-*--)
HB	15.800	(--*-)
INO	8.333	(--*-)
NB	16.462	(-*--)
		-----+-----+-----+-----+---
		9.0 12.0 15.0 18.0

Pruebas simultaneas de Bonferroni.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	1.4167	0.5239	2.704	0.0944
HB	8.1333	0.5459	14.900	0.0000
INO	0.6667	0.5600	1.190	1.0000
NB	8.7949	0.5152	17.072	0.0000

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	6.7167	0.5087	13.204	0.0000
INO	-0.7500	0.5239	-1.432	1.0000
NB	7.3782	0.4756	15.514	0.0000

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-7.467	0.5459	-13.68	0.0000
NB	0.662	0.4997	1.32	1.0000

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	8.128	0.5152	15.78	0.0000

Pruebas simultaneas de Sidak.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	1.4167	0.5239	2.704	0.0905
HB	8.1333	0.5459	14.900	0.0000
INO	0.6667	0.5600	1.190	0.9355
NB	8.7949	0.5152	17.072	0.0000

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	6.7167	0.5087	13.204	0.0000
INO	-0.7500	0.5239	-1.432	0.8224
NB	7.3782	0.4756	15.514	0.0000

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-7.467	0.5459	-13.68	0.0000
NB	0.662	0.4997	1.32	0.8811

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	8.128	0.5152	15.78	0.0000

Pruebas simultaneas de Tukey.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	1.4167	0.5239	2.704	0.0681
HB	8.1333	0.5459	14.900	0.0000
INO	0.6667	0.5600	1.190	0.7568
NB	8.7949	0.5152	17.072	0.0000

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	6.7167	0.5087	13.204	0.0000
INO	-0.7500	0.5239	-1.432	0.6107
NB	7.3782	0.4756	15.514	0.0000

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-7.467	0.5459	-13.68	0.0000
NB	0.662	0.4997	1.32	0.6779

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	8.128	0.5152	15.78	0.0000

Análisis de varianza para el tiempo total en el cual ocurre la fractura.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	1506.91	376.73	123.76	0.000
Error	48	146.11	3.04		
Total	52	1653.02			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.

Resina	Media	ICs
CB	26.889	(--*--)
GMB	32.167	(-*--)
HB	29.700	(--*--)
INO	19.556	(--*--)
NB	19.538	(--*-)

-----+-----+-----+-----+-----
 20.0 24.0 28.0 32.0

Pruebas simultaneas de Bonferroni.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	5.278	0.7693	6.860	0.0000
HB	2.811	0.8016	3.507	0.0099
INO	-7.333	0.8225	-8.916	0.0000
NB	-7.350	0.7565	-9.716	0.0000

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	-2.47	0.7470	-3.30	0.0182
INO	-12.61	0.7693	-16.39	0.0000
NB	-12.63	0.6984	-18.08	0.0000

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-10.14	0.8016	-12.65	0.0000
NB	-10.16	0.7339	-13.85	0.0000

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	-0.01709	0.7565	-0.02259	1.000

Pruebas simultaneas de Sidak.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	5.278	0.7693	6.860	0.0000
HB	2.811	0.8016	3.507	0.0099
INO	-7.333	0.8225	-8.916	0.0000
NB	-7.350	0.7565	-9.716	0.0000

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	-2.47	0.7470	-3.30	0.0180
INO	-12.61	0.7693	-16.39	0.0000
NB	-12.63	0.6984	-18.08	0.0000

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-10.14	0.8016	-12.65	0.0000
NB	-10.16	0.7339	-13.85	0.0000

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	-0.01709	0.7565	-0.02259	1.000

Pruebas simultaneas de Tukey.

Tipo de resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	5.278	0.7693	6.860	0.0000
HB	2.811	0.8016	3.507	0.0084
INO	-7.333	0.8225	-8.916	0.0000
NB	-7.350	0.7565	-9.716	0.0000

Tipo de resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	-2.47	0.7470	-3.30	0.0149
INO	-12.61	0.7693	-16.39	0.0000
NB	-12.63	0.6984	-18.08	0.0000

Tipo de resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-10.14	0.8016	-12.65	0.0000
NB	-10.16	0.7339	-13.85	0.0000

Tipo de resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	-0.01709	0.7565	-0.02259	1.000

Apéndice J.

Evolución de gas.

La cantidad de gas generada por un corazón es un factor muy importante para cuantificar en el momento de evaluar un sistema de resinas, debido a que permite saber la cantidad de gas que generará un corazón al momento de estar en contacto con el metal líquido y al tener diferentes formulaciones en las resinas,

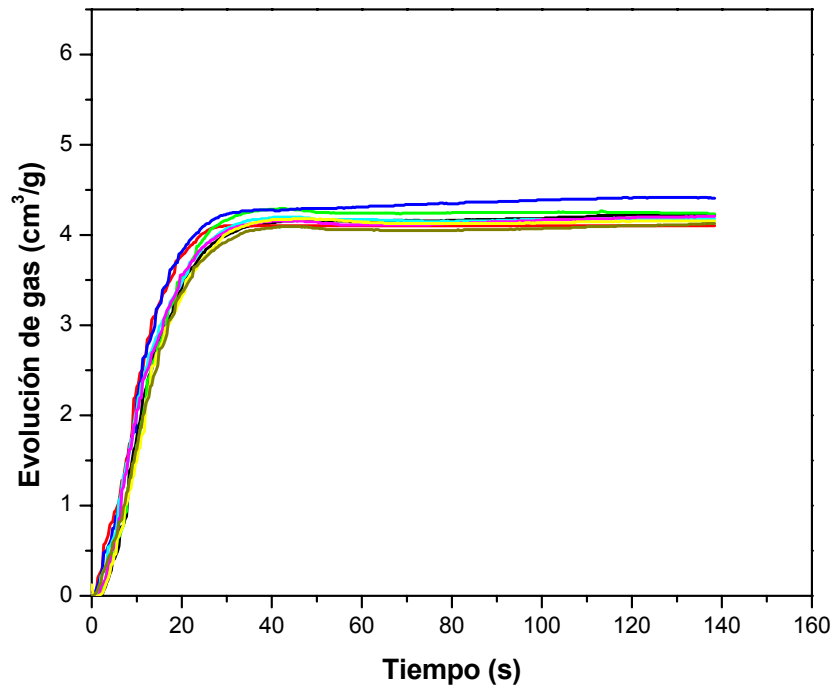


Figura J1. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina CB.

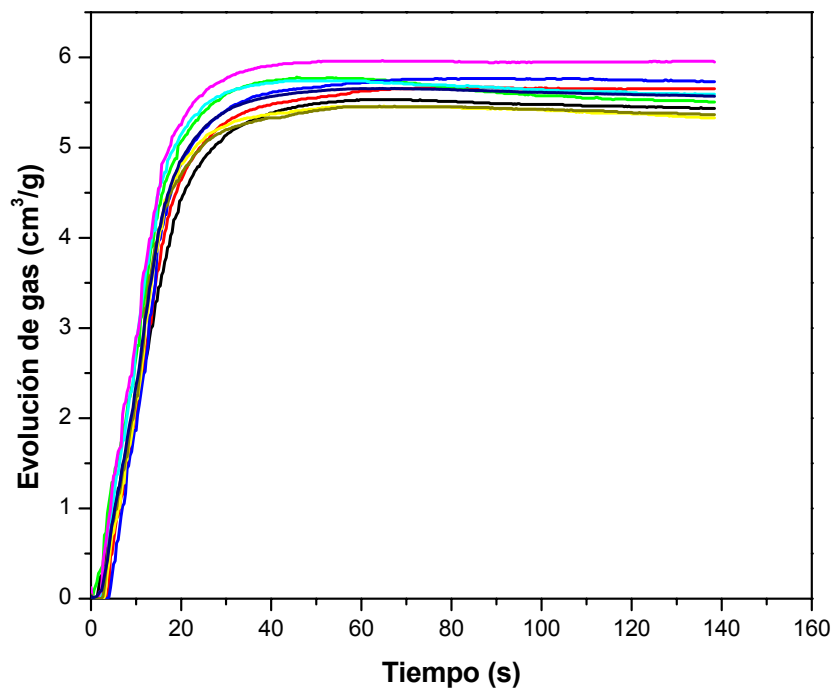


Figura J2. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina GMB.

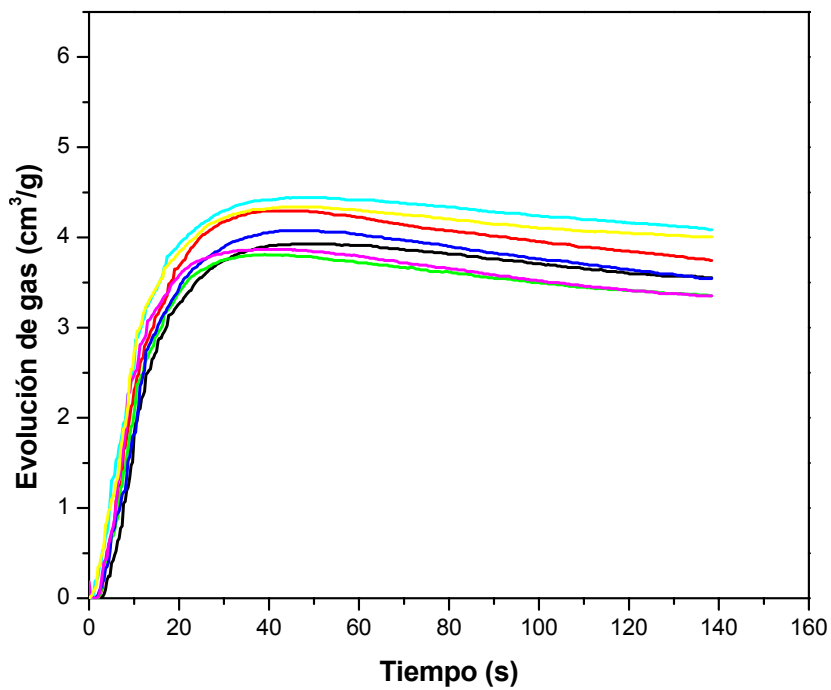


Figura J3. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina HB.

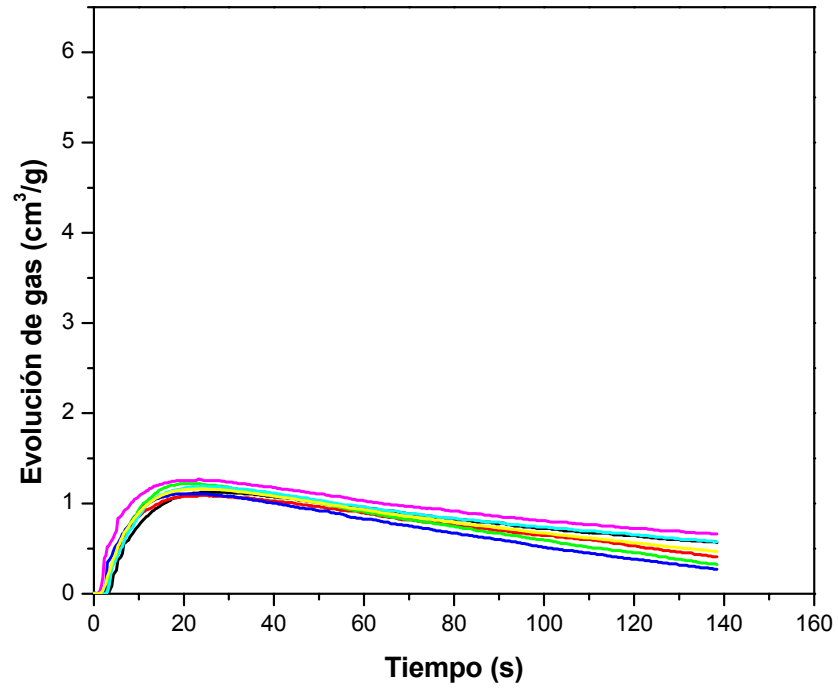


Figura J4. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina INO.

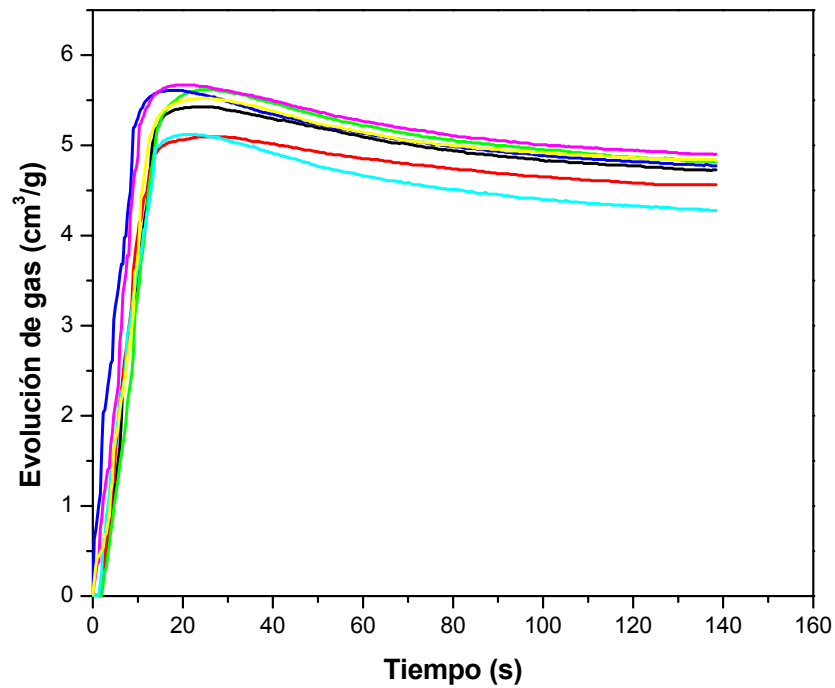
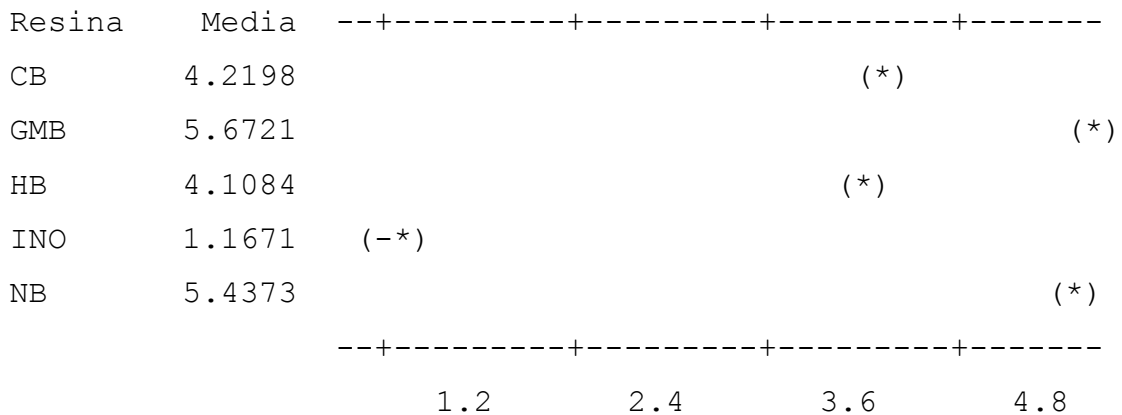


Figura J5. Evolución de gas de los corazones fabricados con resina NB.

Análisis de varianza para la máxima evolución de gas.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Resina	4	83.2202	20.8051	624.79	0.000
Error	31	1.0323	0.0333		
Total	35	84.2525			

ICs del 95% individual para la media basados en la desviación estándar agrupada.



Pruebas simultaneas de Bonferroni.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	1.452	0.09124	15.92	0.0000
HB	-0.111	0.09444	-1.18	1.0000
INO	-3.053	0.09855	-30.98	0.0000
NB	1.217	0.09444	12.89	0.0000

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	-1.564	0.09444	-16.56	0.0000
INO	-4.505	0.09855	-45.71	0.0000
NB	-0.235	0.09444	-2.49	0.1849

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-2.941	0.10152	-28.97	0.0000
NB	1.329	0.09754	13.62	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	4.270	0.1015	42.06	0.0000

Pruebas simultaneas de Sidak.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	1.452	0.09124	15.92	0.0000
HB	-0.111	0.09444	-1.18	0.9416
INO	-3.053	0.09855	-30.98	0.0000
NB	1.217	0.09444	12.89	0.0000

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	-1.564	0.09444	-16.56	0.0000
INO	-4.505	0.09855	-45.71	0.0000
NB	-0.235	0.09444	-2.49	0.1702

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-2.941	0.10152	-28.97	0.0000
NB	1.329	0.09754	13.62	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	4.270	0.1015	42.06	0.0000

Pruebas simultaneas de Tukey.

Resina = CB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
GMB	1.452	0.09124	15.92	0.0000
HB	-0.111	0.09444	-1.18	0.7630
INO	-3.053	0.09855	-30.98	0.0000
NB	1.217	0.09444	12.89	0.0000

Resina = GMB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
HB	-1.564	0.09444	-16.56	0.0000
INO	-4.505	0.09855	-45.71	0.0000
NB	-0.235	0.09444	-2.49	0.1198

Resina = HB:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
INO	-2.941	0.10152	-28.97	0.0000
NB	1.329	0.09754	13.62	0.0000

Resina = INO:

Resina	DM	DES	T-Value	P-Value
NB	4.270	0.1015	42.06	0.0000

Apéndice K.

Cromatografía de gases.

Actualmente existen muchos esfuerzos por reducir las emisiones al aire generadas por la industria de la fundición. Sin embargo, estas emisiones siguen siendo uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la industria de la fundición. Por tal motivo se decidió caracterizar los gases generados por la pirolisis de los corazones e identificar mediante cromatografía de gases masas los compuestos emitidos por las resinas utilizadas en esta investigación.

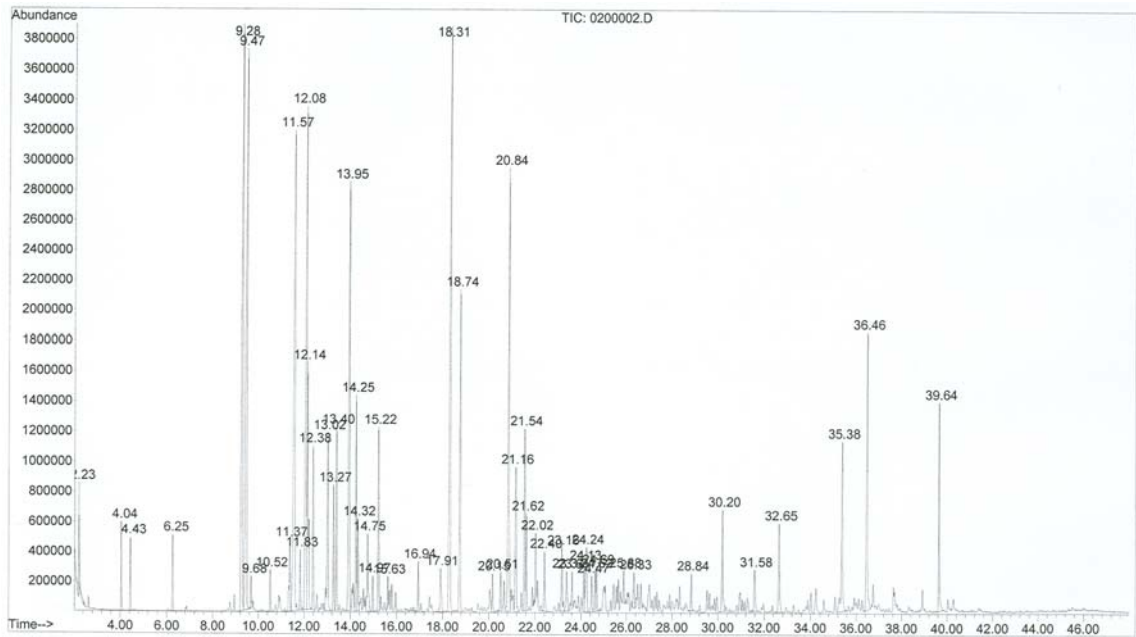


Figura K1. Cromatografía de gases resina CB.

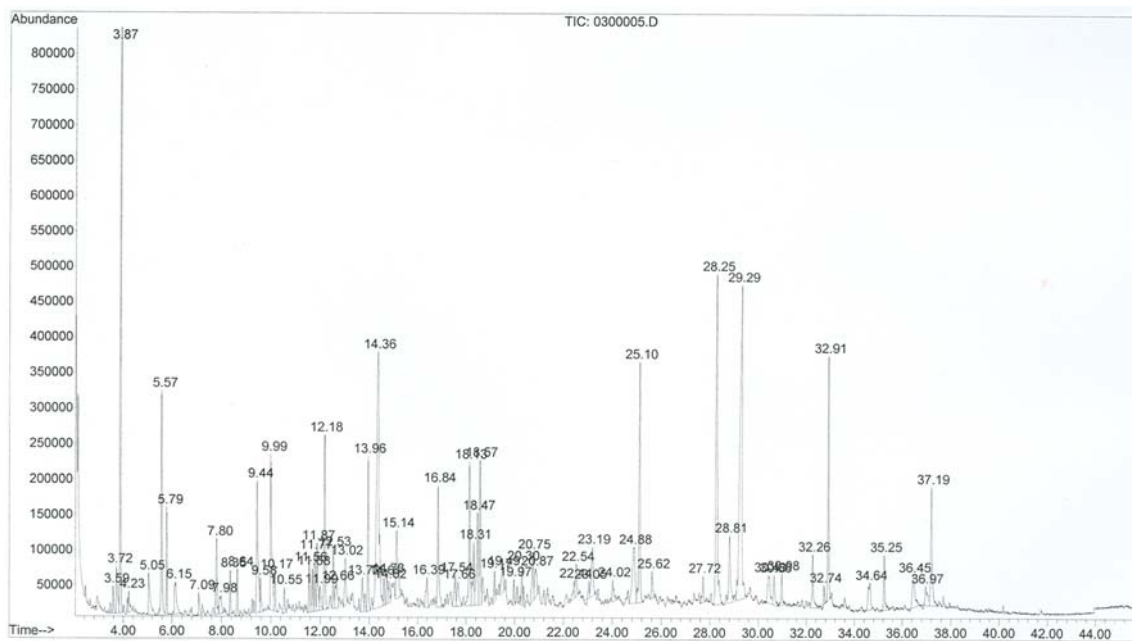


Figura K2. Cromatografía de gases resina GMB.

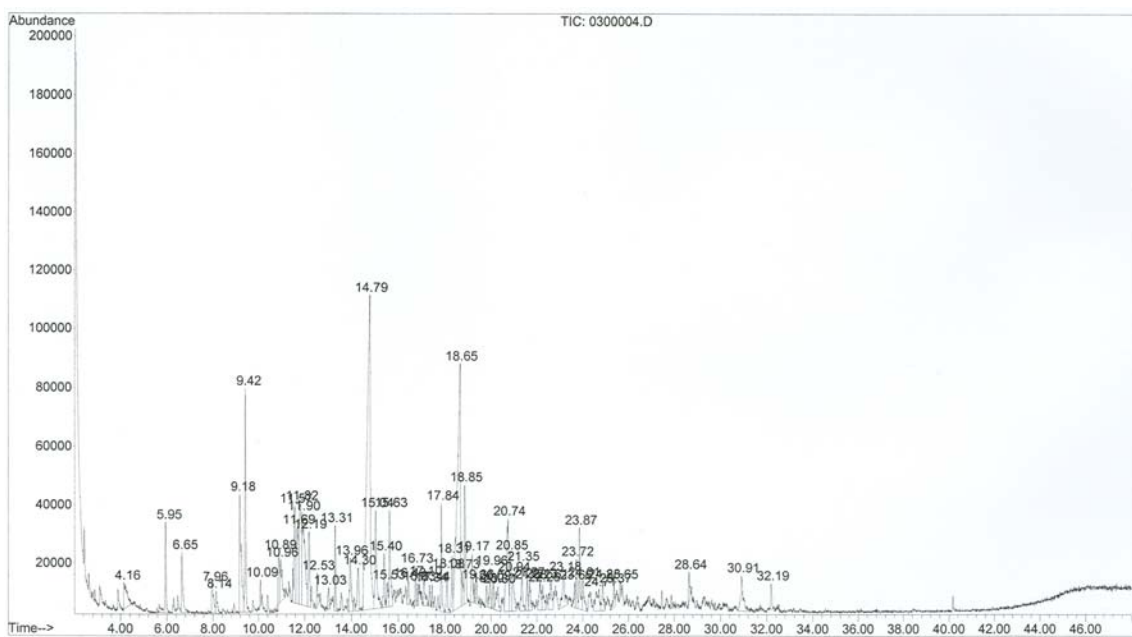


Figura K3. Cromatografía de gases resina HB.

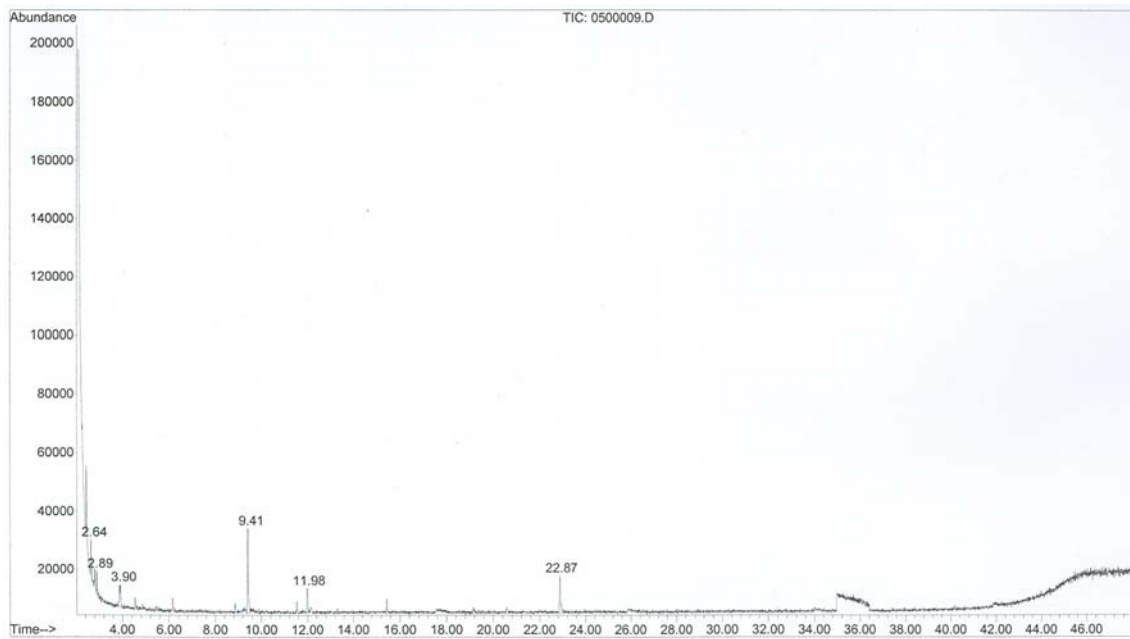


Figura K4. Cromatografía de gases resina INO.

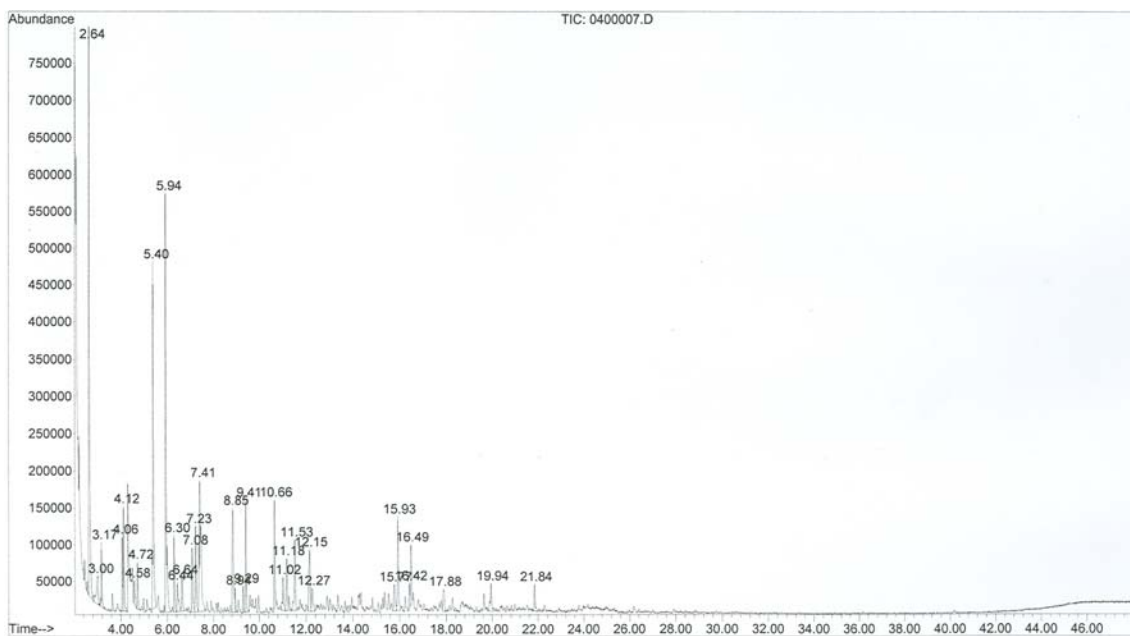


Figura K5. Cromatografía de gases resina NB.

Resumen Autobiográfico.

Alberto Esquivel Herrera

Candidato al grado de doctor en ingeniería de materiales.

Tesis: “Desarrollo de un aglutinante orgánico para fabricación de moldes y corazones de arena.”

El maestro en ciencias Alberto Esquivel Herrera nació en Monclova Coahuila el 10 de marzo de 1977, es hijo del Sr. Javier Esquivel Ríos y de la Sra. Rosa Ma. Herrera Hernández. Curso estudios de Ingeniería Química en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila del 1995 al 2000.

En ese mismo año inicia la Maestría en Ciencia de Materiales en el Departamento del Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Saltillo y obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en el 2003.

El Maestro en Ciencias Alberto Esquivel Herrera ha trabajado en el departamento de investigación y desarrollo de Nemak en las arenas y corazones.