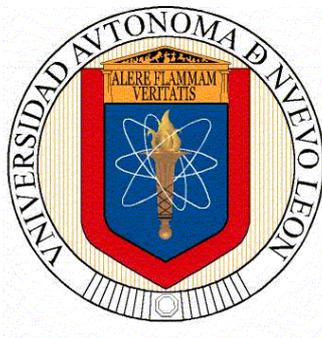


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE INORGÁNICO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE CORAZONES DE ARENA EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ**

POR

ALDO ALBERTO SÁENZ VALDEZ

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

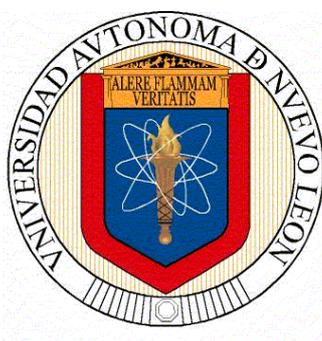
CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO 2010

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE INORGÁNICO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE CORAZONES DE ARENA EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ**

POR

ALDO ALBERTO SÁENZ VALDEZ

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

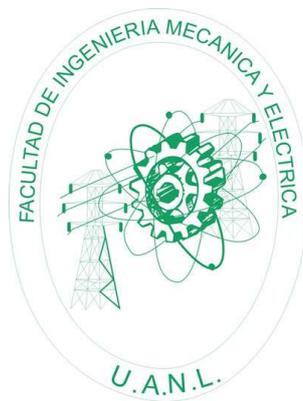
CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO 2010

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE INORGÁNICO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE CORAZONES DE ARENA EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ**

POR

ALDO ALBERTO SÁENZ VALDEZ

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO 2010

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

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industria automotriz” realizada por el alumno: Aldo Alberto Sáenz Valdez, matrícula: 1110845 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis

---

Asesor

Dr. Rafael Colás Ortiz

---

Co-asesor

Dr. Arturo Juárez Hernández

---

Co-asesor

Dr. Abraham Velasco Téllez

---

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

San Nicolás de los Garza, N. L.

Enero 2010

# **Dedicatoria**

A mis padres:

Jaime Sáenz Rangel  
Alma Rosa Valdez Rodríguez

A mis hermanos:

Alan Alexandro Sáenz Valdez  
Karlenne Seareth Sáenz Valdez

Les agradezco todo su amor y apoyo que me han dado.

# Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial al Programa Doctoral de Ingeniería de Materiales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Al Dr. Rafael Colás Ortiz por su asesoría y por permitirme contribuir con el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Abraham Velasco por su valiosa ayuda y por sus conocimientos aportados en este trabajo.

Al Dr. José Talamantes por las facilidades que me dio para realizar mi tesis en la empresa NEMAK, S.A.

A todos mis amigos y colegas de la empresa NEMAK, S.A., en especial al departamento de Investigación y Desarrollo. A Gil, Juan Pablo, Mike, Beto, Lizz, Adrián, Lili, Alex, Mayra, Claudia y a todos aquellos que trabajan o han trabajado en el área de Arenas, gracias por su amistad y por su valiosa ayuda.

A todos los doctores y catedráticos del PDIM con los que tuve la fortuna de tomar clases.

A todos mis amigos que han estado conmigo en las buenas y en las malas. A mis amigos de la primaria, de la carrera y de la maestría.

# INDICE

<b>Capítulo 1: Introducción</b>	
<b>1.1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Hipótesis y objetivos</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 2: Antecedentes</b>	
<b>2.1. Arenas</b>	<b>5</b>
2.1.1. Arenas sílicas	5
2.1.2. Otros tipos de arenas	7
2.1.3. Clasificación de la arena	8
2.1.4. Propiedades de las arenas	10
<b>2.2. Fundamentos de corazones</b>	<b>11</b>
2.2.1. Variables a verificar en las mezclas arena-resina	12
<b>2.3. Proceso de fabricación de corazones</b>	<b>15</b>
2.3.1. Caja fría	16
2.3.1.1. Resinas fenólicas-uretánicas	18
2.3.1.2. Soplado	19
2.3.2. Proceso Shell	19
<b>2.4. Aglutinantes inorgánicos</b>	<b>20</b>
2.4.1. Requerimientos para los sistemas químicos de aglutinación	20
2.4.2. Principios fundamentales de aglutinantes inorgánicos	21
<b>2.5. Aglutinantes base fosfatos</b>	<b>22</b>
2.5.1. Endurecimiento químico y adición de CO <sub>2</sub> gaseoso	23
2.5.2. Endurecimiento por temperatura	23
<b>2.6. Aglutinantes base silicatos</b>	<b>24</b>
2.6.1. Química de los silicatos	26
2.6.2. Propiedades físicas y químicas de los silicatos	29
2.6.3. Proceso silicato-éster	30
2.6.4. Proceso silicato-CO <sub>2</sub>	32
2.6.5. Proceso de deshidratación	34
2.6.6. Otros procesos usando silicatos	35
2.6.7. Silicato de sodio y otros materiales	36
<b>2.7. Nuevos aglutinantes inorgánicos</b>	<b>36</b>
<b>2.8. Principales ventajas y desventajas de los aglutinantes inorgánicos</b>	<b>37</b>
<b>2.9. Recuperación de la arena</b>	<b>39</b>
<b>2.10. Mejoramientos de aglutinantes al medio ambiente</b>	<b>41</b>

<b>Capítulo 3: Experimentación</b>	
<b>3.1. Introducción</b>	<b>44</b>
<b>3.2. Tipos de silicatos de sodio según relación <math>\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}</math></b>	<b>45</b>
<b>3.3. Aditivos</b>	<b>46</b>
<b>3.4. Caracterización de la arena</b>	<b>47</b>
3.4.1. Distribución granulométrica	47
3.4.2. Microscopía óptica	48
<b>3.5. Caracterización de las resinas inorgánicas y aditivos</b>	<b>49</b>
3.5.1. Viscosidad	50
3.5.2. Medición del pH	52
3.5.3. Análisis termogravimétrico	53
<b>3.6. Procedimiento y equipos para elaborar probetas</b>	<b>54</b>
<b>3.7. Caja caliente</b>	<b>55</b>
3.7.1. Temperatura y tiempo de curado	57
<b>3.8. Análisis y ensayos</b>	<b>57</b>
3.8.1. Propiedades mecánicas	58
3.8.2. Distorsión en caliente	60
3.8.3. Evolución de gases	63
3.8.4. Microscopía electrónica de barrido	63
<b>Capítulo 4: Resultados y discusiones</b>	
<b>4.1. Introducción</b>	<b>66</b>
<b>4.2. Caracterización de la arena</b>	<b>66</b>
4.2.1. Distribución granulométrica de la arena utilizada	67
4.2.2. Morfología de los granos	68
<b>4.3. Caracterización de las resinas y aditivos</b>	<b>69</b>
4.3.1. Medición de viscosidad, pH y contenido de sólidos de las muestras de silicatos	69
4.3.2. Análisis termogravimétrico del aditivo EVB	73
<b>4.4. Propiedades mecánicas</b>	<b>74</b>
<b>4.5. Vida de banco</b>	<b>93</b>
<b>4.6. Desarrollo de resistencia a diferentes condiciones ambientales</b>	<b>99</b>
<b>4.7. Proceso de caja fría</b>	<b>102</b>
4.7.1. Caracterización por microscopía electrónica de barrido	106
<b>4.8. Distorsión en caliente</b>	<b>113</b>
<b>4.9. Evolución de gases</b>	<b>115</b>
<b>Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones</b>	
<b>5.1. Conclusiones</b>	<b>117</b>
<b>5.2. Recomendaciones</b>	<b>119</b>
<b>Referencias</b>	<b>120</b>
<b>Anexos</b>	

# **CAPITULO 1**

## **Introducción**

Los residuos en los procesos industriales de fundición en arena son mayores que en los de operaciones con moldes permanentes. Además, esa misma generación de residuos está relacionada con el tipo de metal usado (acero, hierro fundido, aluminio, bronce, etc.), así como de la tecnología empleada. <sup>[1]</sup>

La mayoría de las fundiciones generan residuos diversos que van desde aceites de maquinarias y montacargas, materiales de soldadura y polvo, así como residuos de escoria y finos provenientes de las arenas. Sin embargo, una gran parte de los contaminantes ambientales son arrojados al ambiente, entre los que se encuentran: monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de azufre, hidrocarburos policíclicos aromáticos, partículas finas provenientes de la arena, metales pesados y solventes orgánicos. En la atmósfera, estos contaminantes se pueden encontrar en cualquier de los tres estados: líquidos, sólidos y gases. Algunos de estos contaminantes generan la destrucción de ecosistemas e inclusive de monumentos y edificios históricos, mientras que en el ser humano se presentan efectos en la salud tales como: dificultades respiratorias, irritación en los ojos, dolores de cabeza, problemas cardiacos y cáncer.

La arena es usada exitosamente en los procesos de fundición de metales porque ésta tiene la habilidad de absorber y transmitir calor cuando permite que los gases formados durante el rompimiento de los enlaces del aglutinante pasen entre los granos. Los corazones y moldes son hechos utilizando arena recubierta con algún tipo de resina preparada por diferentes procesos que usan una variedad de aglutinantes. <sup>[2]</sup>

Un aglutinante puede ser descrito como un aditivo capaz de aglomerar un material y que puede producir una resistencia entre los enlaces del mismo. Ese aglutinante, que puede estar en forma líquida o sólida, forma un puente, película o matriz ocasionado por una reacción química, para así crear la unión entre grano y grano.

En décadas pasadas muchas mejoras en aglutinantes para arenas en la industria de la fundición han resultado en una mejor calidad, mayor productividad y han contribuido a los trabajadores mayor seguridad, además de protección al medio ambiente. Los fundidores, en muchos casos, se han beneficiado de esas mejoras. Estos cambios usualmente han involucrado la eliminación de malas prácticas de manufactura y un mejor control de las variables del sistema.

Al producir formas con corazones de arena ligados orgánicamente se producen emisiones que, en vistas a la protección sanitaria y del medio ambiente, requieren en parte unas instalaciones costosas de aspiración y filtración.<sup>[3]</sup> El desarrollo de aglutinantes inorgánicos no requiere tales medidas y disponen de un rendimiento y productividad comparable con los sistemas aglutinantes orgánicos a un precio más bajo, además que contribuyen a mejorar la rentabilidad de la producción de corazones y así de las fábricas de fundición.

Los aglutinantes inorgánicos están generando más y más interés en años recientes debido a las ventajas que tienen estos comparados con los comúnmente sistemas de aglutinación orgánica. Estos no emiten emisiones durante el completo proceso de producción y aportan mejores piezas de aluminio y menos rechazos.

Combinado con el crecimiento a la sensibilidad para una mayor protección al medio ambiente y al constante incremento a las restricciones hacia las empresas de fundición, esas ventajas son bienvenidas para cambiar a un sistema de aglutinación inorgánica.

Las formulaciones de aglutinantes basados en silicato de sodio se han ido utilizando más debido a que son amigables al medio ambiente, teniendo un alto desempeño. La diversa química del silicato indica que éste puede enlazarse para formar una película, reaccionando para formar una matriz o un aglutinado con el material siendo aglomerado.<sup>[4]</sup>

En este trabajo se propone el uso del silicato como aglutinante alternativo para la fabricación de corazones para monobloques y cabezas de aluminio dentro de la industria automotriz.

## **Hipótesis**

Un sistema inorgánico base silicato dentro de los procesos de caja caliente y caja fría resolverán problemas presentados en otros sistemas tales como resistencias y vida de banco.

## **Objetivo**

Desarrollar y optimizar un aglutinante inorgánico base silicato empleado en la fabricación de moldes y corazones de arena.

## **Objetivos específicos**

- Desarrollar un aglutinante base silicato, usando diferentes tipos de silicato de sodio.
- Determinar el efecto del pH, viscosidad y contenidos de sólidos en los silicatos.
- Evaluar el desarrollo de la resistencia de los corazones a diferentes condiciones de humedad, así como su vida de banco.
- Establecer los procesos de caja caliente y caja fría para la fabricación de los corazones.
- Evaluar las propiedades térmicas de los corazones con aglutinantes inorgánicos, así como la evolución de gases desprendidos de éstos.
- Caracterizar la mezcla de arena-aglutinante y los corazones a través de técnicas como microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, análisis térmico, etc.

# CAPITULO 2

## Antecedentes

### 2.1 Arenas

Las arenas son partículas inorgánicas, ya sea minerales o agregados pétreos, de diámetros entre 0.06 a 3.3 mm. Son partículas segregadas por la acción del viento, del agua y del hielo, de las rocas existentes en montañas o ríos. La arena más empleada en fundición es la arena sílica ó dióxido de silicio. La sílice es el material más abundante en la corteza terrestre, casi un 70 % es sílice.

#### 2.1.1 Arenas sílicas

La arena de sílice se encuentra en la naturaleza en depósitos a cielo abierto, en estado anhidro, cuarzo, calcedonia, cristales de roca, rocas silíceas en estado hidratado, kieselgur y ópalo. La Tabla 2.1 muestra los constituyentes de la arena sílica.

Tabla 2.1. Constituyentes de la arena sílica

Compuesto	% en Peso
SiO <sub>2</sub>	98.82
MgO	0.031
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
ZrO <sub>2</sub>	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.049
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.019
CaO	0.0016
TiO <sub>2</sub>	0.012

La sílice es inerte a diversos agentes químicos, salvo el ácido fluorhídrico que lo ataca fuertemente. A alta temperatura reacciona con los óxidos básicos dando silicatos ácidos más o menos fusibles. Reacciona con el manganeso de los aceros altos en este elemento, imposibilitando su uso para este tipo de aceros.

La arena de sílice se encuentra en diversas granulometrías, en granos redondos, subangulares, angulosos, compactos, cavernosos, agrietados y aglomerados de granos más pequeños.

La sílice tiene poca conductividad térmica, su dilatación es importante y tiene la desventaja de ser mojada por el metal (ver figura 2.1).

Las principales ventajas de usar arena sílica en el proceso de fundición son:

- Su resistencia a la temperatura del metal que se está vaciando y baja reacción al choque térmico.
- Es suficientemente permeable para permitir el escape de gases y vapores.
- Son altamente refractarias y resistentes al calor. Su punto de fusión está alrededor de los 1550 -1650°C.
- Bajo costo en comparación a otras arenas.

Los yacimientos en el territorio mexicano de las minas de arena sílica se localizan a lo largo de la costa del Golfo de México, en Veracruz y Tamaulipas, también se encuentran en Puebla, Guanajuato, San Luis Potosí, Coahuila, Nuevo León, Durango y Zacatecas. En los Estados Unidos se encuentran principalmente en el área de Oklahoma y en el área de los Grandes Lagos. <sup>[5]</sup>

### 2.1.2 Otros tipos de arenas

Existen otras arenas que compiten con la arena sílica para usarse como material refractario y de moldeo, en particular la cromita, olivina, mulita y circonia.

#### A) Arena olivina

Mineral principalmente compuesto por silicatos de magnesio y hierro, encontrada en su estado natural en la fosferita. Su aplicación en la industria de la fundición es principalmente para metales no ferrosos, ya que presenta buena refractariedad. La composición típica expresada en óxidos es MgO: 48%, SiO<sub>2</sub>: 41% y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 8%.

#### B) Arena cromita

La arena de Cromita (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) es aplicable a todos los tipos de aceros y muy apropiada para las piezas de acero al cromo, cromo-níquel y acero al manganeso. La dilatación térmica es mucho más baja que la arena de sílice con lo que se reducen también los problemas derivados de la expansión de la arena. El contenido típico de sus óxidos mayoritarios es Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 46%, FeO: 27%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 15% y MgO:10%.

#### C) Arena circonia

Su composición es silicato de circonio (ZrSiO<sub>4</sub>) y tiene una densidad aparente aproximada de 2.7 g/cm<sup>3</sup>. Se emplea en la fabricación de corazones y moldes sometidos a altas temperaturas como es el caso de piezas de acero y piezas masivas de fundición. La arena de circonio presenta excelentes propiedades refractarias, baja dilatación térmica y elevada conductividad térmica.

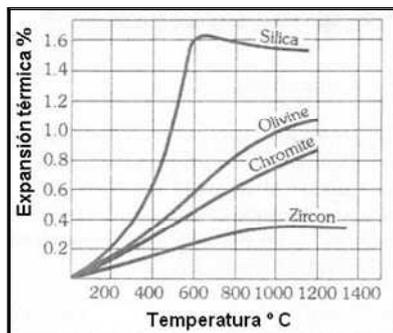


Figura 2.1. Expansión térmica de diferentes tipos de arena

### 2.1.3 Clasificación de la arena

Se clasifica de acuerdo a su tamaño y forma:

a) Tamaño: El análisis de finura de grano da información acerca de la distribución de las partículas. El tamaño de los granos de arena tiene una importancia fundamental sobre el acabado de las piezas, la permeabilidad, la cohesión o resistencia de la arena y su refractariedad. La arena está constituida por partículas menores de 20  $\mu\text{m}$ , que son en su mayoría arcillas de diferente naturaleza, polvos muy finos de la misma arena y de material orgánico, raíces, humus, etc. Para determinar el tamaño de grano promedio o finura AFS se realiza un ensayo el cual consiste en colocar una muestra de arena en una serie de tamices de diferentes tamaños de malla y hacerlos vibrar por espacio de 15 minutos en un equipo conocido como Ro-Tap. <sup>[6]</sup>

b) Forma: Dependiendo del medio en la que la arena se arrastra y de la distancia que recorre, ésta puede ser angular, sub-angular o redonda. El Diagrama de Krumbein (figura 2.2) indica el grado de redondez y esfericidad de una partícula.

- i) Angular. Arena que presenta aristas y caras planas. Un grano angularo tiene una mayor superficie y tiene menos permeabilidad.

- ii) Sub-angular. Arena que presenta bordes redondeados, picos vértices y caras planas.
- iii) Redonda. Arena de bordes redondeados y con apariencia esférica. Este tipo de arena tiene la menor superficie y tiene mayor permeabilidad.

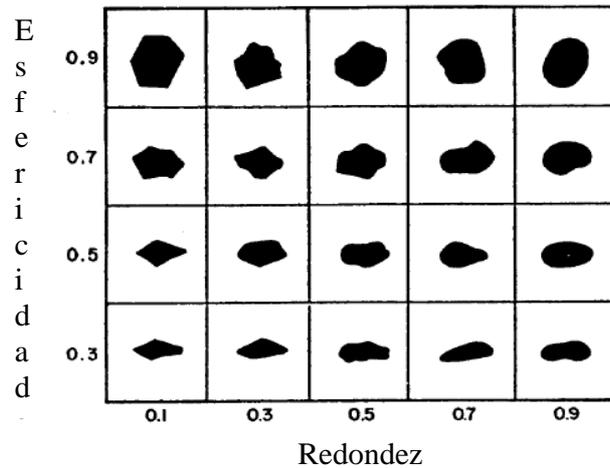


Figura 2.2. Diagrama de Krumbein

Deben evitarse los granos porosos, frágiles o agrietados, pues estos poros o grietas absorben los aglutinantes. Si el grano está agrietado, aumentará el índice de finura, los retenidos en las mallas más finas y la arcilla AFS. La fragilidad del grano de arena se debe principalmente a la porosidad o agrietamiento del grano de arena. [7]



Figura 2.3. Morfología de grano redondo, sub-angular y angular de la arena sílica.

#### 2.1.4 Propiedades de las arenas

a) pH y demanda de ácido (ADV). Las arenas, según su yacimiento, pueden ser ácidas o básicas. El óxido de silicio es un óxido ácido cuando está fundido. A la temperatura ambiente no se manifiesta esta acidez, sin embargo, la arena tiene impurezas que pueden tener carácter ácido o básico. Entre las impurezas principales se tienen los carbonatos de calcio, sodio, magnesio, etc. Algunos de estos carbonatos son insolubles en agua y por lo tanto no muestran un pH alcalino o mayor de 7.

El pH determina el contenido de impurezas alcalinas solubles en agua, mientras que la demanda de ácido (ADV) determina la cantidad de impurezas alcalinas no solubles en agua, pero solubles en ácido.<sup>[8]</sup> Algunos factores que influyen para aumentar el pH y el ADV a la arena son la recuperación térmica a altas temperaturas que genera componentes alcalinos como óxido de calcio y alúmina; la presencia de contaminantes como partículas de aluminio y carbonatos; y alto contenido de finos donde se concentra arcilla que es de naturaleza básica.

b) LOI. El término LOI viene de las siglas en inglés *loss of ignition* y mide el porcentaje de resina que no se eliminó en el horno recuperador. Este parámetro se controla con la temperatura de recuperación de los hornos.

c) Humedad. La presencia de humedad en la arena mayor a 0.15% también disminuye la vida de banco y la resistencia del corazón, esto debido a que el agua reacciona con la resina, degradando sus propiedades. Aditivos base silano ayudan a reducir este efecto. Las fuentes de contaminación de humedad en la arena y en el proceso son:

- Silos y tolvas mal sellados.
- Alta humedad relativa ambiental.
- Condensación en los serpentines del sistema de enfriamiento de la recuperadora de arena.

d) Temperatura de la arena. El rango oscila entre 20 y 30° C. Arena con temperatura mayor a 34°, acelera la reacción entre las resinas, disminuyendo la vida de banco de la mezcla. Temperatura menor a 16° retarda la reacción entre las resinas, resultando corazones crudos.

## **2.2 Fundamentos de corazones**

Un molde usualmente da la forma externa de una figura en una pieza simple de fundición, pero si esa pieza de fundición tiene una cavidad interna, una forma especial debe ser hecha. La forma especial, diseñada para formar la porción interna del molde, es llamada corazón. Se le llama corazón al componente del molde que forman los huecos que se obtendrán de la pieza vaciada.<sup>[9]</sup>

Las propiedades que se deben de tener para obtener buenos corazones son: que resista la presión que el metal ejerce en el momento del vaciado, que permita la salida de los gases de combustión y pirólisis del propio corazón en el momento del vaciado, que permita la contracción del metal en el momento de la solidificación durante el enfriamiento de la pieza y que mantenga la precisión en las dimensiones de la pieza vaciada.

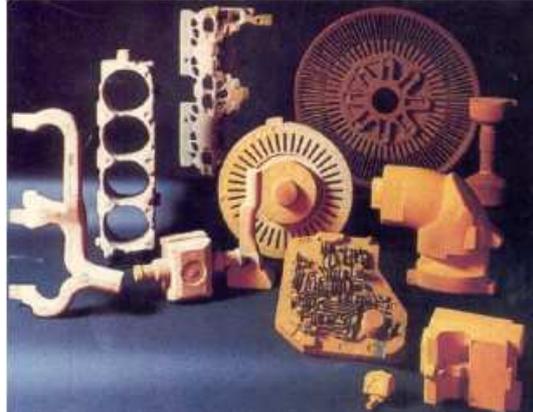


Figura 2.4. Moldes y corazones de arena

Para permitir el escape de los gases, el corazón debe ser venteadado, tanto como en la superficie del molde o por el molde en sí. El corazón debe tener suficiente resistencia para retener su forma durante la preparación. Si la resistencia del corazón después de su curado es inadecuada, puede erosionarse o deformarse cuando el metal caliente es vaciado sobre él. Para poder fabricar una buena pieza, el corazón debe además tener un mínimo de contracción y expansión.<sup>[10]</sup>

El corazón debe ser fabricado de materiales que no produzcan altos niveles de gases residuales. Una buena cantidad de gases en el corazón puede ocasionar algo de gas en exceso que entre al metal y que ocasione piezas en mal estado.

### **2.2.1 Variables a verificar en las mezclas arena-resina**

#### a) Vida de banco

Es el periodo de tiempo durante el cual una mezcla de arena/resina mantiene sus propiedades para ser usada. La especificación es mínimo 0.55 MPa (80 psi) de resistencia a una hora de almacenamiento de la mezcla.

#### b) Desarrollo de resistencia

Es la resistencia que se espera obtener en el corazón almacenado durante 2 horas, es un indicador de la resistencia del corazón desde su fabricación hasta su uso.

#### c) Resistencia en caliente

La resistencia en caliente es la resistencia de la mezcla de arena a altas temperaturas. Este tipo de pruebas permiten evaluar la estabilidad térmica de las resinas ya reaccionadas y con ello poder prever los posibles problemas que puedan presentar los corazones en el momento del vaciado. Estos posibles problemas son: inclusiones no metálicas por presencia de arena suelta en el molde, suciedad en el molde, problemas de desarenado, etc.

#### d) Resistencia a la humedad

Se refiere a la habilidad de la arena del corazón en retener su forma y dimensiones a ciertas condiciones de humedad en el ambiente. Además de hacer que el corazón tenga la suficiente resistencia para ser manejado, las resistencias en caliente y a la humedad; además deben ayudar al corazón a resistir la presión del metal caliente durante el vaciado.

La arena del corazón debe emitir una limitada cantidad de gases en contacto con el metal fundido. Para ayudar a remover los gases del aglutinante de la arena, se utiliza una mezcla con alta permeabilidad.

Factores que afectan las resistencias y vida de banco:

- Alta temperatura de la mezcla
- Alto valor de pH y demanda de ácido
- Alta humedad ambiental
- Alto contenido de finos

e) Evolución de gases

Se refiere a la cantidad de gas que la mezcla de arena resina ya reaccionada puede generar una vez que el metal es introducido al molde, el riesgo que existe es que este gas no encuentre salida a través del corazón o metal y una vez ya solidificado este gas quede atrapado en la pieza como defectos por porosidad.

f) Permeabilidad

Esta prueba se realiza directamente en el corazón ya obtenido y permite conocer el grado de compactación de los granos de arena. Este parámetro nos permite saber la facilidad con la que los gases generados durante el vaciado puedan pasar a través del corazón y no quedar atrapados, generando o incrementando el defecto conocido como porosidad por gas.

g) Contenido de finos

Un alto contenido de finos (mayor a 10%) incrementa el área de superficie a recubrir, ocasionando menores resistencias y reduciendo la permeabilidad de los gases. Generan corazones débiles, rotos y esponjosos.

h) pH y ADV

Altos valores de pH y demanda de ácido incrementan la velocidad de reacción de las resinas y neutralizan una porción de las mismas. Generan corazones débiles.

i) Colapsabilidad

Habilidad de la arena aglutinada de disgregarse después de que el molde ha sido vaciado, es la habilidad que presenta para el desmoldeo.

j) Fluidez

Capacidad de la mezcla de arena-resina para pasar con facilidad desde la tolva hasta las cavidades del molde.

### 2.3 Proceso de fabricación de corazones

Se pueden utilizar distintos procesos para la fabricación de corazones, entre los cuales se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Tipos de procesos de fabricación de corazones.

<b>1. Reacción química con catalizador gaseoso</b>
Caja Fría
Silicato / CO <sub>2</sub>
<b>2. Reacción química con catalizador líquido</b>
No Bake
<b>3. Calor</b>
Caja Caliente
Aire Caliente/Caja Fría
Shell

### 2.3.1 Caja fría

Este proceso inició su desarrollo a finales de los años 60's, buscando principalmente la reducción en los tiempos de producción de corazones, los procesos anteriores requerían de mucho tiempo para el secado y endurecimiento de los corazones.

Tabla 2.3. Sistemas de aglutinación de acuerdo a su mecanismo de curado.

Caja fría	Caja caliente	No horneado
Acrílico epóxico SO <sub>2</sub>	Furánico caja caliente	Furánico ácido
Furánico SO <sub>2</sub>	Fenólico caja caliente	Fenólico ácido
Fenólico uretánico amina	Shell	Fenólico éster
Silicato de sodio CO <sub>2</sub>	Alumino silicato	Fenólico uretánico
Fenólico CO <sub>2</sub>	Corazón en aceite	Fosfato de alúmina
	Gmbond	Silicato éster

El nombre de caja fría fue asignado originalmente al sistema fenol-uretano / amina, pero recientemente se ha ampliado para cualquier proceso que utilice un catalizador en estado gaseoso, en la cual los corazones se curan dentro de una caja o moldes a temperatura ambiente (tabla 2.3).

Ventajas:

- No requiere de calentamiento para el curado del corazón.
- Alta precisión dimensional
- Alta productividad.
- Excelente fluidez de la mezcla arena / resina.

Los principales componentes de este proceso son:

1. Arena: Puede ser arena nueva o arena recuperada del proceso.
2. Resinas y Aditivos: Las resinas son las sustancias semisólidas, translúcidas o transparentes que se solidifican o espesan al contacto con el aire, la mayoría son insolubles en agua.
3. Gas catalizador: Se inyecta en forma gaseosa a la caja de corazones.
4. Gas acarreador o aire seco: Transporta la amina gaseosa del vaporizador a la caja de corazones. Purga el excedente de gas catalizador durante la fabricación del corazón. El aire debe de estar a un mínimo de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Las resinas son la materia prima que se utiliza para la fabricación de corazones, que son añadidos a la arena y que formarán la mezcla utilizada en las máquinas sopladoras. El proceso típico cumple la secuencia de: soplado, gaseado, purga y extracción del corazón. <sup>[11]</sup>



Figura 2.5. Resinas utilizadas en el proceso de caja fría.

### 2.3.1.1 Resinas fenólicas – uretánicas (Cold-Box)

Este sistema aglutinante se compone de tres partes:

- Resina Fenólica (parte 1): Fenol – formaldehído, solventes y aditivos.
- Isocianato (parte 2): Isocianato, solventes y aditivos.
- Catalizador (parte 3): Amina terciaria en forma de gas.

El componente reactivo es el formaldehído el cual a su vez, aporta el grupo hidroxilo (-OH), que durante la reacción de polimerización, reacciona con el grupo isocianato (-NCO) de la parte II para formar un poliuretano (figura 2.6).

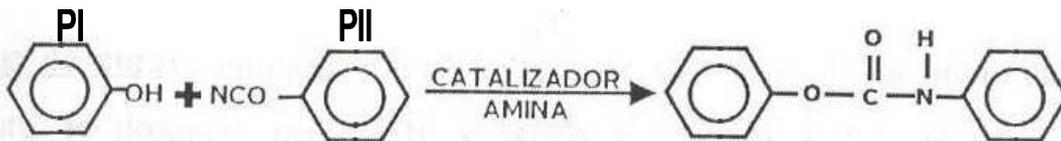


Figura 2.6. Reacción del proceso fenólico/uretánico.

El propósito de los solventes es reducir la viscosidad de la resina, para proveer una buena fluidez y un rápido y eficiente recubrimiento de la arena. También incrementan la reactividad de la resina. <sup>[12]</sup>

Los aditivos constituyen menos del 10% de las resinas y son usados para mejorar el desmoldado, aumentar la resistencia a la humedad de los corazones y mejorar la vida de banco.

El gas catalizador se inyecta en forma de gas a la caja, el cual pasa a través de la mezcla de arena y resinas, actuando como acelerador de la reacción que genera al poliuretano, produciendo un corazón resistente. Las aminas más utilizadas son la trietilamina y la dimetil etilamina.

### **2.3.1.2 Soplado**

La mezcla de arena con resinas se sopla dentro de la caja de corazones con presiones entre 0.50 y 0.55 MPa, durante 1 a 5 segundos, llenando completamente las cavidades. Una buena compactación del corazón mejora su resistencia y beneficia el acabado superficial de la pieza.

### **2.3.2 Proceso Shell**

La arena sílica es recubierta previamente con una resina fenólica. La mezcla de arena con resina es inyectada en la caja de corazones previamente calentada a una temperatura entre 230 y 250°C.

Bajo la acción térmica y durante el calentamiento la resina se endurece, formando el polímero que da la resistencia al corazón. <sup>[13]</sup>

Ventajas:

- Alta resistencia mecánica.
- Buena permeabilidad al gas.
- Excelente acabado superficial.

Desventajas:

- Mayor demanda de energía eléctrica.
- Alta evolución de gas.
- Problemas de desarenado debido a su alta resistencia.

## 2.4 Aglutinantes Inorgánicos

La decisión de usar sistemas químicos aglutinantes para moldes y corazones de arena en una operación de fundición está basada en la evaluación de muchos factores. Algunos de estos factores a considerar son la producción, los costos de operación, calidad, impacto ambiental, equipo, entre otros. El principal logro en la decisión de este proceso es el de producir piezas de fundición de buena calidad al más bajo costo con los recursos disponibles.



Figura 2.7. Producción de piezas de aluminio y formación de emisiones usando corazones orgánicos (izquierda) y corazones inorgánicos (derecha).

### 2.4.1 Requerimientos para los sistemas químicos de aglutinación

El propósito de un aglutinante de arena para fundición es el de unir los granos de arena en una forma deseada hasta que la pieza solidifique. Para esto, una primera consideración del aglutinante es de desarrollar la resistencia suficiente para una aplicación dada. Las resistencias a temperatura ambiente deben ser suficientes como para ser manejadas. El corazón debe mantener su integridad en la temperatura de solidificación del metal, en otras palabras, la masa de arena unida puede deformarse, resultando en una pieza sin las dimensiones requeridas. Si las resistencias son muy altas, la expansión térmica en el molde

puede causar que la superficie de la arena se agriete con el metal fluyendo por las grietas para formar defectos en la pieza.

La descomposición térmica del aglutinante produce una atmósfera reductora en la cavidad del molde, la cual inhibe la formación de óxidos metálicos. La velocidad de descomposición térmica determina la velocidad de la evolución de gases del corazón. Si grandes cantidades de gas son producidos inicialmente, se formarán burbujas en el metal líquido y éstas comenzarán a enfriarse en la pieza para llegar a formar poros. Si el aglutinante contiene carbono, azufre o fósforo, es posible que estos elementos sean absorbidos hacia la superficie de la pieza, lo que sus propiedades de la pieza variarán. Una tercera consideración para un sistema aglutinante es que debe de tener una adecuada colapsabilidad después de que la pieza solidifique. Si esto no ocurre, la arena del corazón se quedará dentro de la pieza y tendrá que ser removida. Una cuarta consideración es la recuperación de la arena enlazada. Existen varios métodos para recuperarla, como lo son: la atrición mecánica, tratamiento térmico, granallado, etc. La principal consideración en la recuperación es la clasificación de los tamaños de los granos de arena y la reducción de los componentes orgánicos para que al momento de volver a unir los granos con el aglutinante no se afecte la calidad del corazón y de la pieza. Las consideraciones finales en la selección de un aglutinante son que el sistema sea económico y ecológicamente seguro al usarse. El impacto ambiental de la industria de la fundición en la comunidad es un importante parámetro en la decisión final. <sup>[14]</sup>

#### **2.4.2 Principios fundamentales de los aglutinantes inorgánicos**

Los aglutinantes inorgánicos siempre han sido utilizados en las prácticas de fundición, particularmente para hacer moldes y corazones grandes. Debido al incremento de requerimientos de tiempos, así como también en la geometría y calidad de las piezas, los ya probados sistemas de aglutinación inorgánico han

sido desplazados por la mayor parte en procesos inorgánicos, tales como caja fría base poliuretano, resol-CO<sub>2</sub>, caja caliente fenólica o de furano. Actualmente los aglutinantes base inorgánicos están teniendo de nuevo una mayor demanda. <sup>[15]</sup>

Los aglutinantes orgánicos han sido continuamente desarrollados y optimizados durante años. Sin embargo, se necesitan ser tomadas medidas apropiadas para la captura y el subsecuente tratamiento de gases contaminantes al ambiente tales como el benceno, tolueno y xileno, para asegurar condiciones seguras de trabajo, por lo que se tiene que recurrir a costos adicionales. <sup>[16]</sup> Para evitar reducir esos gastos, los productores de aglutinantes orgánicos han estado llevando a cabo nuevos desarrollos de aglutinantes para mejorar estas cuestiones.

## **2.5 Aglutinantes base fosfato**

El fósforo no se encuentra libre en la naturaleza debido a su gran afinidad al oxígeno, sino que está presente en forma de derivados del ácido fosfórico H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. El más importante fosfato mineral natural es el fosfato de calcio conocido como apatita y fosforita. El fósforo enlazado con el hidrógeno y el oxígeno se puede presentar en las siguientes composiciones:

- Orto
- Meta
- Di
- Poli

La producción técnica del fosfato polimérico se sigue por la condensación térmica del ácido polifosfórico bajo separación del agua. De aquí resultan moléculas de alto peso molecular. Las sales como el polifosfato de sodio pueden condensarse también para formar moléculas poliméricas. Por un enfriamiento de las sales fundidas, un vidrio es formado. Por un calentamiento adicional debajo del punto de fusión resulta polifosfato de sodio cristalino. Los polímeros base fosfato

presentan una buena solubilidad en agua y en soluciones acuosas polielectrolíticas.<sup>[17]</sup>

### **2.5.1 Endurecimiento químico y adición de CO<sub>2</sub> gaseoso**

El endurecimiento del aglutinante base fosfato puede llevarse a cabo ya sea por endurecimiento químico o por gaseo con CO<sub>2</sub>. Uno de los primeros inventos fue publicado en Japón en 1965. Mitsubishi Jukogyo Kaisa describe en su patente la composición para corazones y moldes de arena. Son utilizados arena, cemento como aglutinante, un polifosfato de sodio como apoyo al endurecimiento de la mezcla y un medio no iónico, para el mejoramiento de la fluidez de la mezcla y agua. Después de la unión de los componentes, el corazón no es soluble en agua.<sup>[18]</sup>

En una patente de los Estados Unidos, describe un sistema inorgánico compuesto de elementos como materiales resistentes al fuego y una pequeña cantidad de fosfato de sodio anhidro. Los elementos fueron mezclados con una solución alcalina de silicato y después fueron endurecidos con CO<sub>2</sub>. Después de un análisis y evaluación del procedimiento con endurecedores químicos o con adición de CO<sub>2</sub> gaseoso, se puede decir que se pudiera tener un método más potencial.<sup>[19]</sup>

### **2.5.2 Endurecimiento por temperatura**

Una patente de los Estados Unidos describe el uso de una mezcla de una sal soluble, un fosfato de aluminio y un aglutinante. Como ejemplo de una sal adecuada que sea soluble en agua pueden ser nombrados el cloruro de calcio, cloruro de sodio y el metasilicato de sodio. Como agente aglutinante es usado parafina (cera), una resina orgánica sintética, resina de silicona o glicol. Los corazones son fabricados por presión y calentamiento. Después del vaciado, las piezas son desarenadas en agua.<sup>[20]</sup>

## 2.6 Aglutinantes base silicatos

Las soluciones alcalinas de silicato, comúnmente llamadas soluciones de vidrio o waterglass, han sido utilizadas desde el antiguo Egipto y por los fenicios. Los silicatos de sodio son los más ampliamente usados dentro de un amplio rango de aplicaciones. <sup>[21]</sup> Los silicatos de litio tienen también aplicaciones técnicas, pero son raramente usados debido a su costo.

Tabla 2.4. Principales aplicaciones de los silicatos

Aplicaciones	Función del silicato
<b>Limpieza / Detergentes</b> Polvos lavatrastos Humectación Detergentes líquidos y limpiadores	Defloculador Surfactantes Aglomerantes
<b>Industria Papelera</b> Blanqueador de la pulpa Recubrimientos Adhesivos para laminación Tratamiento de materias primas	Reacción química Formación de películas Adhesión Floculación
<b>Tratamiento de Aguas</b> Control de cobre y plomo Tratamiento de aguas residuales Prevención de corrosión en líneas Estabilización del hierro y del manganeso	Reacción química Floculante Formación de película Reacción química
<b>Construcción</b> Endurecedor de concreto Refractariedad del cemento Aislamiento térmico Resistencia a ácidos	Reacción química Aglutinante Adhesión Aglutinante
<b>Textiles</b> Blanqueamiento Removedores de grasa	Reacción química Formación de película
<b>Cerámicos / Minerales</b> Refractariedad Refinamiento de arcillas Flotación de minerales	Aglutinante Defloculador Defloculador
<b>Procesamiento del Petróleo</b> Rompimiento de emulsiones Lodo de perforación	Reacción química Control coloidal
<b>Metales</b> Pelletizado Fundición porosa Moldes de arena para fundición	Aglutinante Impregnación Aglutinantes

La fabricación de esas soluciones son generalmente hechas por la fusión de arena sílica con carbonatos de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) o de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) a  $1200^\circ\text{C}$ . Una vez enfriado, resulta un vidrio que puede ser disuelto a una alta presión de vapor para formar un líquido claro y algo viscoso conocido como “waterglass” (silicato de sodio). Otro método menos frecuente es la disolución de arena sílica en una solución alcalina ( $\text{NaOH}$ ) por ebullición. Los silicatos de sodio líquidos son los más usados comercialmente, aunque también existen ocasiones en las que el silicato de sodio en polvo tiene mejores aplicaciones. Estas soluciones alcalinas de silicato de sodio generalmente tienen un pH que varía entre 9 y 11. [22]

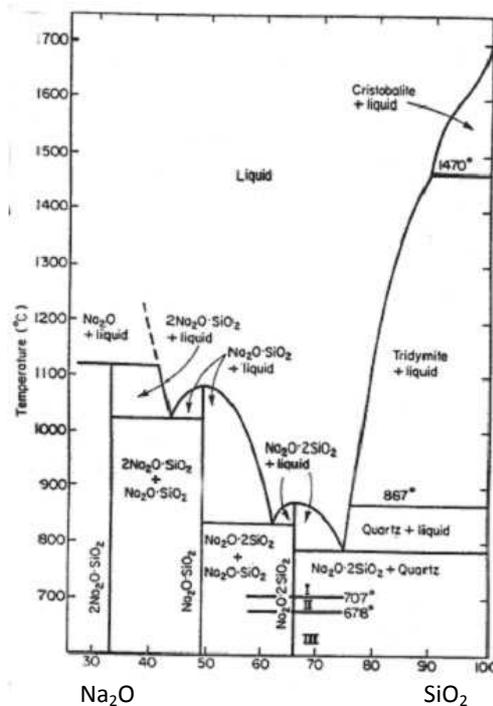


Figura 2.8. Diagrama de fases del silicato de sodio.

Los silicatos de sodio no son solamente utilizados en la industria de la fundición. También se utilizan como materia prima para síntesis químicas, para componentes de limpieza y lavado, como adhesivo en la industria papelera, en el tratamiento de aguas, en la industria de la construcción, en el procesamiento del petróleo, entre otros usos (tabla 2.4).

## 2.6.1 Química de los silicatos

La estructura fundamental del silicato como anión es la tetraédrica, con un átomo de silicio en el centro de una pirámide y con cuatro oxígenos en cada esquina, como se muestra en la figura 2.9. Típicamente un hidrógeno, un sodio o un potasio son asociados con cada átomo de oxígeno, o también los átomos de oxígeno pueden unirse con otros átomos de silicio, para formar trímeros lineales o cíclicos, así como también estructuras tridimensionales.

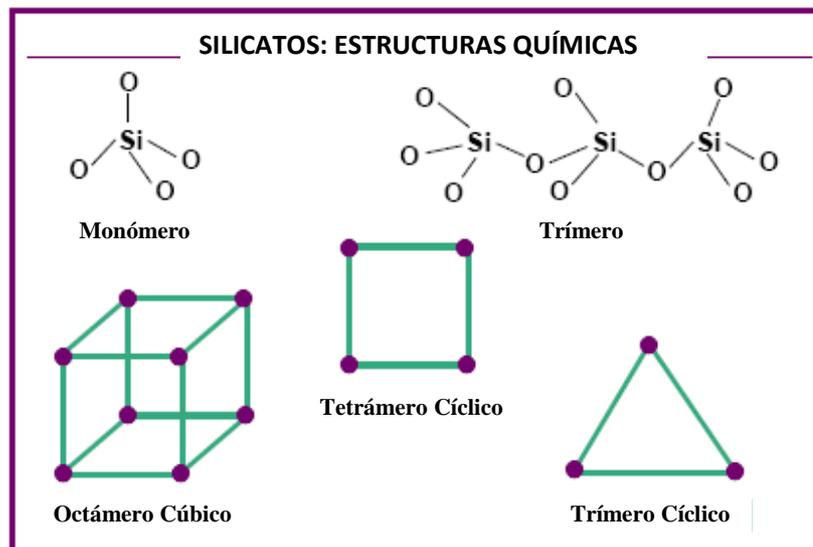


Figura 2.9. Estructuras del silicato.

La más importante propiedad del silicato de sodio es la relación en peso del  $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O}$ , donde M es Na, K o Li (figura 2.8). Los silicatos son comercialmente producidos en un rango de relación de 1.5 a 3.2. La relación representa un promedio de varios pesos moleculares de especies de silicatos. <sup>[23]</sup>

La selección de la relación del silicato dependerá del tipo de material a aglomerar, tipo de mecanismo de aglutinación y tiempo necesario.

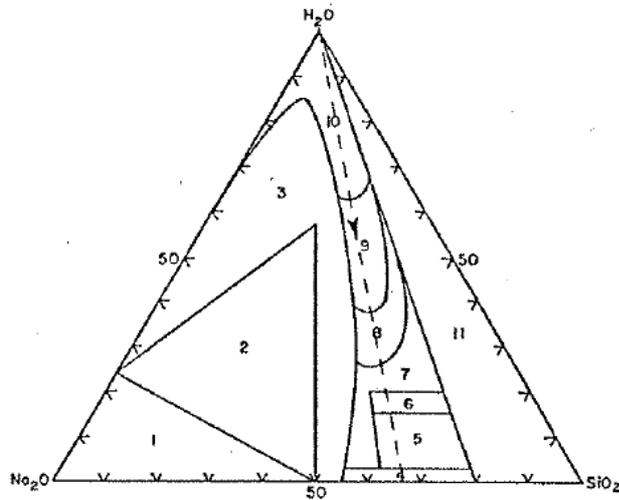


Figura 2.10. Diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo de del contenido de agua: 1) Orto silicato de sodio anhidro, 2) silicatos alcalinos cristalinos, 3) mezclas cristalizadas, 4) vidrios 5) vidrios hidratados, 6) líquidos deshidratados, 7) semisólidos no económicos, 8) líquidos viscosos no económicos, 9) líquidos comerciales, 10) líquidos diluidos, 11) líquidos y geles inestables.

Los silicatos de sodio pueden experimentar cuatro distintas reacciones químicas: hidratación/deshidratación, gelación/polimerización, precipitación y modificación de la carga superficial. Estas reacciones permiten al silicato actuar como un aglutinante en película, aglutinante en una matriz o aglutinante químico.

1. Hidratación/Deshidratación: Como el agua es removida del silicato líquido, el silicato llega a ser progresivamente más viscoso. La remoción de una relativa pequeña cantidad de agua convertirá al silicato líquido en una película de vidrio. Los silicatos líquidos con una relación en peso de 3.2 están mejores adaptados para actuar como un aglutinante en película. Un contenido más bajo de álcali de un silicato de relación 3.2 tiene menos afinidad por el agua y por lo mismo puede secarse más rápido, pero para lograr más resistencia al agua, algo de calor o algún reactivo químico se necesitaría.

2. Gelación/Polimerización: Las reacciones de gelación/polimerización ocurren rápidamente cuando el pH del silicato líquido cae por debajo de 10.7, ya que los silicatos de sodio reaccionan con compuestos ácidos. Las especies de silicato comienzan entrecruzándose para formar polímeros hasta formar un “gel”. Cuando se acidifican silicatos disueltos de concentraciones relativamente diluidas se pueden formar “soles” activados. El grado de polimerización de los aniones de las soluciones de silicato de sodio depende de la concentración de la solución, la temperatura, pH y otros factores. Aunque el enlace formado por el silicato polimerizado no es tan fuerte como el enlace formado por deshidratación, éste tiene un mayor grado de resistencia al agua. Esta reacción puede jugar un rol en la aglomeración, donde la superficie del material siendo aglomerado se acidifica o el material siendo aglomerado es expuesto a un ambiente alto de CO<sub>2</sub>. Algunas compuestos pueden ser añadidos al silicato para inducir a la gelación/polimerización, tales como ácidos orgánicos, ésteres o carbonatos. La adición de éstos compuestos que inducen a la polimerización es muy común en la industria de la fundición. Un silicato de relación 3.2 es el mejor para promover la reacción de gelación/polimerización.

3. Reacción de Precipitación: Los silicatos solubles reaccionan instantáneamente con cationes metálicos multivalentes para formar el correspondiente precipitado de silicato metálico insoluble. Ejemplos de iones metálicos comunes que son reactivos con el silicato son: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, etc. Si el material a ser aglomerado contiene una significativa cantidad de cationes en su superficie, el silicato puede actuar como un aglutinante químico. Las cenizas volantes son un ejemplo de un material que puede ser enlazado químicamente con silicato. Este tipo de reacciones puede usarse para formar pigmentos y compuestos que pueden utilizarse como extensores o selladores por medio de un intercambio iónico, catalizadores, absorbentes, etc. El cloruro de calcio reacciona instantáneamente con soluciones de silicato. Las superficies de cemento Portland son endurecidas y se hacen menos porosas cuando se aplica una solución de silicato a pisos o paredes.

4. Interacción con compuestos orgánicos: Relativamente pocos compuestos orgánicos son compatibles con soluciones de silicato soluble concentrado. Solventes polares pueden causar una separación de fase o deshidratación. Para compuestos como la glicerina, sorbitol de azúcar y etilenglicol son miscibles y algunas veces se usan como humectantes y ayudan a plastificar la película de silicato. Los agentes de ésteres orgánicos son utilizados para producir un retraso en el tiempo de gelación de las soluciones de silicato



Figura 2.11. Silicato de sodio en presentaciones solida y liquida.

## 2.6.2 Propiedades físicas y químicas de los silicatos

### a) Viscosidad

Desde el punto estándar de aplicaciones, la viscosidad de las soluciones de silicato de sodio es una función de la relación, concentración y temperatura. La comparación de viscosidades de silicatos de sodio de varias relaciones, muestra que las viscosidades de soluciones más silíceas (relación más alta) aumentan más rápidamente con un incremento de concentración que aquellas de silicatos más alcalinos.

### b) pH

El pH de las soluciones de silicato está íntimamente relacionado con la concentración y la relación de peso. El pH decrece cuando se incrementa el contenido de sílice.

### c) Densidad

En la industria de silicatos, la densidad ha sido expresada en términos de grados Baumé que pueden ser convertidos en gravedad específica dividiendo 145 entre la resta de 145 con los grados Baumé. Cuando la temperatura se incrementa, la densidad decrece.

### 2.6.3 Proceso silicato / éster

Aunque no es un proceso puramente inorgánico, este proceso ha sido uno de los más utilizados en la industria de la fundición. Es un proceso de auto-endurecimiento, donde ocurre una deshidratación de la solución de silicato de sodio por la hidrólisis del éster y la neutralización de la solución de sosa cáustica reaccionando con ácido acético para formar acetato de sodio (ver figura 2.12). Por la saponificación (hidrólisis = absorción de agua) del éster en la solución alcalina de silicato, el ácido acético es liberado el cual cambia el valor del pH a ácido y resulta también un “gel” de silicato de sodio. Este proceso ha sido utilizado principalmente en las fundiciones de acero. Es un proceso seguro y amigable al medio ambiente.

El desarrollo del proceso de silicato de sodio con el catalizador líquido comenzó en 1964. Se conocían varios materiales capaces de gelar el silicato de sodio, pero ninguno con la suficiente rapidez necesaria para usarse como aglutinante en la industria de la fundición. En 1968 se introdujeron por primera vez catalizadores líquidos orgánicos base éster. Así, se desarrolló el silicato catalizado por ésteres usado como aglutinante para la producción de moldes y corazones de arena.

Este sistema trabaja bien con cualquier tipo de arena silica, así como también con arenas olivina, circonia y cromita. Durante la operación, no se producen gases durante la reacción entre el silicato y el éster, sin embargo, los aditivos incorporados al aglutinante ayudan a generar una mayor cantidad de

gases debido a la descomposición térmica de éstos. La vida de banco de los moldes y corazones de arena producidos con el sistema silicato/éster es mayor que con el sistema silicato/CO<sub>2</sub>.<sup>[24]</sup>

Proceso de endurecimiento: El endurecimiento de los silicatos catalizados por ésteres toma lugar progresivamente como resultado de las reacciones de hidrólisis y saponificación. Después de la dispersión del éster en el aglutinante, el éster hidroliza lentamente para formar un ácido débil y un alcohol. El ácido débil reacciona con la porción de sosa del silicato para formar una sal de sodio y la combinación de grupos hidroxilo OH<sup>-</sup> en el silicio, resultando una gelación de éste. La velocidad de reacción depende en la temperatura de curado, la relación de SiO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>O, y el tipo de éster usado. El diacetato de glicerol, el diacetato de etilenglicol y el triacetato de glicerol son los tres tipos de ésteres más usados.

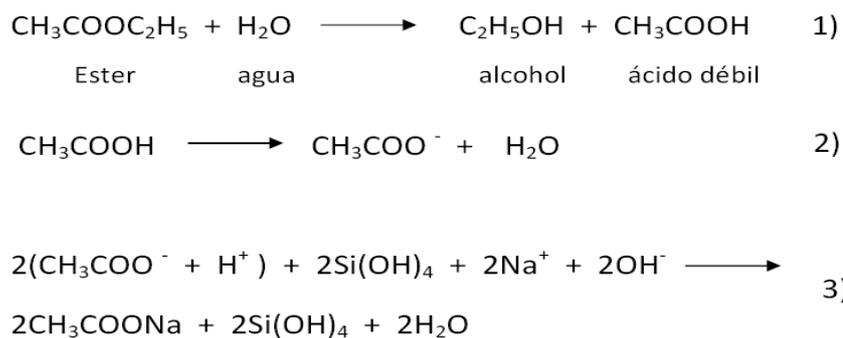


Figura 2.12. Reacciones del proceso silicato / éster

Aditivos: el silicato de sodio en si tiene relativamente pobres características de desarenado que son influenciadas tremendamente por el incremento de temperatura que ocurre durante el vaciado de las piezas. Hulla, carbón, azúcar, harina de madera, melazas, brea, silicato de alúmina, y mezclas de esos materiales ayudan a un mejor desarenado. Los polisacáridos mejoran también el desarenado y la recuperación de la arena.

#### 2.6.4 Proceso silicato / CO<sub>2</sub>

El proceso de silicato curado con CO<sub>2</sub> ha sido usado en la industria de la fundición desde 1950. Este sistema fue reconocido como el primer proceso de caja fría, desarrollado por primera vez en la antigua Checoslovaquia. Dos aspectos positivos del sistema silicato / CO<sub>2</sub> dieron pie al usar cada vez más este proceso aparte de otros procesos de caja fría. Primero, es basado en compuestos inorgánicos. Segundo, debido a que el CO<sub>2</sub> es un gas no irritante, no tiene que ser capturado y neutralizado.

En este proceso, los moldes y los corazones son fabricados de arena sílica con un 5-7 % de solución de silicato de sodio para después ser curado por gaseo con CO<sub>2</sub> en un tiempo de 15 a 30 segundos. Se requiere alrededor de 0.6 kg de CO<sub>2</sub> para 1 kg de silicato de sodio. El proceso de curado involucra dos mecanismos distintos: la gelación y la deshidratación.

Una precipitación ácida del silicato de sodio toma lugar debido al gaseo con el dióxido de carbono. La solución de silicato de sodio gela con la formación de carbonato de sodio Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, el principal ingrediente para fabricar el silicato de sodio. Este proceso es fácil de llevar a cabo y no involucra sustancias peligrosas. Ya que el agua no se extrae del molde en este proceso, la resistencia inicial de los corazones y moldes no es muy alta. Los moldes y corazones solamente llegan a ser completamente sólidos cuando entran en contacto con el calor del vaciado y son después difíciles de remover. Sin embargo, las soluciones de sodio usados para esto son usualmente suplementadas con melazas y otros aditivos que faciliten su desarenado.

Así, el ácido monosilícico y el carbonato de sodio son los productos, mostrado en la figura 2.13. El ácido monosilícico, un monómero, se vuelve inestable y se combina con otro monómero, resultando en un dímero. Ese dímero actúa con otro monómero, el cual produce un trímero. Y así, la unión Si-O-Si, la cual es llamada siloxano, produce un polímero cuando crece linealmente y gela cuando crece aleatoriamente en tres dimensiones. En el proceso de

deshidratación, el gel de sílica hidratado se seca para formar un enlace vítreo, etapa en la cual se logra la resistencia final.

Uno de los mayores problemas de este proceso es la tendencia a que algunas partes del corazón se sobregaseen, para asegurar que todas las partes del corazón sean curadas. Esto lleva a la formación de bicarbonato de sodio, observado como cristales blancos en la arena, lo que ocasiona una baja vida de banco y corazones muy frágiles. [22]

Características del proceso:

- La reacción química es irreversible.
- Resistencias obtenidas bajas.
- El agua (disolvente) se queda en el corazón.
- A elevadas temperaturas el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el  $\text{SiO}_2$  forman una fase de cristal estable.
- Las arenas para corazones unidas con silicato de sodio y dióxido de carbono en general no se pueden regenerar, o es muy difícil realizarlo.

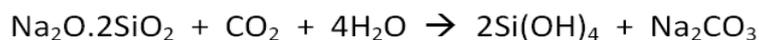
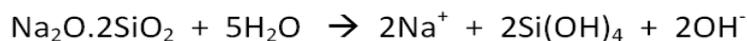
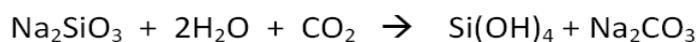


Figura 2.13. Reacciones del proceso silicato /  $\text{CO}_2$

### 2.6.5 Proceso de deshidratación

El proceso de deshidratación depende de la relación o módulo de componentes químicos utilizados en la fabricación de la resina y la temperatura del proceso, entre mayor sea la relación óxido de sodio – óxido de silicato y la temperatura, el agua se separará más rápidamente.

El proceso de endurecimiento incluye fases químicas y físicas: El silicato de sodio precipita al cambiar el pH y subsecuentemente gana estabilidad como resultado de la deshidratación (figura 2.14). [25]

Características del proceso:

- La reacción es reversible.
- Los corazones quedan libres de agua, por lo que tienen una mayor capacidad de almacenamiento.
- Las resistencias que se obtienen son muchos mayores, solo se agregan pequeñas cantidades de aglutinantes.
- No se produce carbonato de sodio, por lo que no se forman gases a temperaturas de fundición.

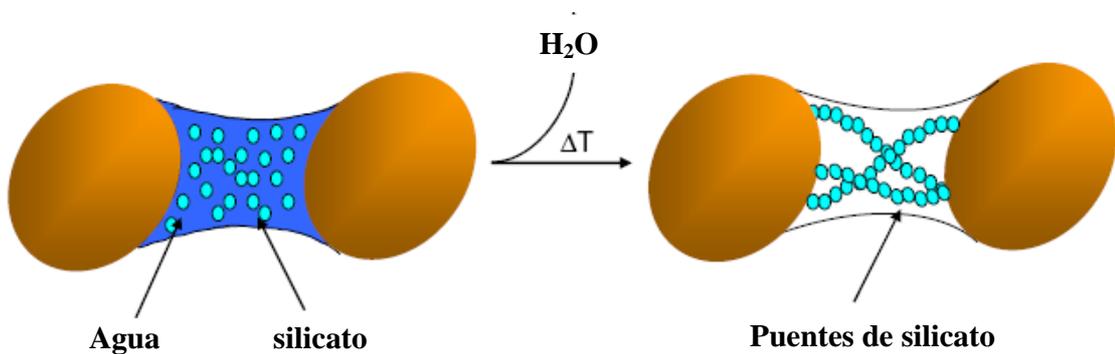


Figura 2.14. Proceso de deshidratación del aglutinante base silicato

## 2.6.6 Otros procesos usando silicatos

### A) Proceso VPG

Este proceso proviene del Instituto Tecnológico Danés, el cual requiere como materia prima soluciones de silicato de sodio a ser pulverizadas. Este polvo es mezclado con agua y la arena. Los corazones son curados con aire caliente e implica el uso de  $\text{CO}_2$ .<sup>[26]</sup>

### B) Proceso silicato/cemento

Este corresponde a un proceso de auto endurecimiento del cemento con deshidratación de una solución de silicato de sodio, el cual acelera el endurecimiento.

### C) Proceso silicato/arcilla

También involucra un proceso de auto endurecimiento en el cual el silicato y bentonita son mezclados con arena. El curado puede ser acelerado por la adición de calor o por  $\text{CO}_2$  gaseoso.

### D) Proceso Nishiyama

La arena es mezclada con un 4 – 7% de una solución de silicato de sodio, en el cual entre 1 y 4% de de ferrosilicona ( $\text{FeSi}$ ) en polvo es adicionado. A temperaturas por encima de los 15C, el  $\text{FeSi}$  se disuelve en el silicato de sodio con el Si reaccionando para formar ácido silícico.

### E) Proceso cemento/arena

En este proceso, la cal, arcillas y arena son mezclados juntos y horneados. Esta mezcla contiene óxido de calcio y ácido silícico como la sustancia activa aglutinante. La ventaja de este proceso es que, similar al uso de cemento para construcción, el agua es añadida al polvo para obtener una pasta moldeable la cual endurecerá sin algún secado o compactación especial. Esto permite una alta precisión de los moldes con buena permeabilidad de gas, mientras que los

materiales son poco costosos y son más amigables al ambiente. La desventaja, sin embargo, es que la masa endurecida no exhibe elasticidad y, como resultado, el daño puede ocurrir cerca de los bordes del molde. Además de esto, el desarenado después del vaciado es también pobre.

### 2.6.7 Silicato de sodio y otros materiales

Muchos materiales han sido encontrados para ser compatibles con el silicato de sodio. Éstos han sido mezclados en diferentes porcentajes para modificar la acción del silicato para diferentes propósitos. Algunos de éstos son: glicerina, sulfonato de arilo, éster maléico, etilenglicol, sorbitol, hule sintético y natural, arcillas, cal, carbonato de calcio, caliza, almidones, dextrina, azúcar, caseína, albúmina, disulfuro de carbono, dicromatos, alúmina, sulfato de aluminio, bórax, ácido bórico, cloruro de aluminio, aluminatos, fosfatos, etc. [27]

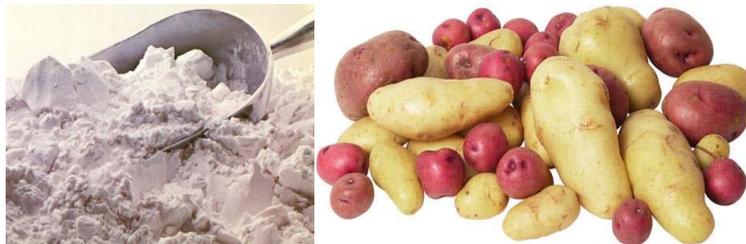


Figura 2.15. Almidón de papa utilizado como aglutinante o aditivo en la fabricación de corazones.

## 2.7 Nuevos aglutinantes inorgánicos

La diferencia entre los antiguos sistemas aglutinantes usando  $\text{CO}_2$  y los nuevos aglutinantes inorgánicos es el tipo de curado y los aditivos. En vez de curar con dióxido de carbono, ahora el método de curado es hecho usando temperatura o en caja caliente. La mayoría de los nuevos aglutinantes tienen eso

en común: el proceso de curado es activado aplicando calor. Cajas calientes con temperaturas entre 80°C y 180°C son alimentadas para promover la deshidratación del aglutinante o la remoción del agua.

Los nuevos procesos difieren principalmente en la composición de los aglutinantes y el proceso de curado (deshidratación y/o remoción física de agua).

Componentes principales de los nuevos aglutinantes:

- Polifosfatos.
- Sulfato de magnesio.
- Silicato de sodio + fosfatos + boratos.
- Silicato de sodio/potasio + NaOH como estabilizador de humedad.
- Silicato de sodio + silicato de aluminio como acelerador.

## **2.8 Principales ventajas y desventajas de los aglutinantes inorgánicos**

Los sistemas inorgánicos de aglutinación usando silicatos presentan una gran lista de ventajas, incluyendo las siguientes:

1. El proceso es ambientalmente limpio.
2. Las materias primas son abundantes y relativamente baratas.
3. Cualquier tipo de mezclador puede ser utilizado.
4. Es completamente compatible con moldes de plástico, madera y metales.
5. Trabajan muy bien con moldes horneados de arena en verde.
6. La resina del sistema puede ser lavada con agua.
7. Depósitos de arena residual son relativamente poco complicados.

8. Modificaciones a estos sistemas aglutinantes para mejores características de acabado y nuevas mezclas usando bórax, resinas poliméricas y almidones han sido introducidas para mejorar el desarenado, ciclos de gaseo o temperatura y resistencias.

Sin embargo, algunas de las desventajas que presentan estos tipos de aglutinantes se enlistan a continuación:

1. Bajas resistencias que presentan los corazones en condiciones extremas de humedad.

2. Los corazones que presentan puentes o canales delgados tienden a agrietarse con facilidad, debido a su fragilidad.

3. Mal desarenado.

4. Arena pegada en las piezas metálicas, sobre todo en aquellas partes donde el desarenado fue malo.

5. Recuperación de la arena con silicato, debido a que los granos de arena quedan con capas de silicato de sodio, lo que hace que el pH de la arena aumente.

Esfuerzos hacia un mayor desarrollo de sistemas de aglutinación base silicatos están en marcha. Aquellos que están siendo investigados actualmente probablemente continuarán desarrollándose y en el futuro más gente los estará examinando debido a sus sobresalientes ventajas ambientales. <sup>[28]</sup>

Resumiendo, las mayores desventaja de los aglutinantes inorgánicas son su baja resistencia a la humedad, sus características de desarenado y la recuperación de la arena residual.

## 2.9 Recuperación de la arena

La recuperación de la arena en la fundición tiene como objetivo principal restablecer la calidad de la arena que ya fue utilizada y reducción de costo de la materia prima. En este proceso es muy importante minimizar las fuentes de contaminación como son: tierra, piedras, madera, partículas metálicas, plástico, etc. <sup>[29]</sup>

Existen diferentes procesos para recuperar la arena después de que fue utilizada en la fabricación de moldes o corazones: atrición neumática, atrición mecánica y recuperación térmica.

a) Atrición neumática: Este equipo desmenuza los terrones de arena haciendo pasando una corriente de aire en contra flujo al movimiento de la arena, proyectando los granos de arena contra las paredes del equipo y unos contra otros, rompiendo y separando la resina de los granos de arena.

b) Atrición mecánica: Este equipo deshace los terrones de arena mediante movimientos de oscilación en el centro de la carga del material a recuperar, que fricciona los terrones unos contra otros rompiendo así las uniones entre la resina y los granos de arena.

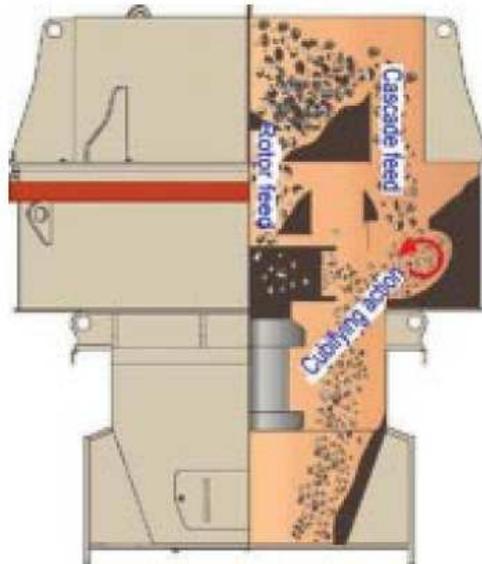


Figura 2.16. Sistema atricionador de arena que combina el impacto y redondeo del grano.

c) Recuperación térmica: En estos equipos la arena, previamente desmenuzada, es pasada a través de un horno por medio del movimiento que genera una cama fluidizada. Los granos de arena van saltando aproximadamente a 30 cm de altura y durante su trayectoria se exponen a la flama que permanece en el interior del horno, así se incinera la resina que está adherida a la superficie del grano. Este proceso trabaja con temperaturas que van de 500 a 850 °C. Entre estas temperaturas se rompen los enlaces orgánicos de las capas de resina que recubren los granos de arena. Este tipo de recuperación es el más adecuado para los procesos orgánicos. El indicador de la eficiencia de recuperación es el L.O.I. (pérdidas por ignición).

d) Recuperación por lavado: El agua hace un muy buen trabajo al remover el aglutinante, sin embargo no es lo suficientemente económico, aparte de que es necesario mucho calor para secar la arena. Este método no es aplicable para aglutinantes orgánicos que no son solubles en agua. Para aglutinantes inorgánicos base silicatos, la recuperación por vía húmeda es un método útil, sin

embargo, el óxido de sodio de los silicatos tiende a acumularse en los granos de arena, cambiando la composición del silicato y afectando sus propiedades. [30]

Entre algunos factores que afectan la recuperación están:

- Contenido de aglutinante.
- Acabado de la pieza metálica.
- Tipo de arena.
- Aditivos.
- Tipo de sistema aglutinante

## **2.10 Mejoras de aglutinantes al medio ambiente**

En la década pasada, muchas mejoras en aglutinantes de arena han resultado en mejor calidad, alta productividad, y han contribuido a los trabajadores una mayor seguridad e higiene en el trabajo. Esos cambios usualmente involucran la eliminación de prácticas inútiles y un mejor control en las variables del sistema.

*Aglutinantes libres de plomo.* La eliminación del plomo no sólo beneficia a los trabajadores, sino que además han hecho a la arena residual de la fundición más segura y más fácil de reusar, recuperar y disponer. El uso más común de plomo en aglutinantes es en las resinas uretánicas. La industria de las pinturas encontró combinaciones de otros metales para remplazar el plomo como un agente de secado. Fabricantes de resinas para fundición han hecho lo mismo. Hoy

en día, la mayoría de los sistemas aglutinantes en la industria de la fundición están disponibles en versiones libres de plomo.

*Reemplazo de solventes.* Los solventes clorinados se han regulado muy estrictamente debido a la inhalación por su exposición, así como también por el daño que ocasionan a la capa de ozono. El uso más común de estos solventes es en el área de fabricación de moldes y corazones donde son usados como desmoldantes<sup>50</sup> y como un rápido agente de secado en pegamentos. El desempeño de estos solventes en esas aplicaciones proporcionan las ventajas de un rápido secado sin que sean inflamables. Éstos compuestos utilizados como desmoldantes se han ido reemplazando por el uso de solventes inflamables de rápido secado, así como por el uso de emulsiones base agua.

*Formaldehido.* El formaldehido está presente en muchos sistemas aglutinantes actuales, y la exposición de éste compuesto se ha tomado a consideración. Los proveedores de aglutinantes se han esforzado para reducir el contenido de formaldehido y reducir su emisión durante el curado. Las resinas fenol-formaldehido contienen formaldehido libre desde su proceso de fabricación, por lo que se requiere una ventilación cerca del área de mezclado o de un extractor donde el aire fluya lejos de los trabajadores para mantener los niveles de formaldehido bajo los límites de exposición permisibles.

*Compuestos orgánicos volátiles (VOC's).* Los compuestos orgánicos volátiles son compuestos químicos que se emiten a la atmósfera, provenientes de la evaporación durante su uso. Las reducciones en las emisiones de los VOC's pueden ser logradas usando solventes que sean menos volátiles y aumentando el contenido de sólidos del aglutinante para reducir el contenido de solventes. Estos sistemas bajos de VOC's pueden resultar en muchos menos olores en el mezclado y una menor evolución de gases durante el proceso de vaciado.

*Materiales reactivos fotoquímicamente.* Son una clasificación especial de los VOC's, que han llegado a ser estrictamente regulados en varios países. Estos materiales contribuyen fuertemente a las reacciones fotoquímicas que producen el smog y el ozono.

# CAPITULO 3

## Experimentación

### 3.1 Introducción

El objetivo de este trabajo es desarrollar un aglutinante inorgánico para producir corazones, tanto por caja caliente como por caja fría, que sean capaces de tener buena resistencia en desarrollo, en humedades altas, así como tener un buen desarenado y la posibilidad de recuperar esa arena con resina base inorgánica. Así mismo, evaluar la resistencia en caliente y la evolución de gases que genera la mezcla de arena/aglutinante.

Los parámetros que se decidieron variar para el proceso de caja caliente fueron:

- Tipo de silicato de sodio de acuerdo a la relación  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ .
- Concentración del silicato de sodio en la arena.
- Temperatura de curado.

Los parámetros que se mantuvieron constantes en el mismo proceso de caja caliente fueron:

- Tipo y granulometría de arena.
- Tiempo de curado

En la tabla 3.1 se presentan los experimentos a realizar, variando la temperatura, concentración de silicato en la arena y tipo de silicato.

Condición	Temperatura de caja	% Silicato	Tipo de Silicato
1	120	1.5:1.5	A
2	120	1.5:1.5	B
3	120	1.5:1.5	C
4	120	2.0:1.0	A
5	120	2.0:1.0	B
6	120	2.0:1.0	C
7	120	2.5:0.5	A
8	120	2.5:0.5	B
9	120	2.5:0.5	C
10	150	1.5:1.5	A
11	150	1.5:1.5	B
12	150	1.5:1.5	C
13	150	2.0:1.0	A
14	150	2.0:1.0	B
15	150	2.0:1.0	C
16	150	2.5:0.5	A
17	150	2.5:0.5	B
18	150	2.5:0.5	C
19	180	1.5:1.5	A
20	180	1.5:1.5	B
21	180	1.5:1.5	C
22	180	2.0:1.0	A
23	180	2.0:1.0	B
24	180	2.0:1.0	C
25	180	2.5:0.5	A
26	180	2.5:0.5	B
27	180	2.5:0.5	C

Tabla 3.1. Diseño de experimentos

### 3.2 Tipos de silicatos de sodio según relación $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$

Los silicatos de sodio líquido son soluciones en agua fabricadas a partir de proporciones variadas de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Dependiendo de su composición, dan un amplio rango de propiedades físicas y

químicas. Teóricamente, los óxidos de sodio y silicio pueden ser combinados en cualquier proporción. Sin embargo, los productos líquidos actuales no deben exceder una relación molar de  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Na}_2\text{O}$  de 3.5 a 1 ó inferiores a 1.6 a 1, esto debido a que pierden considerablemente sus propiedades fisicoquímicas.

Se investigarán como aglutinantes inorgánicos tres tipos de silicatos de sodio, de acuerdo a su relación  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ . El silicato A que tiene la menor relación, el silicato C que tiene la mayor relación, y el silicato B que tiene una relación entre el silicato A y el silicato C.



Figura 3.1. Aspecto físico que presentan los silicatos de sodio A, B y C.

### 3.3 Aditivos

Muchas veces, es necesario el uso de uno o varios aditivos para mejorar la propiedad de algún componente químico. Esos aditivos pueden ir mezclados ya sea dentro del aglutinante, o directamente en la arena.

Resistencia mecánica, resistencia a la humedad, desarenado, fluidez de la mezcla de arena, resistencia en caliente y acabado del corazón son algunas propiedades que se desean mejorar al usar silicatos y el uso de aditivos para mejorar éstas es útil en estos procesos.

Se probó el uso del siguiente aditivo:

- Aditivo como extendedor de vida de banco (EVB): La vida de banco de las mezclas de arena-silicato suelen ser malas, debido a que tienden a secarse con mucha rapidez, por lo que es necesario un aditivo para mejorar esta propiedad. En el presente trabajo se usa un extendedor de vida de banco, una solución líquida inorgánica con propiedades alcalinas.

### **3.4 Caracterización de la arena**

La caracterización de la arena se llevó a cabo realizando una prueba de su distribución granulométrica, así como también de la morfología de los granos por medio de microscopía óptica.

#### **3.4.1 Distribución granulométrica**

La granulometría o número AFS es la característica que indica el tamaño y la distribución del grano de la arena, el cual se representa por medio de un análisis de distribución de mallas de diferentes diámetros. El resultado indica si la arena es de tipo gruesa, mediana o fina.

##### **a) Arena gruesa**

AFS entre 20 y 45 con un contenido de finos menor a 3%. Tiene una menor área superficial, por lo que se necesita menor cantidad de resina para

recubrir el grano y mejora la permeabilidad del corazón, así como también una mayor fluidez de la mezcla.

b) Arena fina

AFS mayor a 55 con un contenido de finos mayor a 7%. Tiene una mayor área superficial, por lo que se necesita mayor cantidad de resina y los corazones resultantes tienen una menor permeabilidad.

Para determinar el tamaño de grano promedio o finura AFS es necesario realizar un ensayo el cual consiste en cuartear una muestra de arena para obtener una muestra representativa, para después colocarla en una serie de tamices de diferentes tamaños de malla y hacerlos vibrar alrededor de 15 minutos en un equipo conocido como Ro-Tap.



Figura 3.2. Agitador de mallas Simpson utilizado para realizar el análisis granulométrico.

### 3.4.2 Microscopía óptica

La forma del grano es una de las características fundamentales para la producción de corazones de arena debido a que de ésta depende el consumo de resinas. Como ya se ha mencionado, existen tres formas de grano: angular, subangular y redondo. La arena con grano redondo es la que menor resina utiliza debido a su menor área superficial.

El estereoscopio es utilizado para observar la superficie de los granos de la arena de recuperación que se utiliza en la experimentación.



Figura 3.3. Estereoscopio Olympus SZH10.

### **3.5 Caracterización de las resinas inorgánicas y aditivos**

Debido a que las propiedades físicas de los silicatos varían muy ampliamente, existe una gran cantidad de diferentes tipos de productos. Entre ellas están el grado de alcalinidad, el porcentaje total de sólidos, la relación en peso entre el dióxido de silicio y el óxido de sodio, la densidad, la viscosidad y el pH.

Las soluciones líquidas de silicato de sodio suelen tener cierto grado de viscosidad, ya que ésta depende de la relación entre  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ , así como también de la forma en que se procesaron los silicatos.

Otro factor importante a considerar en los silicatos es su pH, ya que también éste está relacionado con la relación de peso.

### 3.5.1 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad física muy importante de las soluciones de silicato de sodio solubles. Desde el punto de vista estándar de aplicaciones, la viscosidad de las soluciones de silicato de sodio es una función de la relación, concentración y temperatura.

La comparación de viscosidades de soluciones de silicato de sodio de varias relaciones muestra que las viscosidades de soluciones más silíceas aumentan más rápidamente con un incremento en concentración que aquellas de silicatos más alcalinos.

En la figura 3.4 se compara la viscosidad en un contenido constante de sólidos pero variando la relación. Los silicatos de sodio tienen una viscosidad mínima a una relación en peso de 2.0. Como se mencionó anteriormente, la viscosidad incrementa cuando la relación en peso llega a ser tanto más silícea o más alcalina.

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal, en realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones.

La unidad física de viscosidad en el Sistema Internacional de Unidades es el pascal-segundo (Pa·s), que corresponde exactamente a  $1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  ó  $1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ .

La unidad cgs para la viscosidad dinámica es el *poise* (p), cuyo nombre homenajea a Jean Louis Marie Poiseuille. Se suele usar más su submúltiplo el *centipoise* (cP). El centipoise es más usado debido a que el agua tiene una viscosidad de 1.0020 cP a 20 °C.

$$1 \text{ poise} = 100 \text{ centipoise} = 1 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}) = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}.$$

$$1 \text{ centipoise} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}.$$

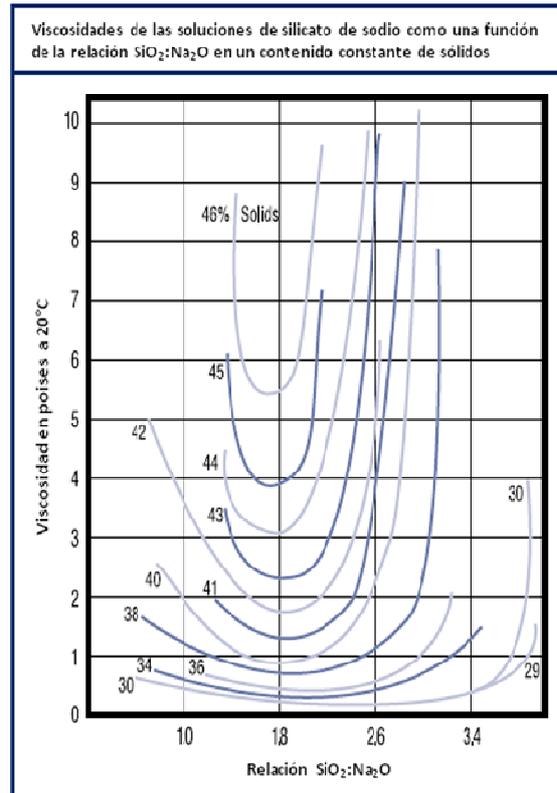


Figura 3.4. Comportamiento de la viscosidad en función a la relación en peso  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ .

El viscosímetro portátil Viscolite VL700 ha sido utilizado para determinar la viscosidad de las tres soluciones solubles de silicato de sodio empleadas durante la experimentación.



Figura 3.5. Viscosímetro portátil Viscolite VL700.

### 3.5.2 Medición del pH

El pH de las soluciones de silicato está íntimamente relacionado con la concentración y la relación de peso. El pH decrece cuando se incrementa el contenido de sílice. Análisis potenciométricos con ácidos muestran que el pH de las soluciones de silicato se mantiene hasta que el álcali es completamente neutralizado. La capacidad de amortiguamiento (habilidad de una solución en resistir cambios en el pH) aumenta cuando se incrementan las proporciones de sílice soluble. Sin embargo, aún las soluciones de silicato diluido mantendrá el pH relativamente constante a pesar de agregar ácido.

La alcalinidad es determinada usando el valor del pH o por el contenido total de alcalinidad por titulación.

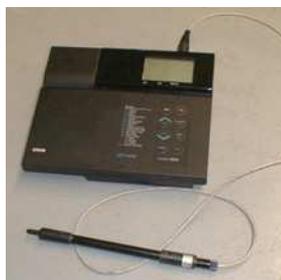


Figura 3.6. Equipo para medir pH Thermo Orion.

### Análisis químico de soluciones de silicatos

El contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  es determinado por métodos volumétricos, titulando una muestra con ácido clorhídrico estándar y usando como indicador el naranja de metilo o morado de metilo.

El contenido de  $\text{SiO}_2$  es determinado por métodos gravimétricos. Una muestra es disuelta en agua, acidificada con ácido clorhídrico y deshidratada en

un baño de vapor hasta secado. El precipitado es después aislado, calentado, y pesado como SiO<sub>2</sub>. La espectroscopia de absorción atómica es otro método para la determinación de sílice total en una muestra.

El contenido total de Na<sub>2</sub>O y SiO<sub>2</sub>, o el contenido total de agua en la solución de silicato, puede ser determinado por el método de sólidos totales, llevando una muestra de solución a calentar hasta deshidratación, obteniendo así el porcentaje total de sólidos.

### **3.5.3 Análisis termogravimétrico**

La termogravimetría o TGA es un tipo de prueba que se realiza en muestras para determinar cambios en su peso en relación a cambios en la temperatura. Tal análisis requiere de un alto grado de precisión en tres mediciones: peso, temperatura y cambio de temperatura.

El TGA es comúnmente empleado en investigación y pruebas tales como:

- Determinar características de materiales como polímeros.
- Temperaturas de degradación.
- Contenido de humedad absorbida en materiales.
- Componentes orgánicos e inorgánicos en materiales.
- Puntos de descomposición de explosivos.
- Residuos de solventes, aditivos, etc.
- Estudios cinéticos.



Figura 3.7. Analizador Termogravimétrico 50 Shimadzu

### 3.6 Procedimiento y equipo para elaborar probetas

El procedimiento para la fabricación de probetas es a partir de una mezcla de arena – resina. Se comienza pesando en un recipiente metálico 1000 gramos de arena de la planta recuperadora, que es la que comúnmente se utiliza para la fabricación de corazones. A continuación, se adiciona a la arena la cantidad de aditivo a utilizar y se agita en un mezclador de arena Hobart por espacio de 45 segundos (figura 3.8). Finalmente se añade a esa mezcla la cantidad necesaria de silicato de sodio y se mezcla por 45 segundos, para tener así la mezcla de arena – resina. Teniendo ya este kilo de mezcla de arena, se pasa a soplar y poder obtener al menos 9 probetas para sus posteriores ensayos mecánicos.



Figura 3.8. Mezclador de arena – resina Hobart.

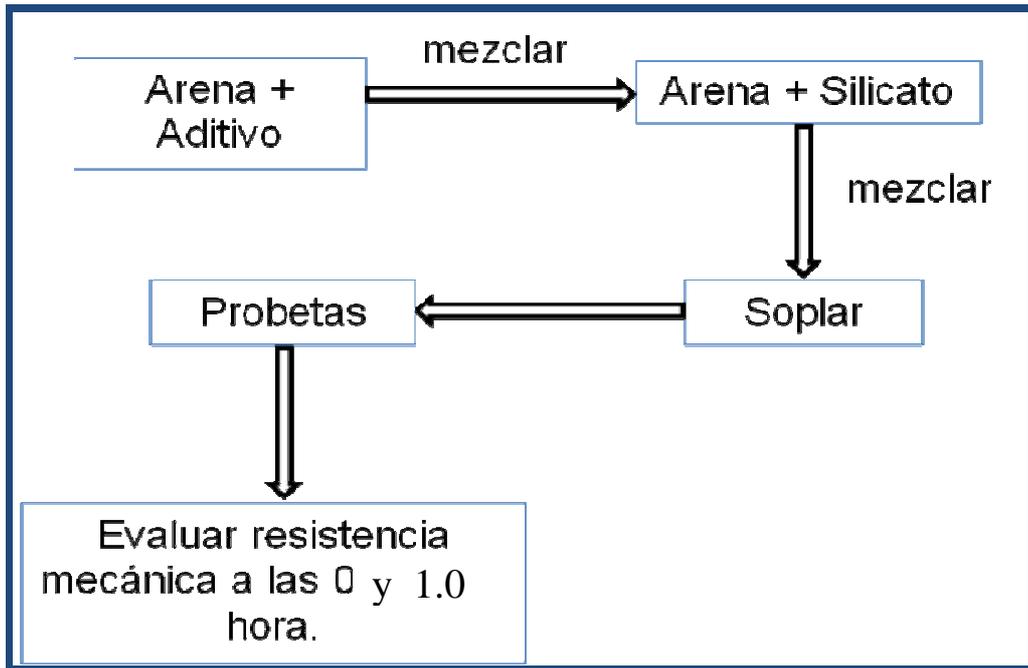


Figura 3.9. Procedimiento de elaboración de probetas.

### 3.7 Caja Caliente

El proceso de caja caliente implica soplar la mezcla de arena dentro de una caja calentada por medio de resistencias eléctricas. El propósito de este proceso es el de deshidratar los corazones de arena por medio del uso de calor, para así remover el agua de las resinas líquidas y promover el proceso de curado. Se puede decir que el catalizador en este proceso es el mismo calor. Sin embargo, el uso de la caja caliente como medio de curado también puede ser acompañado por medio del uso de otro medio, tal como algún aditivo o catalizador líquido, o el uso de aire para promover el secado.

Dentro de la caja caliente se sopla la mezcla de arena y resina, usando aire comprimido y seco. La presión de soplado debe ser de 0.50 a 0.70 MPa.

Este proceso difiere al proceso Shell en que usando caja caliente, la resina es líquida, y no seca, como es el caso del Shell, además de que es un proceso más rápido y barato.



Figura 3.10. Sopladora Redford de caja caliente para elaboración de probetas.

Las ventajas y desventajas del proceso de caja caliente son enlistadas a continuación:

- a) Ventajas
  - Alta capacidad de producción.
  - Tiempos rápidos de curado.
  - Altas resistencias de los corazones.
  - Alta estabilidad de los corazones.

b) Desventajas

- Limitación en las secciones de arena.
- Control más estricto de venteo.
- Algunas tolvas pueden requerir enfriamiento con agua.

### **3.7.1 Temperatura y tiempo de curado en caja caliente**

Dependiendo del tipo y forma del corazón, así como del tipo de resina usada, es como se decide el tiempo y temperatura de curado.

El tiempo de curado tiene que ser lo necesario como para eliminar toda el agua contenida en los aglutinantes químicos y así que se puedan formar los corazones o moldes. El tiempo puede variar desde 1 hasta 4 minutos, dependiendo de las dimensiones del corazón.

En cuanto a la temperatura de curado, esta debe de ser mayor a 100°C para eliminar en su mayoría el agua contenida en los corazones. Dependiendo de la resina utilizada, es conveniente ver hasta que temperatura es conveniente usar, ya que los enlaces del aglutinante pueden verse afectados por las altas temperaturas y así tener corazones con bajas resistencias mecánicas.

### **3.8 Análisis y ensayos**

Ya una vez que se han fabricado las probetas a partir de la mezcla de arena – resina, estas se someten a ensayos ya sean mecánicos, térmicos, químicos, físicos o dimensionales. Estos ensayos ya están estandarizados y se apegan a las normas de la AFS. Es importante que las probetas no tengan porosidades o estén incompletas, ya que un corazón incompleto puede afectar el resultado esperado, por lo que se requiere un buen soplado.

El tipo y geometría de la probeta dependerá del tipo de ensayo a realizar. A veces es sólo necesario tener cierta cantidad de la mezcla para hacer algún tipo de ensayo ya sea cualitativo o cuantitativo, o con solo raspar o frotar los corazones entre sí para obtener una muestra de arena y hacer su posterior análisis o ensayo.

### **3.8.1 Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas son las propiedades más importantes que van a tener los moldes y corazones de arena, ya que implica su resistencia mecánica la capacidad para ser manejados, transportados, ensamblados y de comportarse en el momento del vaciado. Cualquier agrietamiento o porosidad en el corazón puede ocasionar que éste se colapse al momento de ser utilizado. La capacidad de almacenamiento del corazón tiene que ser lo suficientemente alta como para resistir varios días sin ser usado, además de las condiciones de humedad relativa presentes en el ambiente.

Las probetas de tensión usadas en estos ensayos tienen las dimensiones que se muestran en la figura 3.11. La probeta de tensión es usada en ciertos casos para validar la densidad del corazón.

Los ensayos de resistencia mecánica fueron realizados en condiciones de laboratorio, esto es, a 30% de humedad relativa y 23°C.

El tiempo de curado utilizado para las pruebas en caja caliente fue de 3 minutos para todas las condiciones.

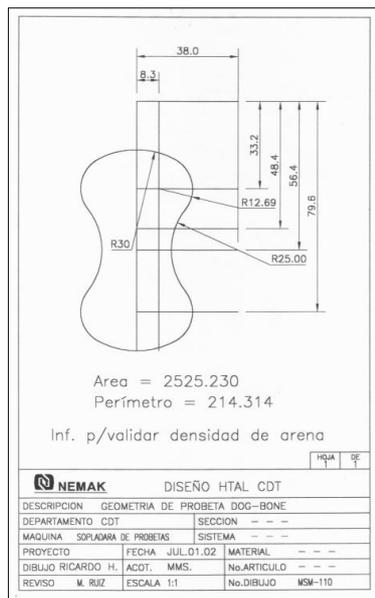


Figura 3.11. Probetas de tensión.

Los ensayos realizados en un corazón para evaluar sus propiedades mecánicas son las siguientes:

- Resistencia inmediata: es la resistencia mecánica que tiene el corazón inmediatamente después que ha sido fabricado.
- Desarrollo de resistencia: es la resistencia mecánica que tiene el corazón después de un tiempo de fabricación expuesto a temperatura y humedad relativa ambiente. Se puede realizar el ensayo una vez que ha pasado una, dos o hasta 24 horas de haber fabricado el corazón.
- Desarrollo de resistencia a alta humedad relativa: es la resistencia mecánica que tiene el corazón después de un tiempo de fabricación expuesto a temperatura ambiente pero a una humedad relativa mayor al 60%.
- Vida de banco: Es un indicativo de la vida útil de la arena y resina mezclada. En este ensayo se utiliza la misma mezcla una vez que ha

pasado media, una o dos horas a temperatura y humedad ambiental, indicándo que tanta resistencia mecánica ha perdido desde que se fabricó la mezcla de arena y resina.



Figura 3.12. Tensómetro digital para corazones Simpson Gerosa.

### **3.8.2 Distorsión en caliente**

Esta prueba se considera como una de las más importantes dentro de la industria de la fundición en moldes de arena, debido a la gran cantidad de información que ésta genera. En general, en esta prueba se obtienen datos sobre el cambio de dimensiones que ocurren en una probeta al momento de calentarse. Es como una simulación sobre los cambios dimensionales que se presentan en los corazones y moldes de arena al momento de ser vaciado el metal líquido.

Este cambio se ha estudiado desde 1966, cuando la Asociación Inglesa de Investigación en la Fundición de Hierro (BCIRA por sus siglas en ingles) diseñó el equipo para medir tal propiedad.

Las probetas para medir la distorsión en caliente son barras delgadas las cuales van a ser expuestas a una flama con una relación aire-gas estándar. En esta prueba se obtiene la expansión máxima de dicha barra, su plasticidad y el tiempo máximo de ruptura expuesto a la flama.

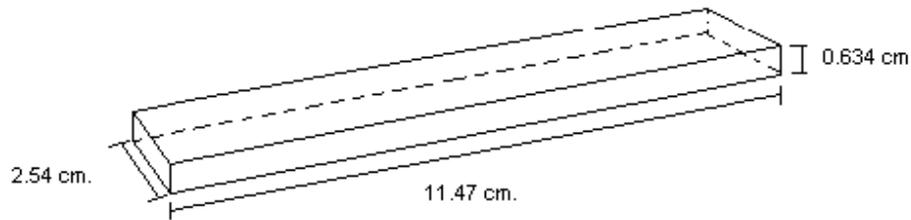


Figura 3.13. Probeta de distorsión en caliente (ensayo BCIRA)

La prueba de distorsión en caliente consiste en sujetar por de un extremo una probeta rectangular de dimensiones de 25 x 6.35 x 114 mm y calentarla fuertemente en el centro de la cara inferior mediante con quemador de gas regulado con un flujo de gas de 1.20 L/min que corresponde a una entrada de calor de 11 kcal/min (utilizando gas natural). Mientras la probeta gana calor, ésta sufre una serie de eventos que son registrados por un sensor y son plasmados en una gráfica.

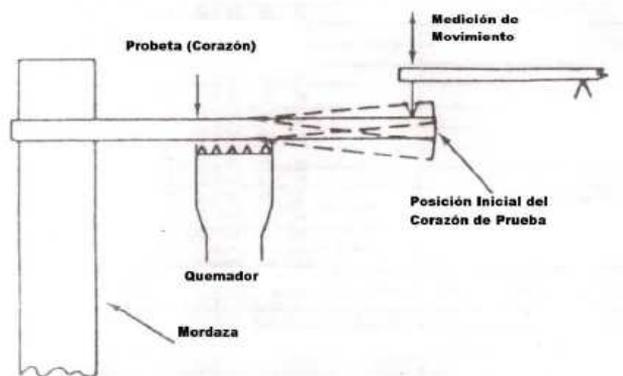


Figura 3.14. Diagrama de la prueba de distorsión en caliente.

La gráfica que generada por este equipo se compone de cuatro áreas, cada una de las cuales representa una propiedad desarrollada por la probeta. La primera de ellas representa la expansión que sufre la probeta al ser expuesta directamente a la flama. La segunda región representa la expansión máxima y la

velocidad de expansión de dicha probeta. La tercera región de la grafica es regida por el fenómeno de termoplasticidad y termoendurecimiento, los cuales son propiedades de los materiales poliméricos. Esta región está en función del tipo y cantidad de resina utilizada. La cuarta región es debida a la degradación química de la resina (si es que la hay). En esta última región ocurre la colapsabilidad de la probeta. El tiempo total desde que inicia la prueba hasta que se presenta la falla mecánica de la probeta se interpreta como la resistencia en caliente que posee dicha resina.

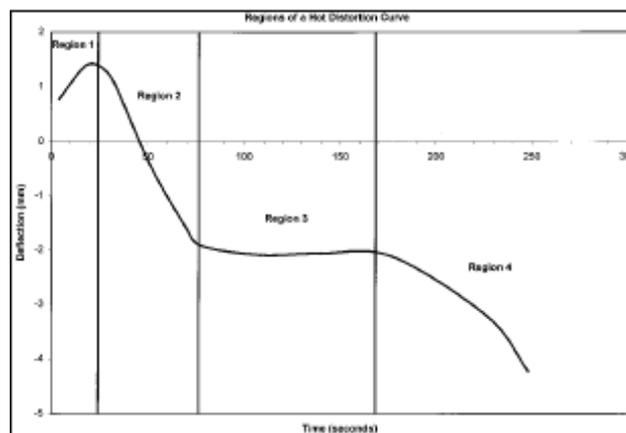


Figura 3.15. Esquema de distorsión en caliente.

Factores que deben tomarse en cuenta al realizar la prueba de distorsión en caliente:

- Tipo de arena.
- AFS de la arena.
- Tipo de resina.
- Curado (temperatura y tiempo).
- Densidad del corazón.

### 3.8.3 Cámara de Humedad

Para realizar las pruebas mecánicas a diferentes porcentajes de humedad relativa, se utiliza la cámara húmeda, en donde se puede controlar el porcentaje de humedad y la temperatura.

El método para utilizar este equipo consiste en meter las probetas que se quieren probar, cerrar la compuerta de la cámara, y controlar la temperatura a 25°C y al porcentaje de humedad que se desee, para después de ciertas horas retirar las probetas y evaluar sus propiedades mecánicas.



Figura 3.16. Cámara Húmeda

### 3.8.4 Evolución de gases

Este análisis proporciona la cantidad de gas que genera una muestra representativa de corazón. Este factor es de suma importancia debido a que la generación de altos volúmenes de gas provoca defectos como rechupes, porosidad y grietas en las piezas.

Diferentes contaminantes (pegamentos, pinturas, basura contenida en el metal reciclado), componentes de la arena, o la misma resina (mayor cantidad de solvente, aditivos, cambios en la formulación química de la resina, etc) provocan la generación de estos gases.

El análisis de evolución de gases se hace por medio de un equipo que recibe el mismo nombre que la prueba. El procedimiento consiste en introducir en una cámara con gas inerte y a una temperatura de 850°C una muestra de arena, arena con resina o de algún componente que sea sujeto a este estudio y medir la cantidad en unidades de  $\text{g/cm}^3$  de gas que es desprendido en cierto lapso de tiempo.



Figura 3.17. Equipo DISA George Fisher para la medición de la evolución de gases.

### **3.8.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

El SEM (Scanning Electron Microscope) es un tipo de microscopio electrónico que muestra la superficie de una muestra mediante un barrido con un haz de electrones de alta energía. Los electrones interactúan con los átomos para producir señales que contienen información acerca de la topografía de la superficie de la muestra, composición y otras propiedades tales como conductividad eléctrica.

En el presente trabajo se aplica esta técnica para observar los tipos de puentes existentes entre los granos y la resina, de acuerdo al método usado.



Figura 3.18. Microscopio electrónico de barrido.

# **CAPITULO 4**

## **Resultados y discusión**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la experimentación llevada a cabo y se analizan los mismos. Se analizan y discuten los resultados de la caracterización de la arena y las resinas, hasta las pruebas mecánicas y físicas de los corazones. También se comparan el uso de diferentes métodos de fabricación de corazones de arena y se discute cada uno.

### **4.2 Caracterización de la arena**

La arena utilizada en la presente experimentación es arena sílica recuperada térmicamente del horno en la que se calcina. Este tipo de arena es la que comúnmente se utiliza en la empresa Nematik para la fabricación de corazones por medio del proceso de caja fría.

Es importante considerar las características de esta arena, ya que ésta pasará por un medio de aglutinación muy diferente al que comúnmente recibe, como lo es el sistema orgánico de caja fría fenol-formaldehído. La idea de usar esta arena es por el hecho que en cierto plazo ésta pueda ser usada tanto como por el proceso de caja fría como por el proceso inorgánico, así que es importante observar las características de la arena antes y después de ser pasada por el sistema de aglutinación inorgánico.

#### 4.2.1 Distribución granulométrica de la arena utilizada

La Tabla 4.1 presenta la distribución granulométrica de una muestra de 25 gramos de arena recuperada de proceso Nemark, la cual se toma una muestra al azar y se cuartea para tener una composición homogénea de ésta.

Tabla 4.1 Distribución granulométrica de la arena recuperada de caja fría

No. De malla	Total acumulado	Retenido por malla			
		gramos	%	Factor	Producto
20	0.0	0.0	0.00	12	0.00
30	0.0	0.0	0.00	20	0.00
40	5.8	5.8	11.69	30	350.81
50	22.8	17.0	34.27	40	1370.97
70	40.3	17.5	35.28	50	1764.11
100	47.8	7.5	15.12	70	1058.47
140	49.3	1.5	3.02	100	302.42
200	49.5	0.2	0.40	140	56.45
270	49.6	0.1	0.20	200	40.32
Fondo	49.6	0.0	0.00	300	0.00
Total	49.6	49.6	100.00		4943.55
AFS	49				
% Finos	0.6				

La distribución granulométrica indica cómo se distribuye el tamaño de los granos, sin embargo es más preciso tener los datos del acumulado en las mallas. Como se observa en la figura 4.1, la arena está compuesta por 4 mallas que son las mallas 40, 50, 70 y 100.

Entonces, la arena que será utilizada tiene un número de AFS de 49 y un porcentaje de finos máximo de especificación de 1.5.

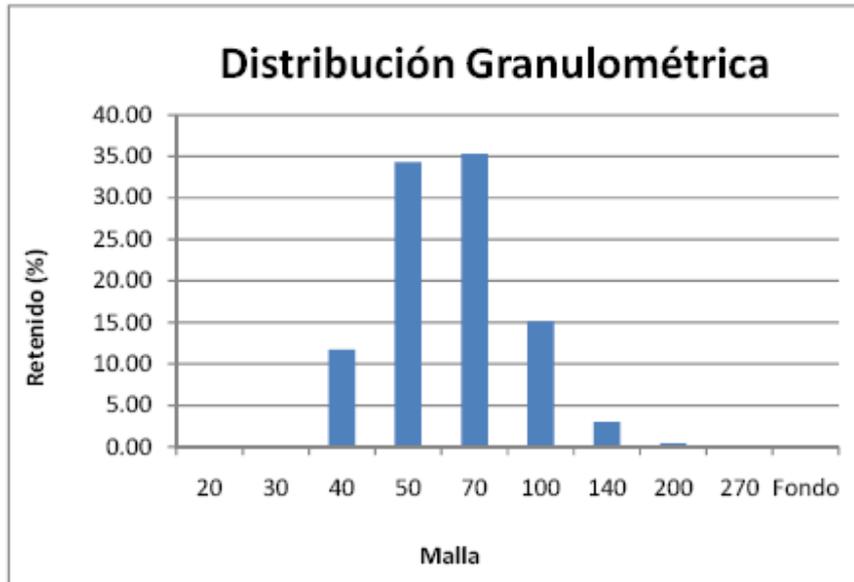


Figura 4.1. Distribución granulométrica de la arena.

#### 4.2.2 Morfología de los granos

El tipo de arena idónea para el proceso de caja fría es aquella que tiene una morfología redonda. En este trabajo se continuó trabajando con este tipo de arena, ya que es la óptima y con la que se trabaja diariamente en el proceso comúnmente usado, sin embargo, será importante considerar a futuro el uso de otros tipos de arena con morfología y AFS diferentes para ver el comportamiento del aglutinante inorgánico con respecto al tipo de arena.

Las imágenes de los granos de arena fueron obtenidas mediante el estereoscopio, donde se puede apreciar la forma de grano de la arena recuperada.



Figura 4.2. Morfología de los granos de arena

Los granos de arena presentados en la figura 4.1 presentan una forma redondeada, mientras que la coloración presentada es debido a los tratamientos térmicos que ha sufrido la arena para su recuperación.

### **4.3 Caracterización de las resinas y aditivos**

#### **4.3.1 Medición de viscosidad, pH y contenido de sólidos de las muestras de silicatos**

La medición de la viscosidad y el pH de los silicatos son de suma importancia ya que están en función de la relación del  $\text{Na}_2\text{O}$  y el  $\text{SiO}_2$  y la concentración de estos. A mayor contenido total de sólidos, la viscosidad aumenta, y más si hay una mucha mayor relación de  $\text{SiO}_2$  que de  $\text{NaO}_2$

Las pruebas de medición de pH y viscosidad, así como el contenido de sólidos se realizaron en laboratorio a una temperatura de  $23^\circ\text{C}$ . Las tablas 4.2 y 4.3 enlistan las propiedades fisicoquímicas y porcentaje de sólidos de los diferentes tipos de silicatos que se utilizarán, así como sus características físicas.

Tabla 4.2. Características fisicoquímicas de los silicatos de sodio

Tipo de silicato	Viscosidad (mPa.s)	pH	Características físicas
A	450	12.8	Líquido alcalino verdoso
B	800	12.4	Líquido pesado
C	300	11.8	Líquido fluidizado ámbar

Tabla 4.3. Porcentaje de sólidos de las distintas soluciones de silicato de sodio

Silicato	% sólidos
A	45
B	48
C	38

Como se mencionó anteriormente, el silicato tipo A tiene una menor relación de  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ , mientras que el silicato tipo C presenta la mayor relación. Al tener un menor contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  el silicato tipo C, éste presenta un menor pH, contrario al tipo A que tiene el pH mayor de los tres. El pH altamente alcalino del silicato de sodio afectará directamente a la mezcla de arena, ya que si se requiere reutilizar esa arena en un proceso de caja fría, éste modificará la reacción entre el isocianato y la resina de fenol-formaldehído, por lo que la resistencia mecánica de los corazones y la vida de banco bajarán. Se requiere un pH entre 7 y 8 para tener corazones en el proceso de caja fría.

La figura 4.3 muestra el pH de los distintos tipos de silicatos, donde se puede observar la alta alcalinidad de éstos.

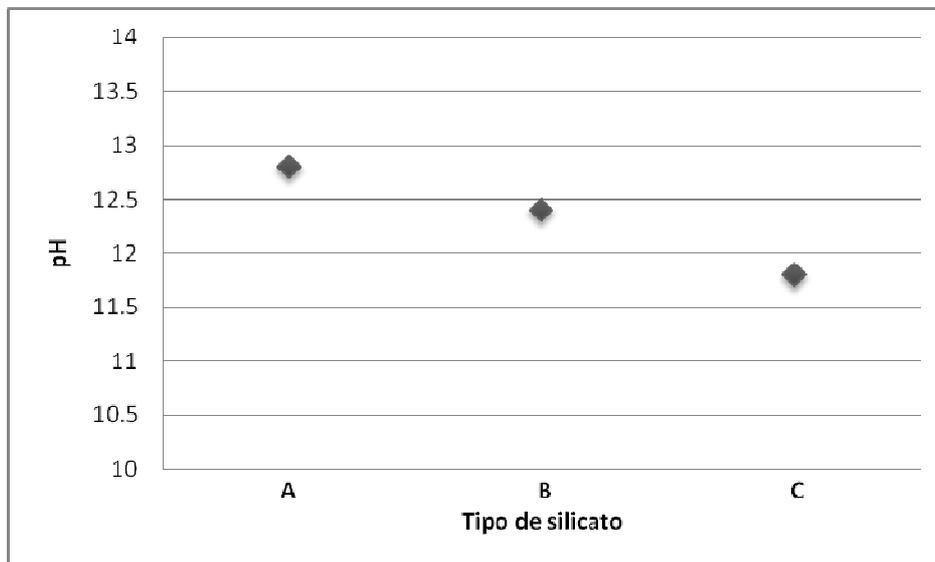


Figura 4.3. pH de los diferentes tipos de silicatos

El silicato B, al presentar mayor contenido de sólidos (figura 4.4), y al tener mayor contenido de  $\text{SiO}_2$  que el silicato C, hace que su viscosidad llegue hasta los 800 mPa.s. El silicato C, al presentar sólo un 38% de sólidos, hace que su viscosidad sea relativamente baja, aunque esto es bueno sabiendo que se necesita tener una mezcla de arena-resina lo bastante fluida. Una viscosidad muy alta de la resina provocará mayor dificultad en el mezclado, y por lo tanto, mayor presión de soplado de los corazones, además de que se requerirá más energía para distribuir la resina en todos los granos de arena.

La figura 4.5 muestra los distintos grados de viscosidad de los tipos de silicatos, observándose una diferencia marcada entre el silicato B contra los silicatos A y C.

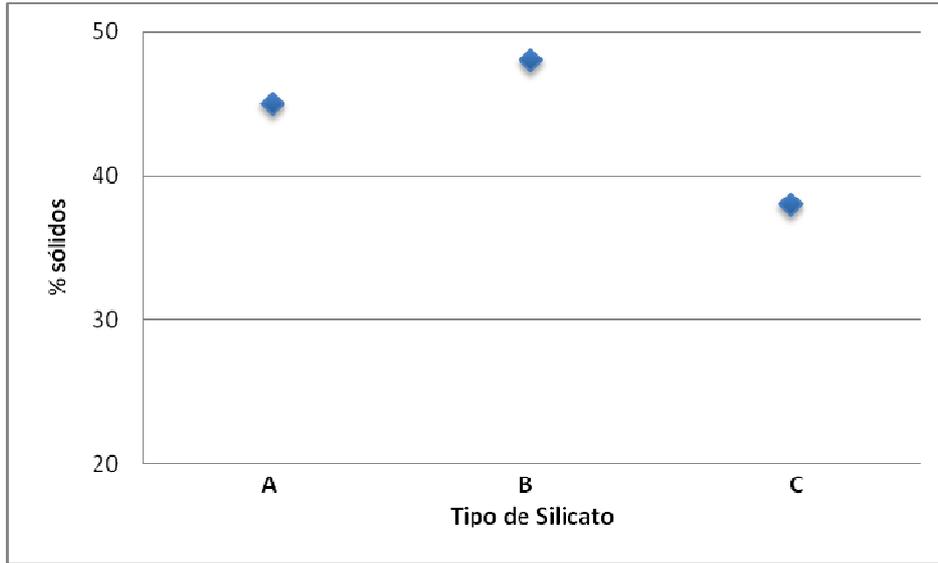


Figura 4.4. Porcentaje de sólidos

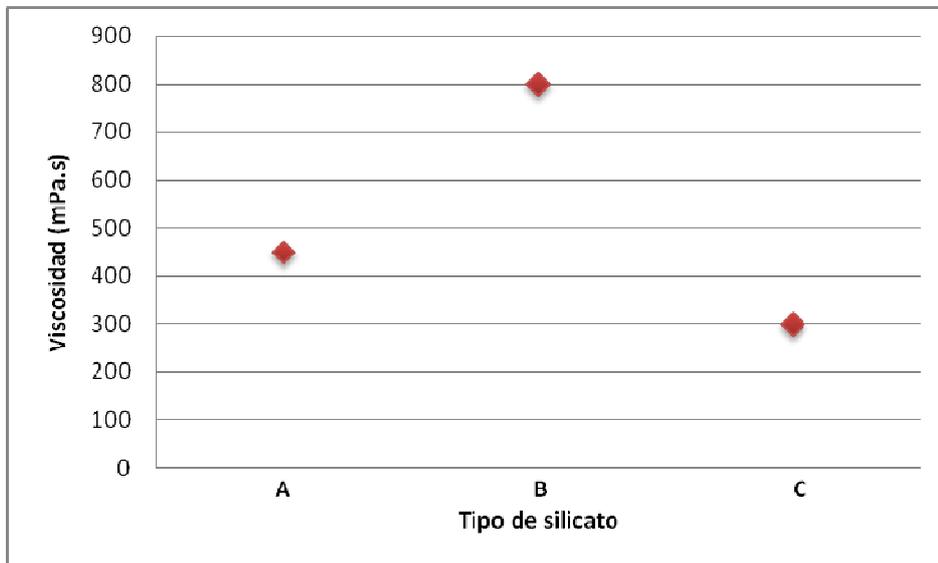


Figura 4.5. Viscosidades de los tipos de silicatos

### 4.3.2 Análisis termogravimétrico del aditivo EVB.

En la figura 4.6 se puede observar el comportamiento térmico del aditivo EVB, donde se puede observar que hay alrededor de un 25% de sólidos en el EVB.

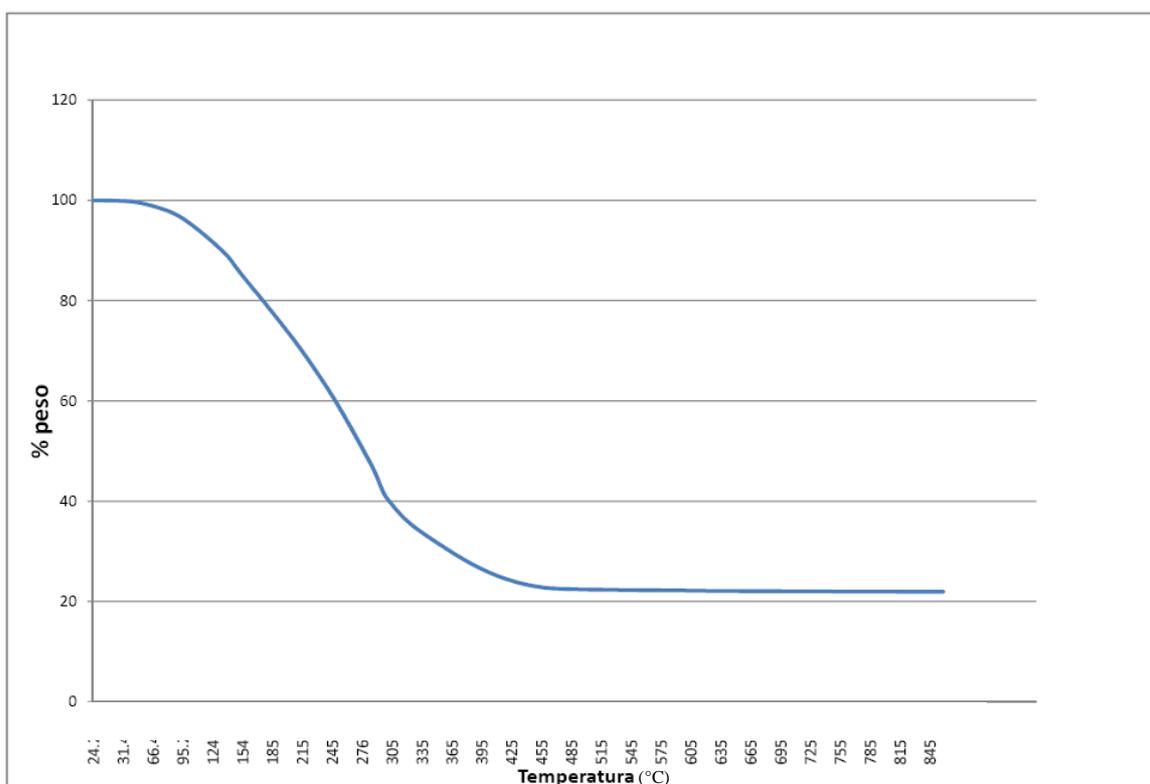


Figura 4.6. Descomposición térmica del aditivo EVB

#### 4.4 Propiedades mecánicas

A continuación se presentan los resultados de las propiedades mecánicas para cada tipo de silicato de sodio a diferentes temperaturas de curado y concentraciones de silicato en la arena, usando un proceso de caja caliente. Todas las pruebas se realizaron a un tiempo de curado de 3 minutos.

Tabla 4.4. Factores y variables a medir del diseño de experimentos

Tipo de silicato	Temperatura (°C)	Concentración de silicato en la arena (%)	Variables a medir
A	120	1.5	Resistencia inmediata
B	150	2.0	Resistencia a la hora
C	180	2.5	Resistencia a las 2 horas

##### A) 1.5 % de silicato de sodio en la arena

La Tabla 4.4 muestra los diferentes factores que se tomarán en cuenta para realizar los experimentos. Como ya se mencionó anteriormente, se estudiarán tres tipos de silicatos (A, B y C) a tres diferentes temperaturas de curado (120, 150 y 180°C) y con tres concentraciones diferentes de silicato en la arena (1.5, 2.0 y 2.5%), midiendo la resistencia inmediata, a la hora y a las 2 horas después de haber sido fabricada la probeta. Los resultados fueron graficados usando el software estadístico Minitab® para obtener un análisis estadístico descriptivo en cada tipo de prueba. Este análisis estadístico viene anexado al final de este trabajo.

Primeramente se experimentó con el nivel más bajo de silicato de sodio, que es un 1.5% en arena, usando los tres tipos de silicatos y a las tres temperaturas de curado, midiendo resistencias inmediata, a la hora y a las 2 horas.

- Resistencia inmediata

La figura 4.7 muestra las propiedades mecánicas inmediatamente después de haber sido retiradas las probetas de la sopladora de caja caliente. Los resultados muestran mayores resistencias a 120°C para los tres tipos de silicatos, ya que son mayores a 0.65 MPa. Para 150°C son buenos para los silicatos A y B, y para 180°C las propiedades mecánicas caen mucho, inclusive por debajo de los 0.4 MPa.

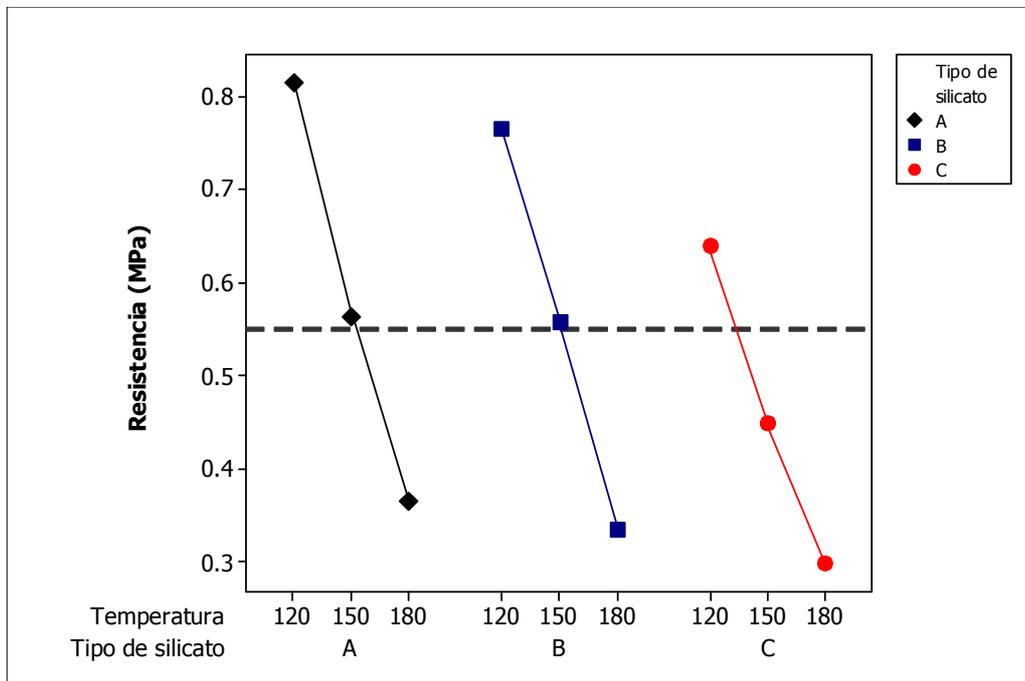


Figura 4.7. Resistencia mecánica inmediata para un 1.5% de silicato

La línea oscura punteada indica el valor de las propiedades mecánicas recomendado que deben tener los corazones, el cual asegurará que éstos resistan su manejo. Este valor es de alrededor de 0.55 MPa para el proceso de fenólico-uretánico de caja fría. Se puede observar que para los silicatos A y B a 120 y 150°C se tienen suficientes resistencias para poder ser manejados.

- Desarrollo de resistencia a 1 hora

En la figura 4.8 se muestran las propiedades mecánicas una hora después de haber sido retiradas de la sopladora de caja caliente. El desarrollo de resistencia de los corazones es un parámetro muy importante ya que implica el hecho de cuánto resistirá un corazón conforme pasen las horas. Éste tiende a subir conforme pasan los minutos ya que aun se siguen desarrollando y endureciendo los puentes del aglutinante entre grano y grano de arena. Sin embargo, esta resistencia depende de las condiciones atmosféricas, como la humedad y temperatura, aunque para estas precisas pruebas se realizaron a condiciones de laboratorio (30% de humedad relativa y 23°C).

Los resultados muestran que las propiedades aumentan hasta un 100% a una hora de haber salido de la caja. Los tres tipos de silicatos a las tres diferentes temperaturas muestran resistencia lo bastante buenas, usando solo un 1.5% de silicato.

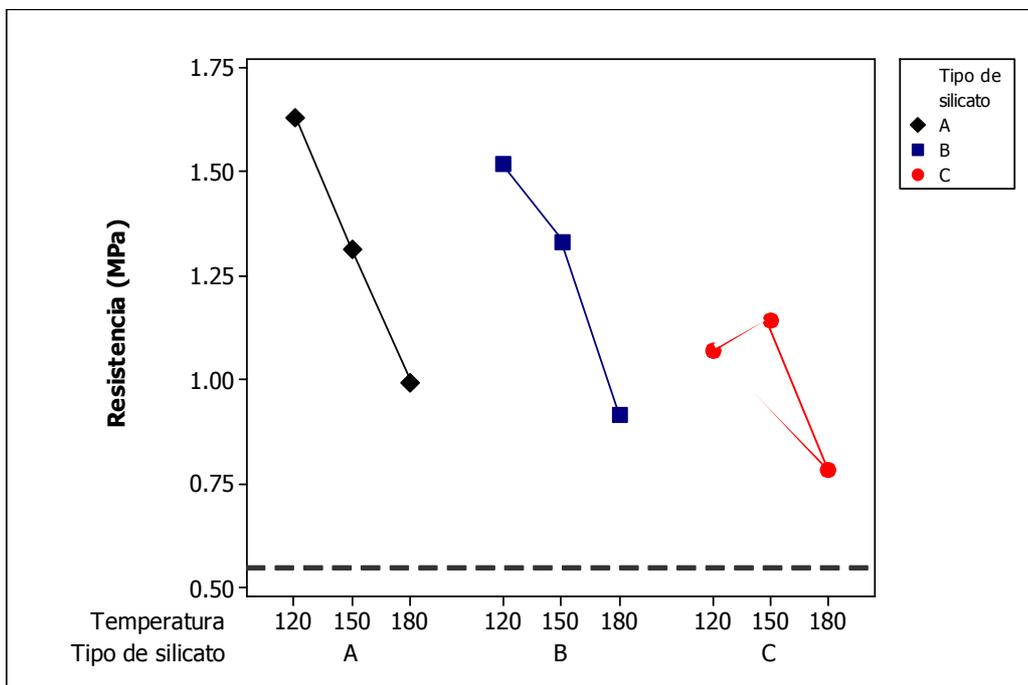


Figura 4.8. Desarrollo de resistencia a 1 hora para un 1.5% de silicato.

- Desarrollo de resistencia a 2 horas

A 2 horas de haber salido las probetas de la caja caliente, se obtienen resultados muy similares que después de 1 hora de haber salido, como lo muestra la figura 4.9. Los silicatos A y B son los que muestran mejores resistencias mecánicas con 1.5% de silicato, sobre todo a una temperatura de curado de 120 a 150°C.

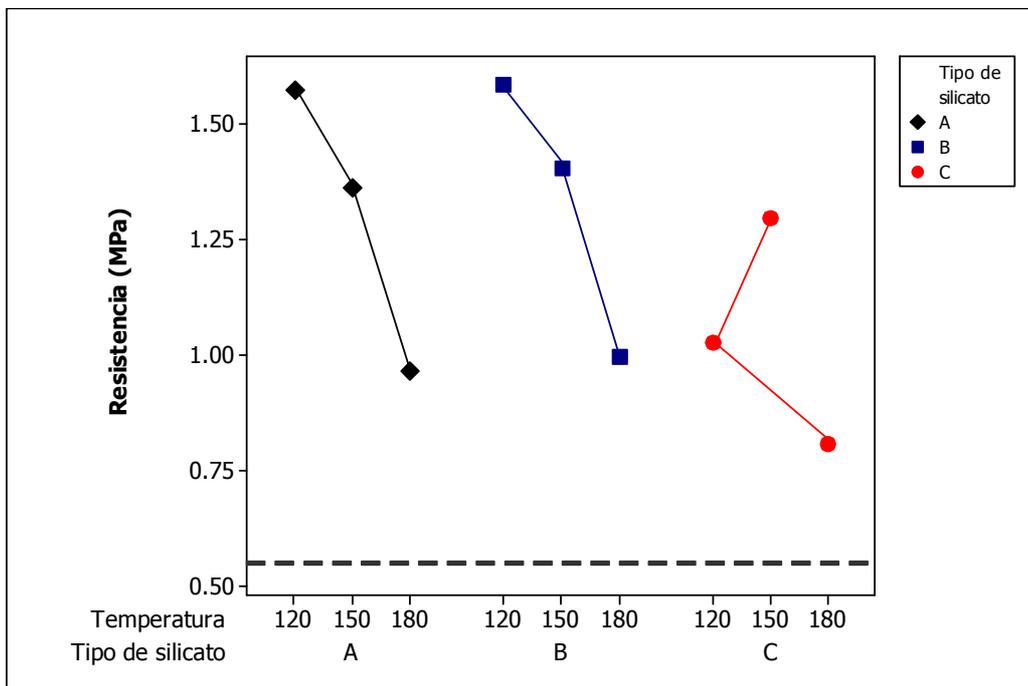


Figura 4.9. Desarrollo de resistencia a 2 horas para un 1.5% de silicato.

En la figura 4.10 se muestra el promedio de las resistencias mecánicas inmediatas y en desarrollo a 1 y 2 horas de los diferentes tipos de silicatos de sodio, esto para darse una mejor idea de la diferencia que existe entre cada uno de ellos.

Se puede observar en la figura 4.10, promediando las temperaturas, que para las resistencias inmediatas, es más conveniente manejar el silicato A o B, debido a que el C presenta una resistencia inmediata menor a lo recomendado. Los otros dos tipos de silicato se encuentran con una resistencia inmediata óptima para ser manejados. En cuanto a desarrollo de resistencia, los valores de A y B son muy parecidos, mientras que para C, los valores están por debajo de los otros dos, aunque tiene suficiente resistencia. Es importante considerar que éstas son pruebas para solo un porcentaje de silicato de sodio del 1.5%, por lo que para las siguientes condiciones se tendrá un mayor contenido de silicato que podrá hacer mejorar las resistencias para los tres.

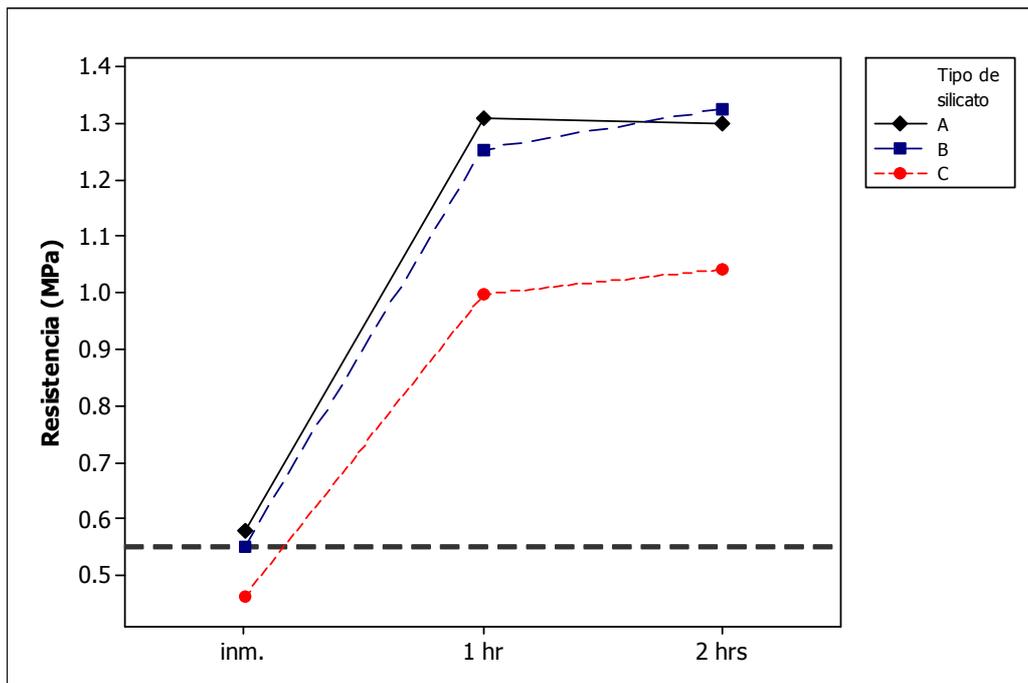


Figura 4.10. Resistencias con diferentes silicatos para un 1.5%.

En la figura 4.11 se muestra el promedio de las resistencias mecánicas de los silicatos a diferentes temperaturas. A 120°C de curado, se obtienen corazones más resistentes, tanto en resistencia inmediata como en desarrollo. Para 150°C se obtiene la resistencia mecánica inmediata por debajo de lo recomendado, sin embargo, no existe mucha diferencia entre ambas. A 180°C de curado, la resistencia inmediata está muy por debajo de lo recomendado para que el corazón sea manejable, mientras que para en desarrollo, sus resistencias son algo bajas aún. Esto es debido a una deshidratación excesiva del silicato, lo que ocasiona que los puentes de enlace entre grano y grano no se estén formando completamente. El acabado superficial de los corazones curados a 180°C no es bueno, ya que presentan aspecto arenoso, por lo que se podría disminuir el tiempo de curado. Para las otras temperaturas, el acabado superficial es aceptable.

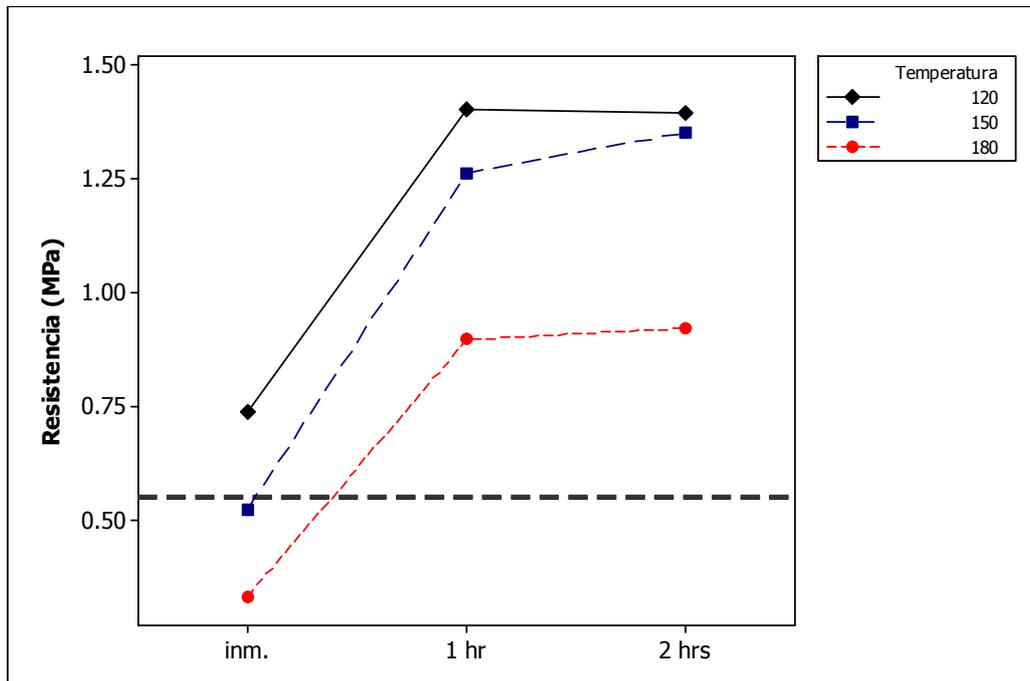


Figura 4.11. Resistencias de los silicatos a diferentes temperaturas de curado para un 1.5%.

## B) 2.0% de silicato de sodio en la arena

- Resistencia inmediata

En la figura 4.12 se muestran los resultados de la resistencia inmediata usando ahora una concentración de 2% de silicato. Se puede observar que las resistencias son mayores a 0.8 MPa para una temperatura de curado de 120°C, contrario a las pruebas que tienen 1.5% de silicato. Las resistencias a 150°C rebasan el límite de lo recomendado, contrario a las de 180°C. El silicato C muestra las mejores propiedades mecánicas al inicio para una temperatura de 120°C.

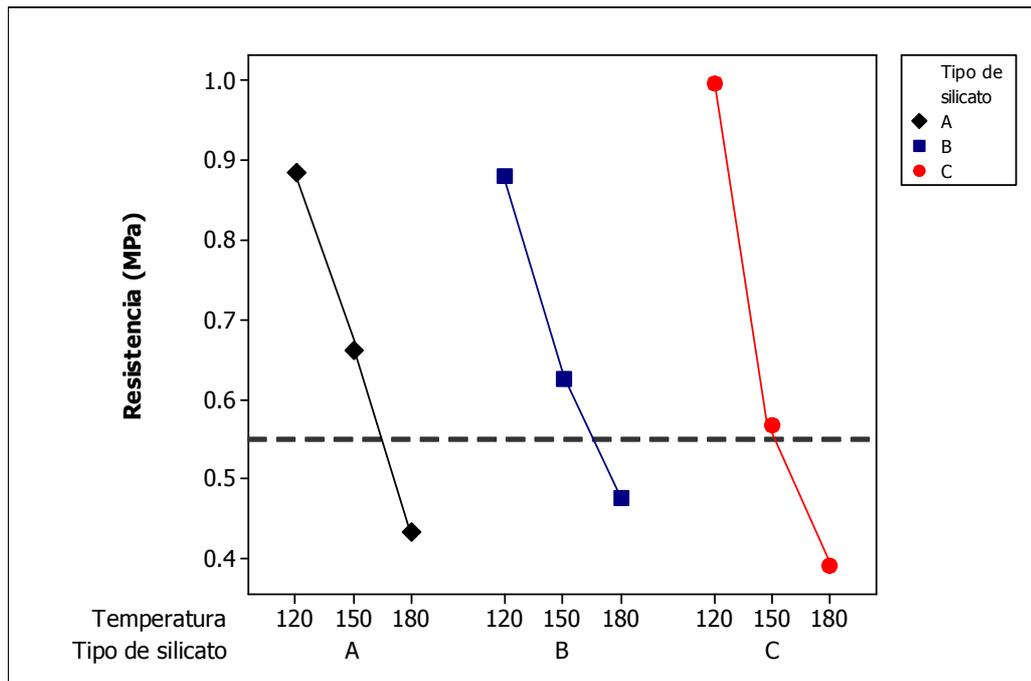


Figura 4.12. Resistencia mecánica inmediata para un 2.0% de silicato.

- Desarrollo de resistencia a 1 y 2 horas

La figura 4.13 muestra un aumento considerable de resistencia a una hora para las probetas que se curaron a 120°C usando los silicatos A y B. A 150°C también se obtienen buenos resultados. La figura 4.14 muestra resultados muy parecidos a la 4.13.

Estos resultados muestran que hubo más de 0.5 MPa de incremento añadiéndole de 1.5 a 2% de silicato de sodio, lo cual es muy importante para el aumento del desarrollo de resistencia y así tener corazones más fácilmente manejables.

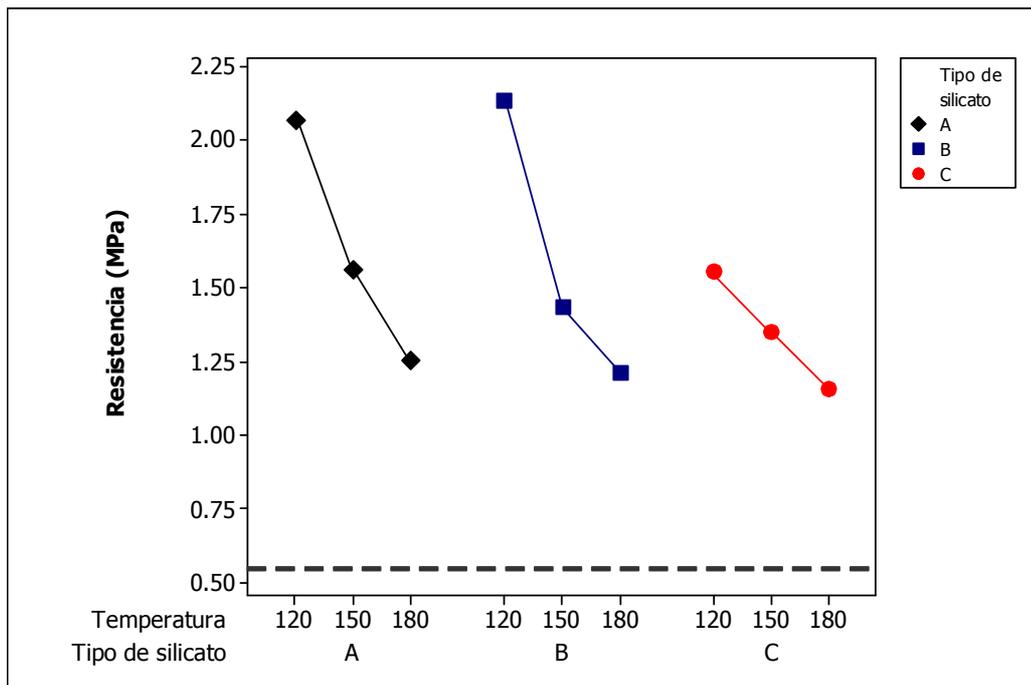


Figura 4.13. Desarrollo de resistencia a 1 hora para un 2.0% de silicato.

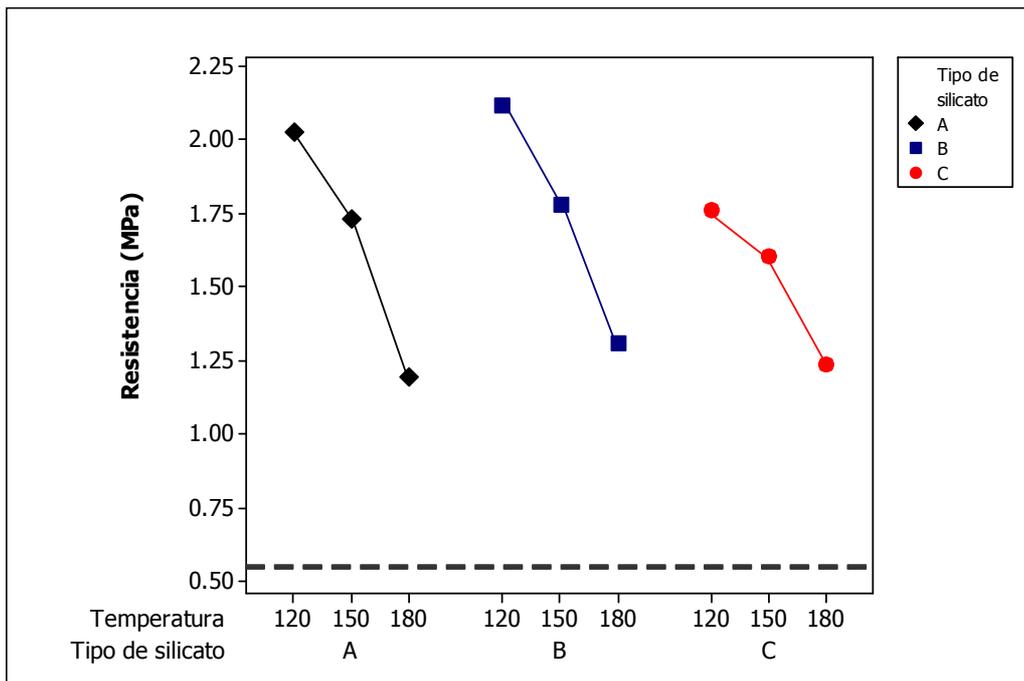


Figura 4.14. Desarrollo de resistencia a 2 horas para un 2.0% de silicato.

En la figura 4.15 se muestra el promedio de las resistencias mecánicas inmediatas y en desarrollo a 1 y 2 horas de los diferentes tipos de silicatos de sodio con una concentración del 2%.

Contrario al uso de sólo el 1.5% de silicato, para 2%, las resistencias inmediatas para los tres tipos de silicato presentan una mayor resistencia a los 0.55 MPa requeridos para que puedan ser manejables. Para el desarrollo de resistencia, se obtienen resistencias mayores a los 1.6 MPa para los silicatos A y B, cuando con 1.5% de silicato sólo se obtenían 1.3 MPa. El silicato C sigue teniendo la resistencia suficiente como para ser manejados, aunque sus resistencias no son tan altas como para los otros dos tipos de silicatos.

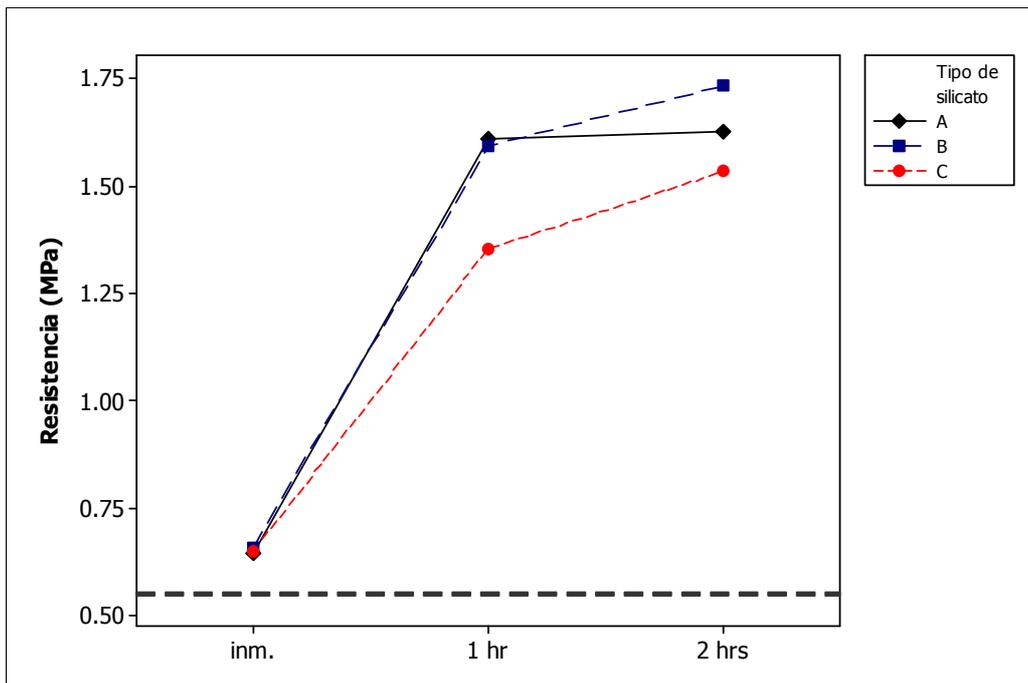


Figura 4.15. Resistencias con diferentes silicatos para un 2.0%.

En la figura 4.16 se muestra el promedio de las resistencias mecánicas de los silicatos a diferentes temperaturas para 2.0% de silicato.

Se puede observar una marcada diferencia aplicando una temperatura a 120°C, que a 150 y 180°C. Resistencias cercanas a 1 o 2 MPa han sido obtenidas para 120°C, mientras que para las otras temperaturas se han obtenido buenas resistencias en desarrollo. A 180°C, se obtienen resistencias inmediatas muy bajas, además de que las probetas siguen presentando un aspecto arenoso a diferencia del acabado superficial que se obtienen con las otras temperaturas.

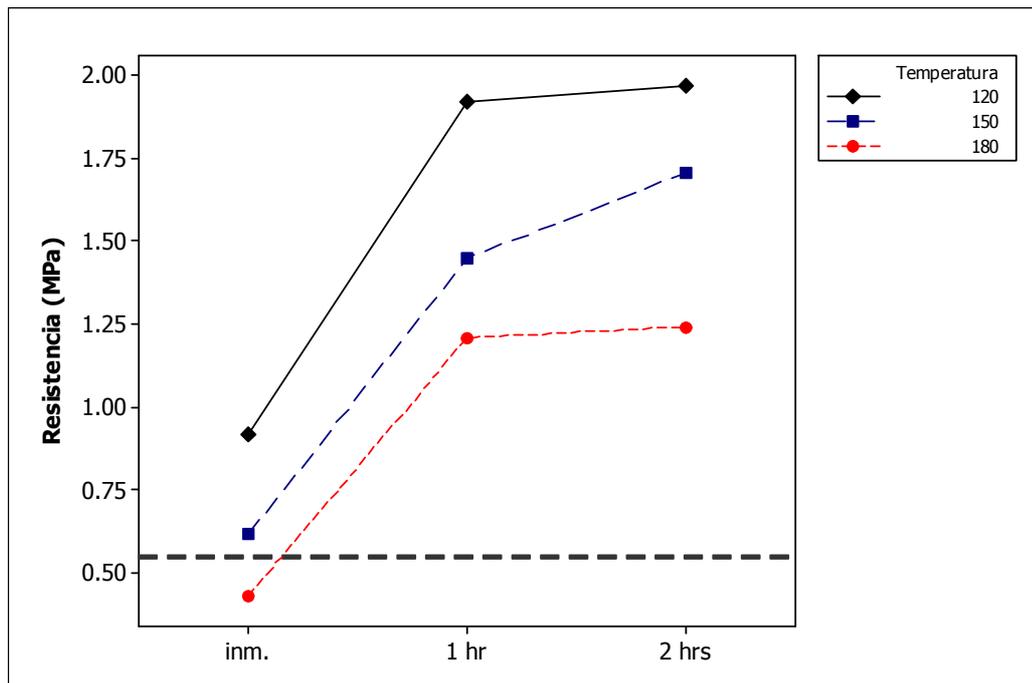


Figura 4.16. Resistencias de los silicatos a diferentes temperaturas de curado para un 2.0%.

## B) 2.5% de silicato de sodio en la arena

- Resistencia inmediata

La figura 4.17 muestra la resistencia inmediata a una concentración de 2.5% de silicato de sodio. Las resistencias para 120° se aproximan a 1.00 MPa para los tres tipos de silicatos, demostrándose que a esa temperatura se siguen obteniendo las mejores resistencias. Para 180°C, las resistencias inmediatas siguen sin rebasar los 0.55 MPa, por lo que aun no tienen la resistencia necesaria para ser manejados a esa temperatura.

En general, se puede decir que las resistencias inmediatas rondan entre 0.8 y 1.0 MPa para los tres tipos de silicatos a 120°C para concentraciones de 1.5, 2.0 y 2.5% de silicato.

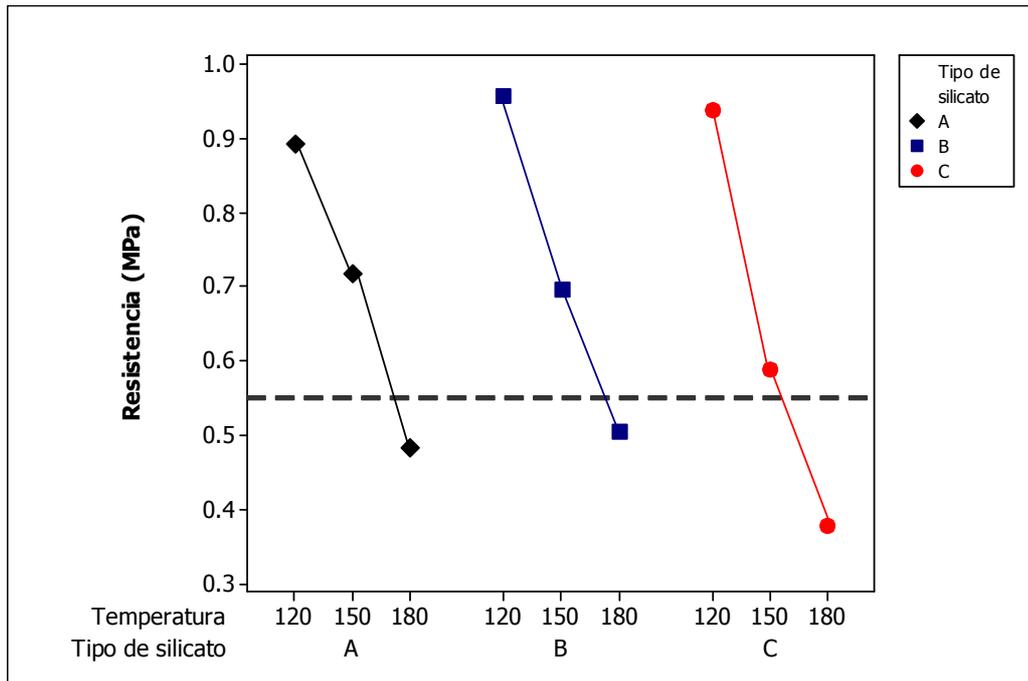


Figura 4.17. Resistencia mecánica inmediata para un 2.5% de silicato

- Desarrollo de resistencia a 1 y 2 horas

Los resultados que se muestran en la figura 4.18 y 4.19 indican que con los silicatos A y B a 120°C como temperatura de curado e inclusive a 150°C, y con un porcentaje de 2.5% de silicato de sodio, se tienen las máximas resistencias, que son cercanas a los 2.5 MPa, teniendo con ello una resistencia lo suficientemente alta como para que los corazones puedan ser fácilmente manejados. Por otra parte, se siguen dando resultados más bajos para una temperatura de 180°C y también con el uso del silicato C.

Se puede concluir en esta etapa que con el uso de una concentración de 2.5% de silicato de sodio, las resistencias aumentan considerablemente, sin que se afecten las probetas, al menos para los silicatos A y B.

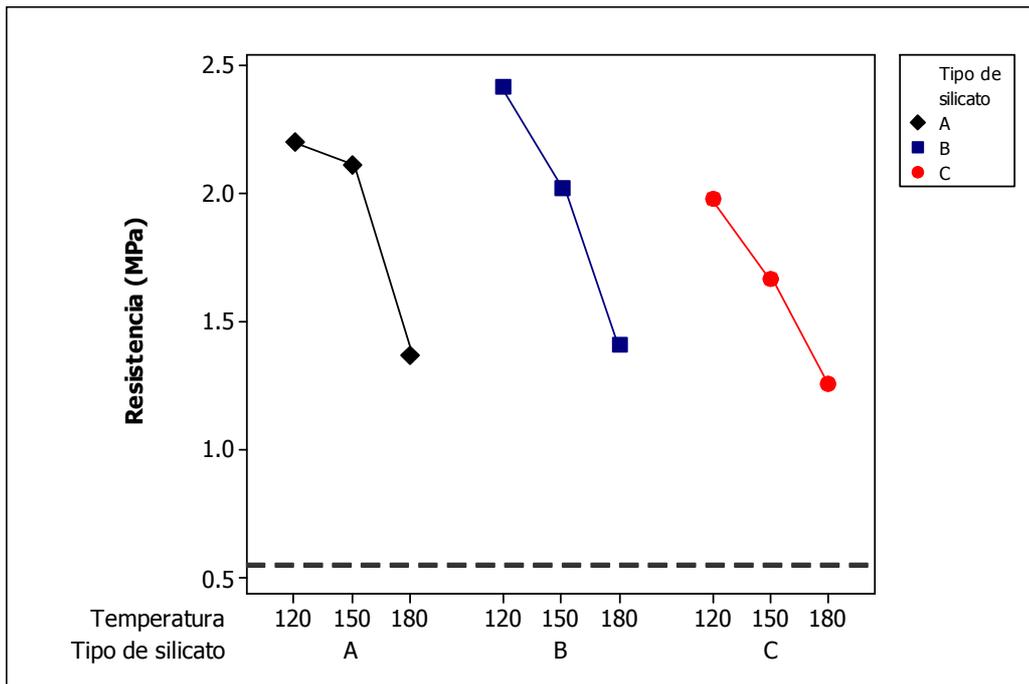


Figura 4.18. Desarrollo de resistencia a 1 hora para un 2.5% de silicato.

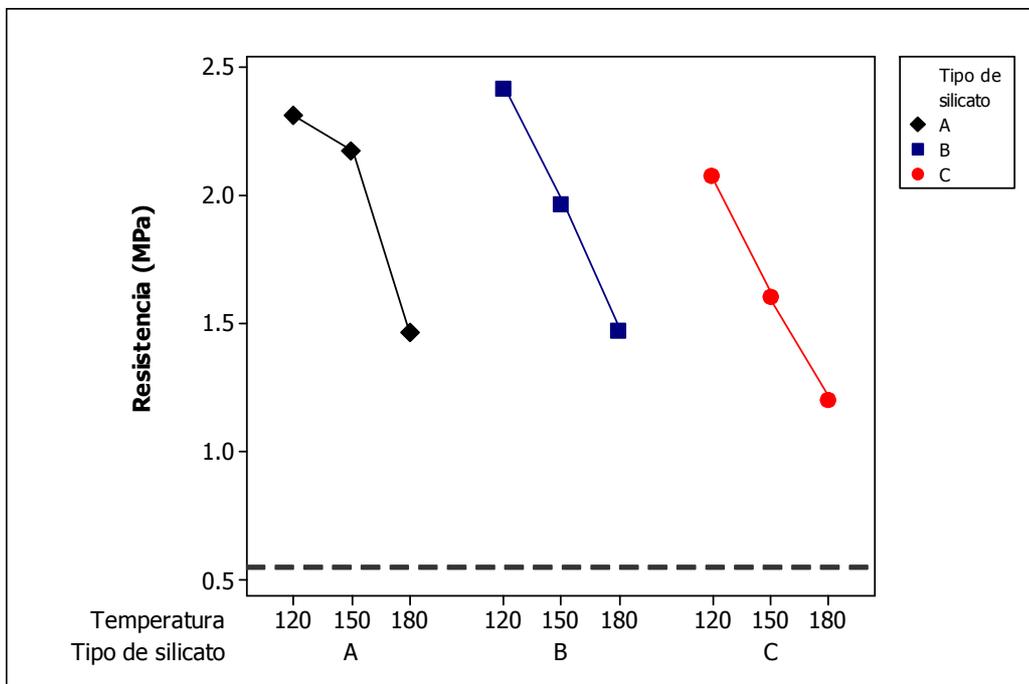


Figura 4.19. Desarrollo de resistencia a 2 horas para un 2.5% de silicato.

En la figura 4.20 se muestra el promedio de las resistencias mecánicas inmediatas y en desarrollo a 1 y 2 horas de los diferentes tipos de silicatos de sodio con una concentración del 2.5%.

Las resistencias inmediatas para los tres tipos de silicatos son casi las mismas, observándose que están por encima del límite en que pueden ser manejados los corazones sin ningún problema. En cuanto al desarrollo de resistencia, se observan para los silicatos A y B resistencias cercanas a los 2.0 MPa, mientras que para el silicato C están alrededor de los 1.60 MPa.

Se puede concluir que para los silicatos A y B se obtienen las mejores resistencias, ya sea con 1.5, 2.0 y sobre todo 2.5% de silicato. El silicato tipo C todavía presenta resistencias bajas comparadas con las de los silicatos A y B, sobre todo para las resistencias inmediatas.

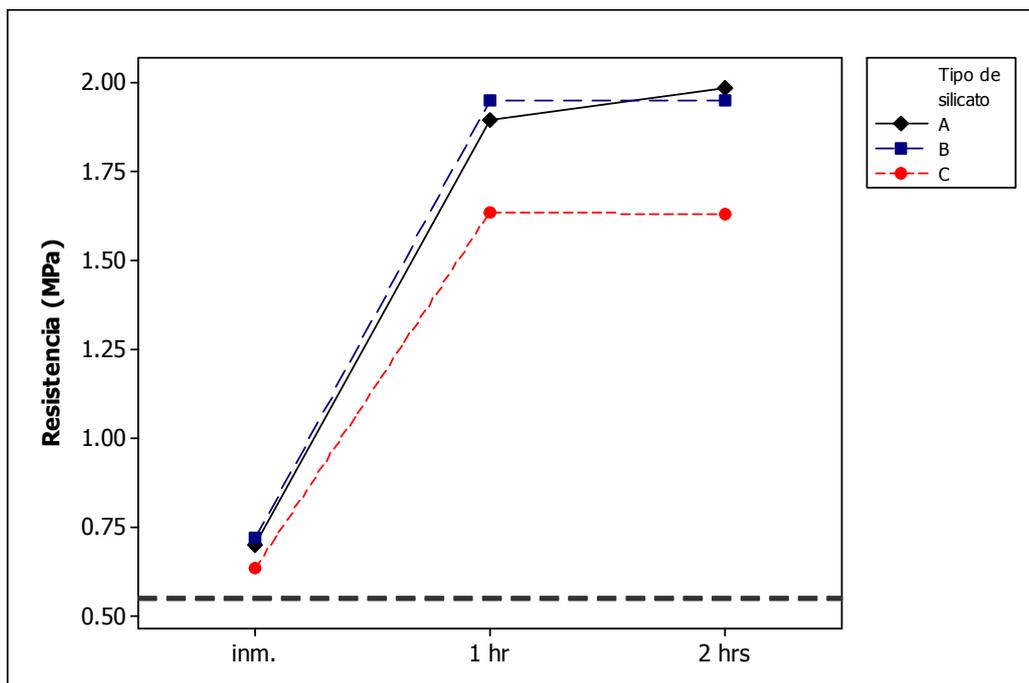


Figura 4.20. Resistencias con diferentes silicatos para un 2.5%

En la figura 4.21 se muestra el promedio de las resistencias mecánicas de los silicatos a diferentes temperaturas para 2.5% de silicato.

Para 120°C y 2.5% de silicato se tienen las mejores resistencias, tanto para resistencias inmediatas como en desarrollo. Si se sube la temperatura 30°C más, se obtienen probetas con lo bastante resistentes con resistencias inmediatas por encima de lo óptimo. Para una temperatura de 180°C se puede notar el pobre desempeño que se logra obtener de las probetas en cuanto a resistencia mecánica, ni siquiera se obtienen buenos datos para la resistencia inmediata, además se siguen teniendo probetas con aspecto arenoso.

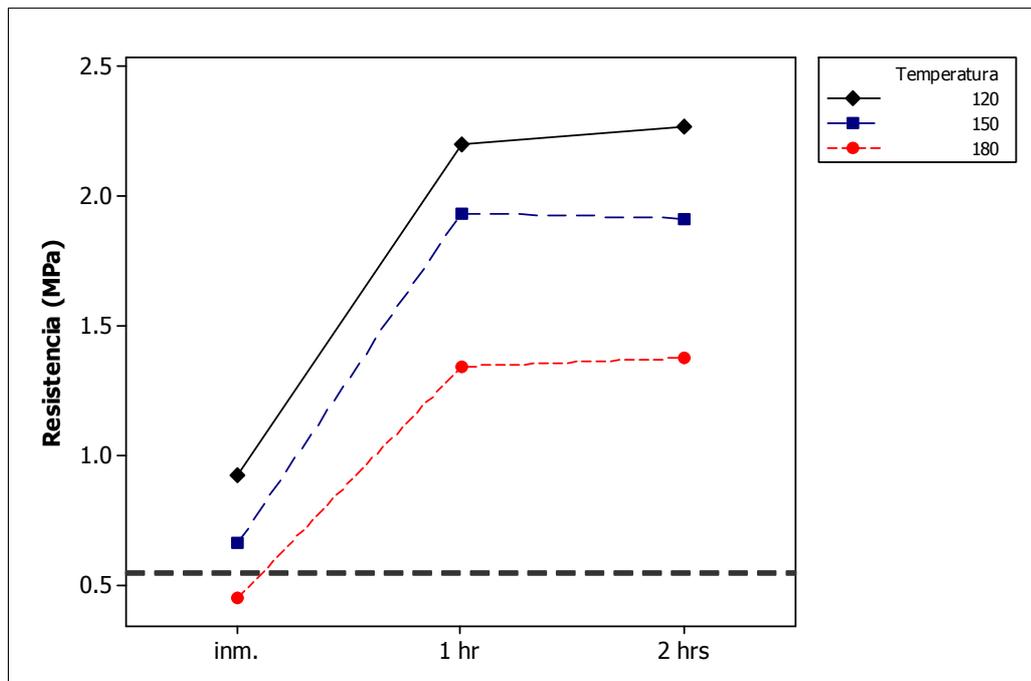


Figura 4.21. Resistencias de los silicatos a diferentes temperaturas de curado para un 2.5%.

Se ha visto que para una concentración de 2.5% de silicato en la arena se obtienen las mejores resistencias que con 1.5 y 2.0%. Una mayor cantidad de silicato de sodio como un 3.0% o más podría saturar los granos de arena de éste, y aunque se pudieran tener mayores resultados, el hecho de haber mas silicato en los corazones implica más problemas para desarenar las piezas, ya que los corazones tendrían más dureza debido a una mayor cantidad de aglutinante. Otro problema que habría adicionando mayor aglutinante es la dificultad de habría al recuperar la arena con silicato, capas más gruesas de aglutinante en los granos de arena significa mayor dificultad para removerlo y eliminarlo. Con un 1.5%, los corazones no tendrían suficiente resistencia inmediata, por lo que ocasionaría problemas en su manejo, aunque presenten mejor desarrollo de resistencia. El mismo caso es con el 2.0% de silicato, por lo que se opta por seguir utilizando una concentración de 2.5%.

En cuanto al uso del silicato de sodio, se ha observado que tanto el silicato A como el B muestran resistencias mecánicas iniciales y en desarrollo muy parecidas, además que son lo suficientemente altas, contrario al silicato tipo C, el cual presenta resistencias inmediatas parecidas a los otros silicatos, pero en el desarrollo de resistencia existe una gran diferencia con respecto a los otros, son mucho más bajas. Esto es debido a que para el silicato C existe una mayor relación en peso del  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ , por lo que su contenido alcalino disminuye y su capacidad aglutinante disminuye, además de que es el silicato con menor contenido de sólidos y mayor cantidad de agua.

Para una temperatura de curado de 120°C se obtienen las máximas resistencias y, conforme empieza a subir la temperatura, éstas van bajando, como se ven con los resultados a 150 y 180°C. La deshidratación física ocurre después de los 100°C, pero conforme va aumentando la temperatura, el agua unida químicamente podría escapar del silicato de sodio, lo que ocasiona que se formen poros en los puentes que unen el silicato con los granos de arena, lo que ocasiona que la resistencia vaya en descenso.

La Tabla 4.5 muestra algunas características físicas de las probetas fabricadas y de la mezcla de arena con los diferentes silicatos y sus concentraciones, al igual que a diferentes temperaturas.

Tabla 4.5. Características de las probetas y de la mezcla de arena

	Tipo de silicato			% de silicato			Temperatura de curado		
	A	B	C	1.5	2.0	2.5	120°C	150°C	180°C
<b>Fluidez de la arena</b>	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Muy buena	---	---	---
<b>Aspecto físico de las probetas</b>	Muy bueno	Bueno	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno	Regular
<b>Vida de banco de la mezcla</b>	Regular	Mala	Muy mala	Regular	Regular	Regular	---	---	---
<b>Resistencia mecánica</b>	Muy buena	Muy buena	Regular	Regular	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Buena	Regular

La fluidez de la mezcla de arena-silicato se determina cualitativamente en base a como ésta fluye con facilidad de un lugar a otro, tomando como base la arena sílica pura. Hasta el momento no existe un método determinado por la Sociedad Americana de Fundición (AFS por sus siglas en inglés) para medir cuantitativamente la fluidez de ésta, por lo que se opta por determinarla solo cualitativamente. Arena con aglutinantes que tengan alta viscosidad provocará una mezcla pesada o con baja fluidez. Este parámetro es muy importante debido a que si se tienen mezclas muy pesadas, el proceso de soplado se dificultará, ya que provocará que no haya un buen llenado en los moldes y que se formen corazones incompletos o esponjosos. Debido a que los tres tipos de silicatos utilizados no presentan altas viscosidades, a diferencia de algunos aglutinantes orgánicos base petróleo o base polisacáridos, no se presentan problemas de fluidez.

El aspecto físico de las probetas se refiere a que tan bien se curaron los corazones, por lo que los corazones o las probetas con aspecto arenoso o rugoso presentan un aspecto físico bajo. La figura 4.22 presenta las diferencias entre una probeta con un aspecto arenoso y otra con un aspecto liso. Como se mencionó anteriormente, el silicato tipo C presenta una mayor cantidad de agua y un menor porcentaje de sólidos, por lo que habrá menos uniones en los granos lo cual hará que muchos granos de arena estén sueltos, provocando un aspecto arenoso del corazón. Para una temperatura de curado a 180°C puede ocurrir una sobredeshidratación, creándose poros entre los puentes e inclusive granos de arena sin unirse, provocando también un mal aspecto del corazón. Una forma de evitar esto es disminuir el tiempo de curado para esa temperatura.



Figura 4.22. Aspecto de una probeta arenosa y lisa.

Como ya se mencionó, para los silicatos A y B, con una concentración de 2.0 a 2.5% y de 120 a 150°C se obtienen resultados de propiedades mecánicas de muy buenas a buenas; mientras que para el silicato C, para una temperatura de curado de 180°C y para una concentración de 1.5% de cualquiera de los silicatos en la arena se tienen resistencias mecánicas de regulares a malas.

La vida de banco representa un parámetro que hay que tomar en cuenta en el proceso de producción de corazones y moldes de arena, ya que implica el tiempo en el que una mezcla de arena-resina puede ser usada, manteniendo sus propiedades. Debido a que el silicato de sodio en la mezcla de arena tiende a secarse rápidamente, éste no presenta una buena vida de banco, y mucho menos los silicatos que presenten una menor cantidad de agua en su composición química, como es en el caso para el silicato tipo C.

A continuación se mostrarán los resultados experimentales de las pruebas de vida de banco para los tres tipos de silicatos, usando una concentración de 2.5% en la arena y a una temperatura de curado de 120°C.

#### **4.5 Vida de banco**

Según las especificaciones del proceso de caja fría, se debe tener una resistencia mínima de 0.55 MPa para que los corazones puedan ser manejables. Conforme se deja una mezcla de arena-resina a la intemperie, ésta tiende a reaccionar o a secarse con el paso del tiempo, por lo que es importante que mantenga sus propiedades conforme pasan los minutos e inclusive las horas. La vida de banco es un indicativo de la vida útil de la mezcla de arena y resina.

En este ensayo se utiliza la mezcla desde el momento en el que se fabricó, hasta que ha transcurrido media, una o hasta dos horas a temperatura y humedad ambiental, indicándonos que tanta resistencia mecánica ha perdido desde que se elaboró la mezcla. En un proceso normal de caja fría, se esperan tener resistencias aceptables para una hora después de haber sido preparada, ya que después de ese tiempo, la mezcla de arena y aglutinantes orgánicos reaccionan lo suficiente como para que se endurezca la mezcla y ya no se puedan fabricar corazones.

Para el desarrollo de las pruebas, se prepararon las mezclas de arena con los tres tipos de silicatos a una concentración de 2.5% y 120°C de curado y se dejaron reposar hasta una hora en condiciones ambientales. Se hicieron probetas inmediatamente, media hora y una hora después de haber preparado la mezcla, evaluando sus resistencias inmediatas y a 1 hora.

Partiendo de los resultados anteriores, se decide usar un aditivo que ayude a extender la vida de banco de la mezcla de arena y silicato de sodio. Este extendedor de vida de banco (EVB) consiste en un compuesto alcalino higroscópico, el cual se encuentra en solución acuosa. Esta solución se adiciona al silicato de sodio en una concentración menor al 5% en peso. Se realizan las mismas pruebas de vida de banco con los tres tipos de silicatos y se miden las resistencias mecánicas inmediatas y a una hora. Se toman los resultados de la mezcla a la media hora y una hora después de haber sido preparada.

### Vida de banco sin el uso del EVB

La figura 4.23 muestra los resultados de la resistencia inmediata de la mezcla al momento en que se preparó, media hora y una hora después de haber sido fabricada sin usar el aditivo extendedor de vida de banco. Se puede observar que para los tres silicatos se tiene resistencia inmediata bastante baja después de media hora de que se preparó, inclusive están por debajo de lo recomendado.

La figura 4.24 presenta los resultados del desarrollo de resistencia a una hora. Aunque las resistencias están por encima de lo especificado, las resistencias caen mucho a la media y una hora en que se preparó la mezcla. Para los silicatos B y C se observa que las resistencias caen más que para el silicato A, esto es debido a que este silicato es el que posee la mayor cantidad de agua, por lo que tiende a secarse en menos tiempo

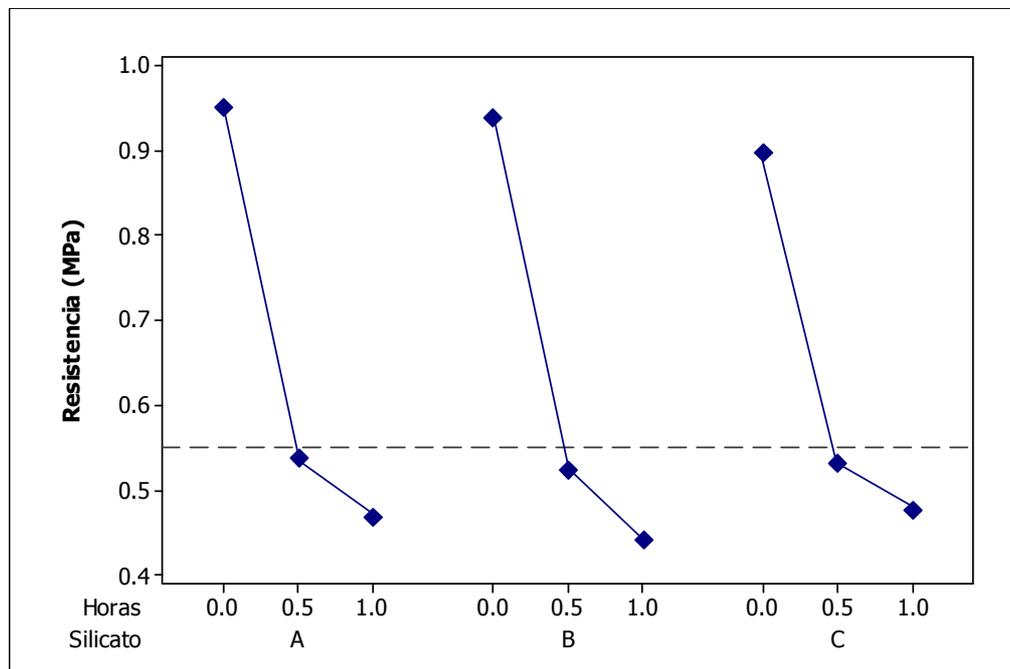


Figura 4.23. Vida de banco de la mezcla sin el EVB. Resistencias inmediatas.

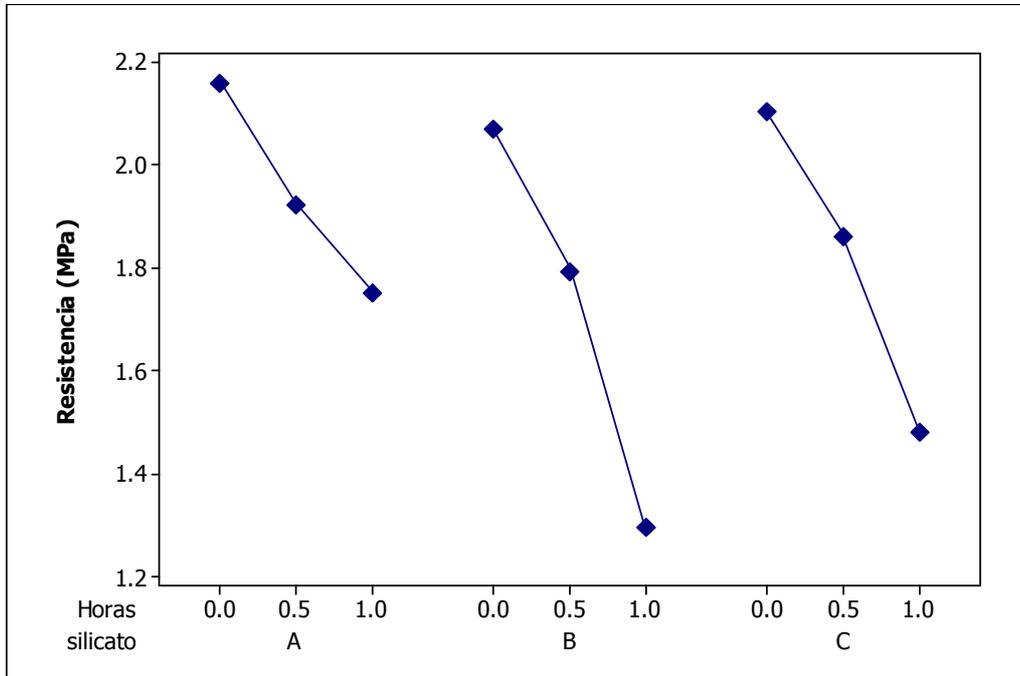


Figura 4.24. Vida de banco de la mezcla sin el EVB. Resistencias a 1 hora.

La figura 4.25 muestra la forma que toma la arena después del paso de 1 hora para el silicato tipo C, observándose hasta pedazos de terrones de arena que ya se secaron con el paso del tiempo, lo que lleva a que se produzcan corazones de mala calidad.



Figura 4.25. Aspecto de la arena mas silicato al momento en que se ha secado.

### Vida de banco con el uso del EVB

La figura 4.26 muestra los resultados de la resistencia inmediata de la mezcla al momento en que se preparó, media hora y una hora después de haber sido fabricada usando el aditivo extendedor de vida de banco. La resistencia inmediata, después de media hora de fabricarse la mezcla, aumentan hasta casi los 0.65 MPa. Los silicatos B y C mejoran su vida de banco, aunque están en el límite a la hora de haber sido preparada la mezcla. También se puede hacer notar que las resistencias inmediatas no se ven afectadas por el uso del EVB.

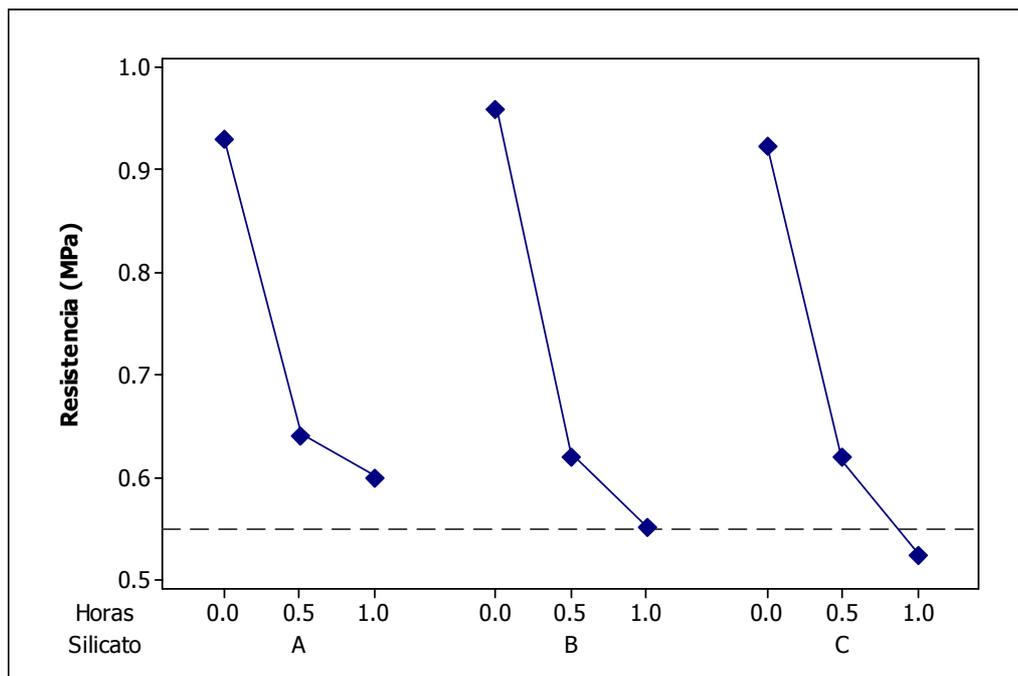


Figura 4.26. Vida de banco de la mezcla con el EVB. Resistencias inmediatas.

En cuanto al desarrollo de resistencia a 1 hora, la figura 4.27 muestra también una mejoría en la vida de banco de los tres silicatos, teniendo mejores resultados para el silicato tipo A. El silicato C es el que continua teniendo los resultados más bajos de los tres tipos de silicatos mas el EVB, aunque se presenta una notable mejoría en cuanto a la vida de banco.

Usando el EVB, las resistencias aumentan alrededor de 0.2 MPa, sin afectar las propiedades inmediatas de los silicatos sin el EVB. Debido a la poca cantidad del EVB contenido en el silicato, éste no aumenta más el pH del silicato, manteniéndose igual para los tres.

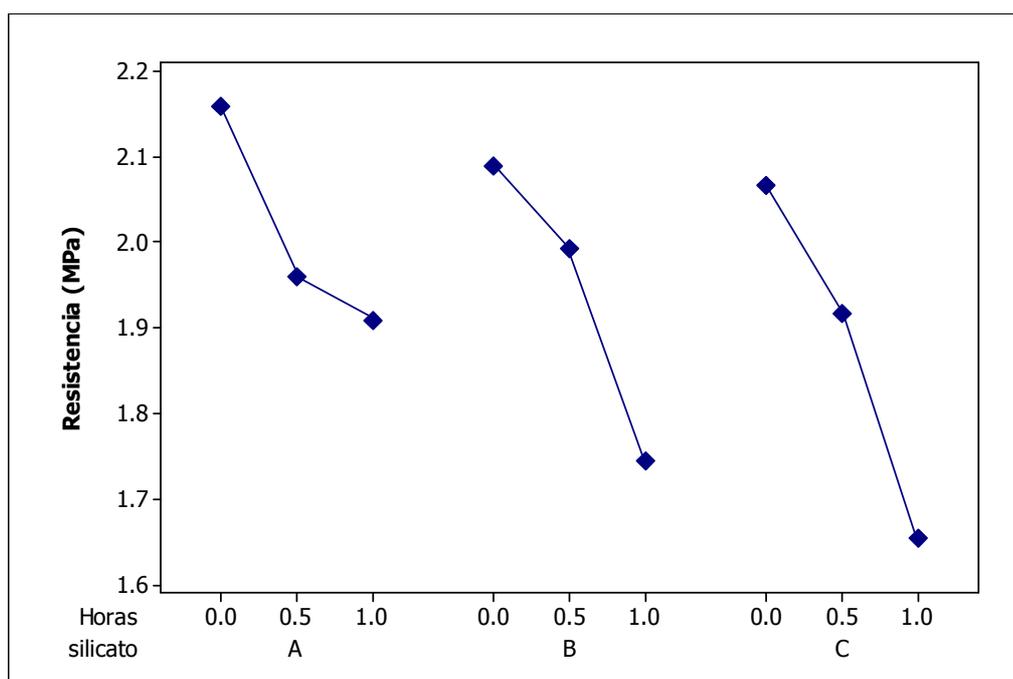


Figura 4.27. Vida de banco de la mezcla con el EVB. Resistencias a 1 hora.

La figura 4.28 muestra la diferencia del uso de un extendedor de vida de banco para una mezcla de arena con silicato. En este ejemplo, se muestra la resistencia inmediata del silicato de sodio tipo A a una vida de banco de 1 hora. Pasada esa hora, sin el uso de el EVB se tiene una resistencia muy baja de 0.47 MPa, muy por debajo de lo especificado, mientras que la resistencia inmediata usando el EVB tiene una resistencia de casi 0.60 MPa.

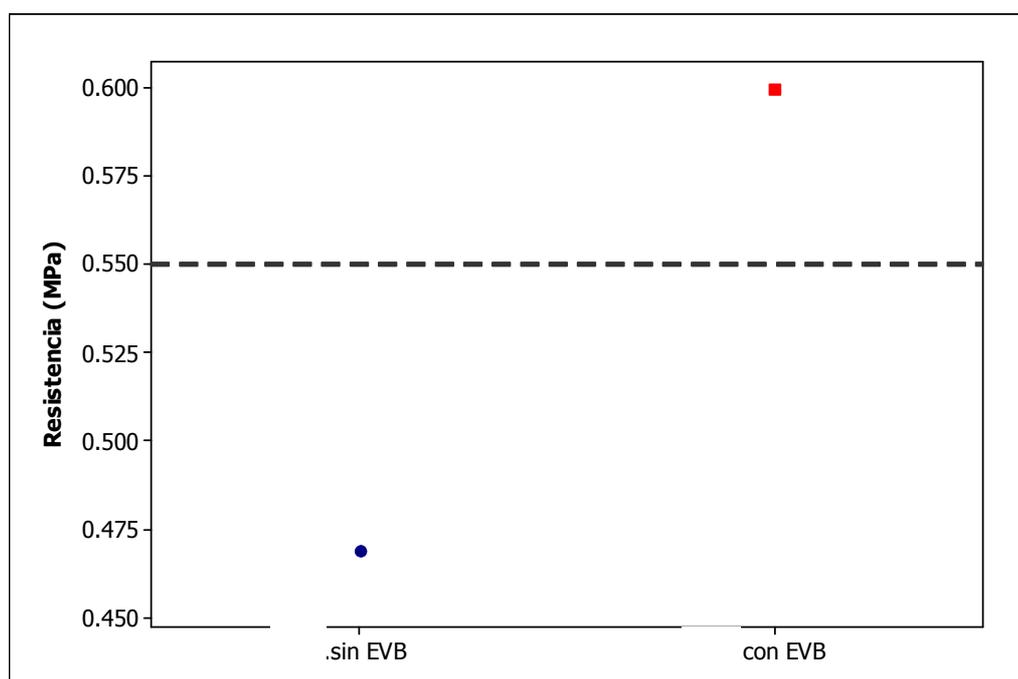


Figura 4.28. Vida de banco para una muestra con y sin EVB después de 1 hora.

#### **4.6 Desarrollo de resistencia a diferentes condiciones ambientales**

Continuando con el proceso de caja caliente, se realizaron pruebas de desarrollo de resistencia hasta 24 horas a diferentes condiciones ambientales. Este parámetro nos indica la resistencia mecánica que tendrán los corazones 24 horas después de ser fabricados, a diferentes condiciones de humedad relativa. Se tomaron en cuenta tres diferentes porcentos de humedad relativa: 30% (condiciones normales de laboratorio), 60% y una condición extrema del 90%.

El hecho de tener corazones con buenas resistencias a condiciones laboratorio no implica que las tengan a nivel de planta, por lo que es importante realizar estas pruebas para tener una idea de la vida de un corazón a altas humedades, así como el tipo de almacenamiento que éstos tendrán que tener.

Las probetas se realizaron usando caja caliente a una temperatura de 120°C, usando el silicato tipo A a una concentración de 2.5%, que son las mejores condiciones demostradas en los experimentos pasados. Una vez fabricadas las probetas, se introducen a la cámara húmeda a 25°C y se controla la humedad, ya sea a 60 o 90% de humedad. Dependiendo de la hora que se quieran verificar las resistencias, las probetas se retiran de la cámara húmeda y se evalúan las propiedades mecánicas en el tensómetro.

Al ser el silicato de sodio un compuesto higroscópico, se espera a que las propiedades de los corazones disminuyan considerablemente, contrario a los corazones con resinas orgánicas base petróleo, como lo son las fenólica-uretánicas.

En la figura 4.29 se observan los resultados de las resistencias de los 3 diferentes contenidos de humedad relativa a 24 horas de desarrollo de resistencia.

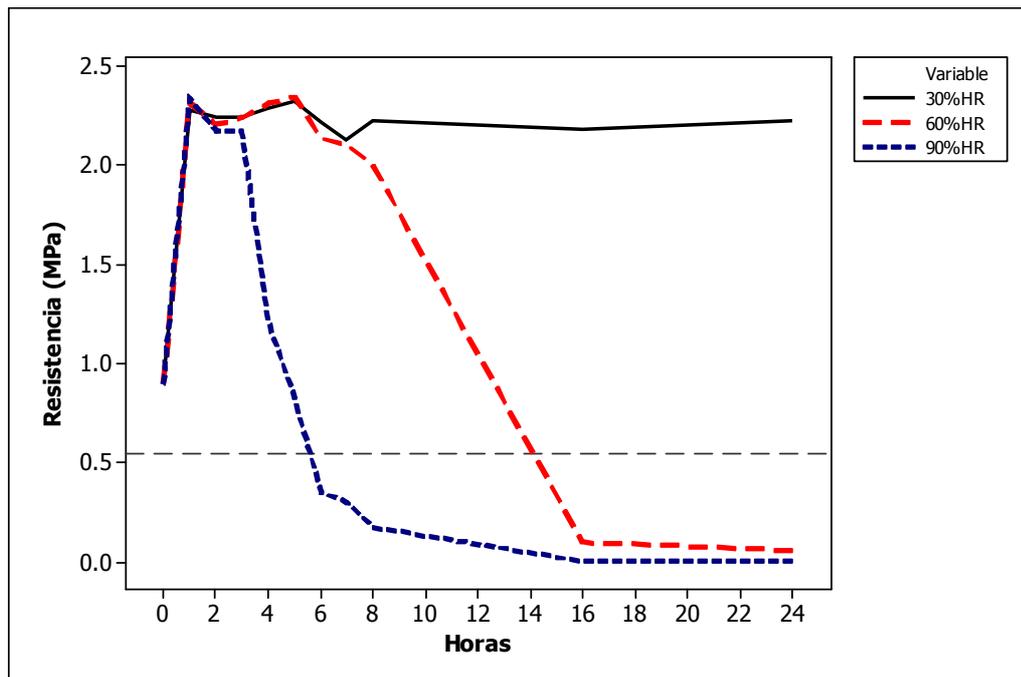


Figura 4.29. Desarrollo de resistencia de 24 horas a 30, 60 y 90% de humedad relativa para el proceso de caja caliente.

A un 30 % de humedad se presentan resultados constantes de resistencia, ya que a 24 horas después de haber fabricado las probetas, éstas presentan casi la misma resistencia que a 2 horas después de haberse fabricado, por lo que se puede decir que a una humedad ambiental no hay problemas de agrietamiento de los corazones. Sin embargo, a un 60% de humedad relativa, las propiedades empiezan a caer a las 8 horas, teniendo para las 16 horas una resistencia de apenas 0.1 MPa. Para condiciones extremas de humedad como lo es 90%, las resistencias caen precipitadamente a las 3 horas, después de las 6 horas, los corazones contienen mucha humedad y sus propiedades ya no son buenas.



Figura 4.30. Probetas después haber estado a altas condiciones de humedad.

El mejor desempeño se obtiene al tener el menor porcentaje de humedad posible, debido a lo observado. Con humedades por debajo del 30%, se pueden almacenar corazones exitosamente hasta por un día y sin ningún riesgo de que éstos se colapsen al momento de vaciar el aluminio. A humedades por encima del 60%, es imposible mantenerlos por más de 2 horas y con buenas resistencias.

#### 4.7 Proceso de caja fría

El proceso de caja fría (CF) para el silicato de sodio en esta investigación consiste en un mecanismo de curado donde existe un arrastre del agua o humedad que contienen los corazones debido al mismo aglutinante, promoviendo el curado. A diferencia de un proceso de caja fría para el silicato de sodio usando reactivos como el CO<sub>2</sub> o endurecedores como los ésteres, en el proceso que se estudiará a continuación no ocurre una reacción química y tampoco existe la presencia de catalizadores o endurecedores en el proceso, simplemente ocurre una deshidratación como en el proceso de caja caliente (CC).

Se decidió investigar este tipo de proceso debido a que no se está utilizando una fuente de calor como en caja caliente, lo que implicaría el no tener que usar resistencias eléctricas o alguna otra fuente para calentar las cajas y así tener un proceso mucho más barato.

En estas pruebas se continuó trabajando con las mejores condiciones del silicato, como lo son un 2.5% del silicato A en la arena, al igual que 3 minutos de tiempo de curado. De igual manera se experimentó con la misma sopladora y la misma presión de soplo, sólo variando la temperatura de la caja de 120°C a 25°C. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de este proceso y se compararán entre ambos.

La figura 4.31 muestra la resistencia inmediata y el desarrollo de resistencia a 1 y 2 horas para el proceso de caja fría con el silicato tipo A. Junto a esa curva, se muestran las resistencias inmediatas y en desarrollo ya vistos del proceso de caja caliente para el mismo tipo de silicato, esto para tener una mejor visualización de la diferencia que existe entre los dos procesos hablando en términos de las propiedades mecánicas a condiciones de laboratorio.

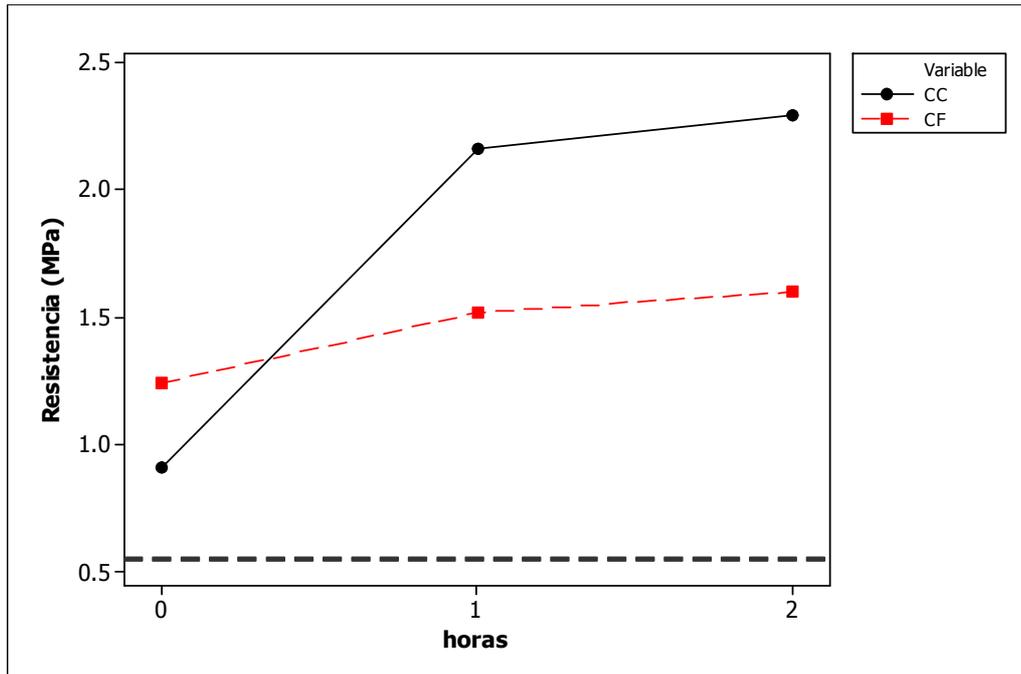


Figura 4.31. Comparación del proceso de caja caliente contra caja fría para resistencias inmediatas y desarrollo de resistencia.

Los resultados muestran que para el proceso de caja fría, las propiedades mecánicas inmediatas son un poco mayores a las de caja caliente, lo cual ayudará a tener corazones más manejables al momento en que salgan de la sopladora.

Los resultados del desarrollo de resistencia para caja fría son menores que para caja caliente. Las resistencias casi se mantienen constantes desde que salen de la sopladora hasta que pasan 2 horas. Esto se debe a que son dos mecanismos de curado diferentes, mientras que con CC el proceso de deshidratación continúa después de que los corazones son retirados, en CF el arrastre del agua sólo se lleva mientras se están curando.

Los resultados de desarrollo de resistencia a 24 horas para 30, 60 y 90% de humedad relativa se muestran en la figura 4.32.

Para un 30% de humedad, las resistencias empiezan a caer precipitadamente después de las 9 horas, aunque a las 24 horas, las resistencias se mantienen cerca de los 0.55 MPa recomendados. Para un 60%, las resistencias se parecen a las de un 30%, hasta que a las 7 horas las resistencias empiezan a disminuir, teniendo para las 16 horas corazones sin resistencia. A un 90%, se tienen buenas resistencias solo hasta una hora, después de las 2, los corazones tienen tanta humedad que se colapsan en sí mismos.

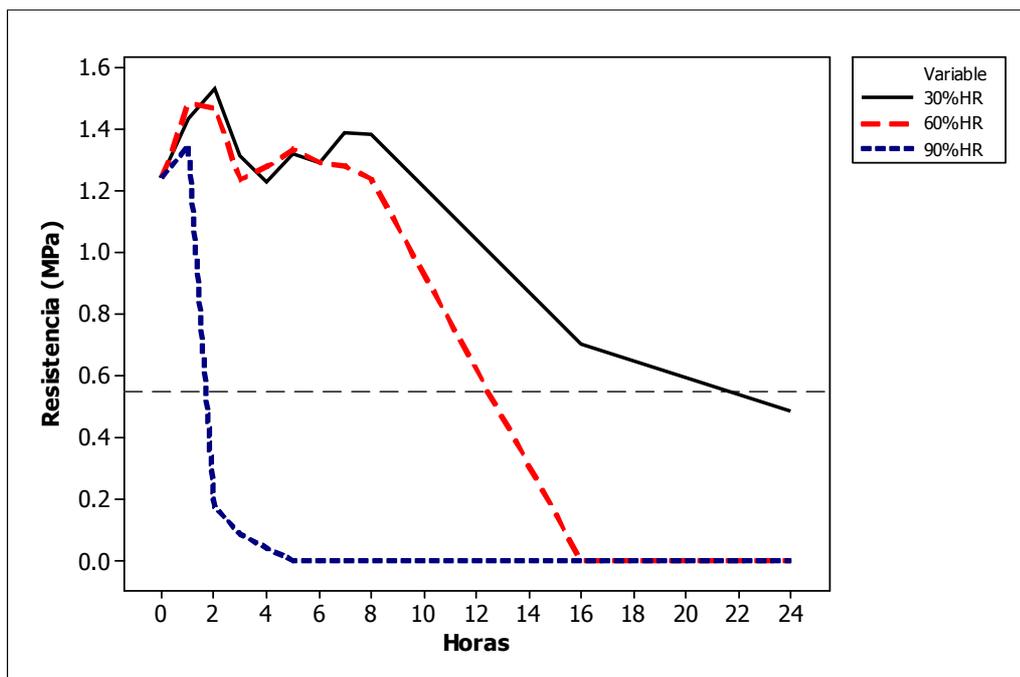


Figura 4.32. Desarrollo de resistencia de 24 horas a 30, 60 y 90% de humedad relativa para el proceso de caja fría.

Las figuras 4.33 y 4.34 muestran la diferencia del desarrollo de resistencia a 24 horas entre los procesos de CC y CF a 30 y 90% de humedad relativa respectivamente. Se puede hacer notar la diferencia de resistencias que existe entre ambos procesos, como ya se mencionó en la figura 4.31, obteniéndose mejores resistencias para CC que para CF, habiendo casi una diferencia de 1 MPa entre ambos.

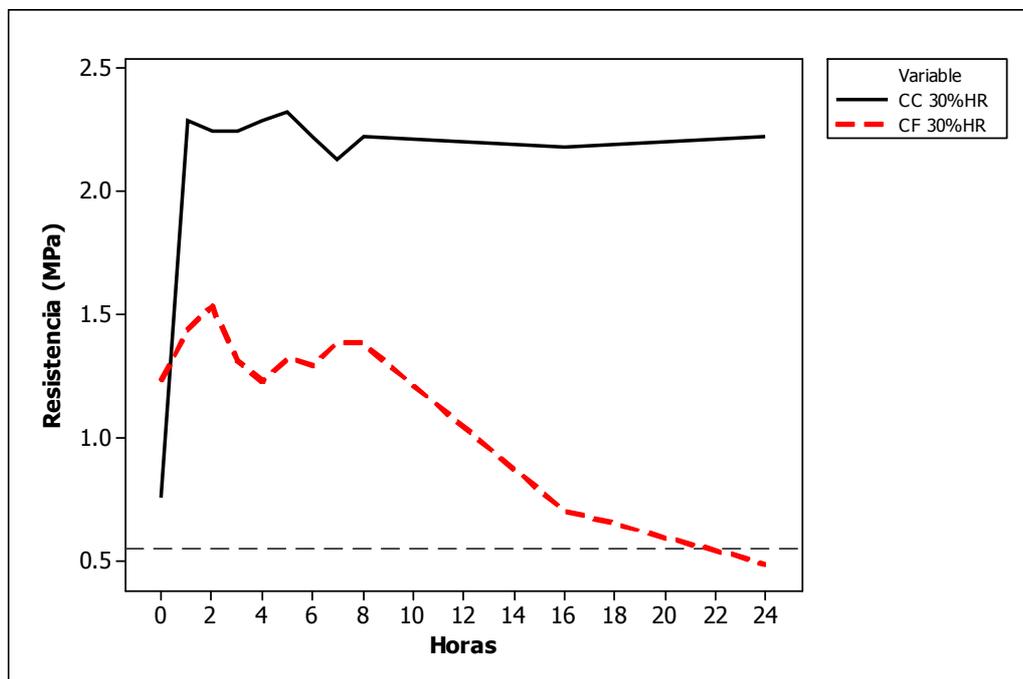


Figura 4.33. Desarrollo de resistencia a 24 horas a un 30% de humedad relativa para los procesos de caja caliente y caja fría.

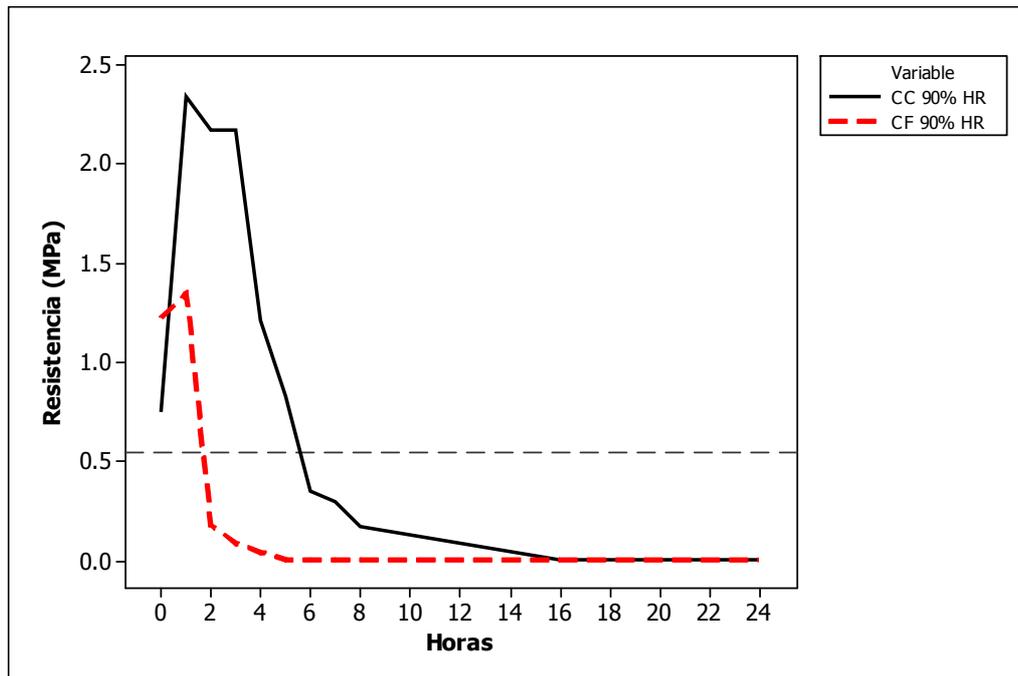


Figura 4.34. Desarrollo de resistencia a 24 horas a un 90% de H.R. para los procesos de caja caliente y caja fría.

#### 4.7.1 Caracterización por microscopía electrónica de barrido

Las probetas obtenidas tanto por el proceso de caja caliente como por el de caja fría usando el silicato tipo A fueron analizados mediante microscopía electrónica de barrido con la finalidad de observar la morfología que presentan los granos de arena, así como también los puentes existentes entre los granos y el silicato de sodio. Esto dará una idea del por qué existe tal diferencias entre los dos procesos, tanto en condiciones normales como en presencia de una alta humedad relativa.

## Caja caliente

En la imagen 4.35 se muestra la micrografía que se obtuvo de una muestra de una probeta realizada por el proceso de caja caliente con un 2.5% del silicato tipo A a una temperatura de curado de 120°C y a una condición de humedad relativa de 30%.

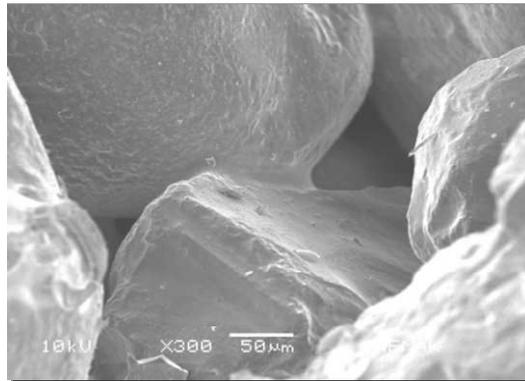


Figura 4.35. Micrografía por SEM. Morfología de los granos de arena por el proceso de caja caliente.

En la imagen anterior es posible observar la morfología de los granos de arena por el proceso de caja caliente en condiciones de laboratorio, a una magnificación de 300X. Se logra apreciar la homogeneidad en la morfología de los granos recubiertos con el silicato de sodio, sin que se observen estratos de capas de silicato en los granos.

Una uniformidad del aglutinante sobre los granos de arena permitirá que las resistencias sean altas, ya que todos los granos se están recubriendo completamente y se evita desperdiciar la menor cantidad de resina en la arena utilizada.

En la imagen 4.36 se muestra la micrografía de la imagen 4.35 aumentada de 300X a 800X, para poder visualizar mejor el puente existente entre el grano de arena y el silicato de sodio, para el mismo proceso de caja caliente y bajo las mismas condiciones.

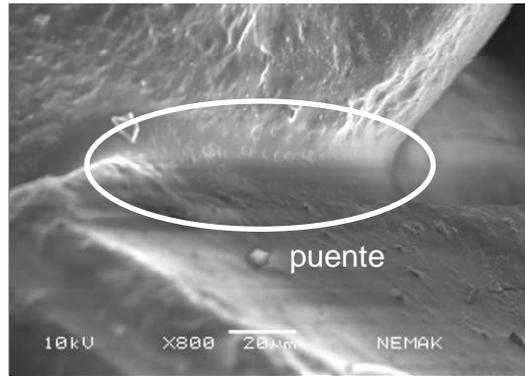


Figura 4.36. Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja caliente.

Es posible observar claramente el puente de aglutinante que une a los granos de arena, en donde se ve la ausencia de poros o grietas, además de su alto grado de uniformidad, lo que permite tener resistencias mecánicas altas en los corazones bajo condiciones de humedades bajas.

La presencia de grietas y poros hacen que las resistencias disminuyan considerablemente, y esto puede deberse al proceso de curado, a la resina y cantidad utilizada, a las condiciones ambientales, al tiempo que ha pasado desde la fabricación del corazón y al trato que ha recibido éste después de su fabricación.

En la imagen 4.37 se muestra la micrografía que se obtuvo de una muestra de una probeta realizada por el proceso de caja caliente a una condición de humedad relativa del 90%.

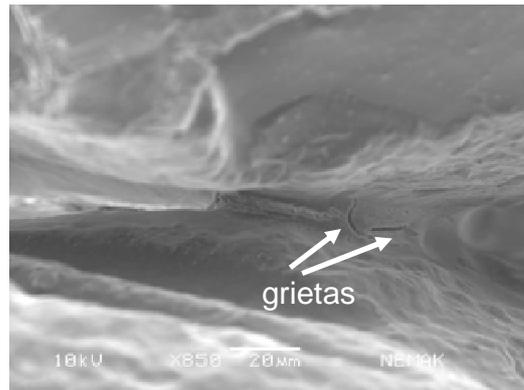


Figura 4.37. Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja caliente expuesto a un 90% de humedad.

En esta figura se logró observar la presencia de varias grietas presentes en el puente de silicato, esto debido a la presencia de humedad en el corazón. El silicato absorbe la humedad del medio ambiente y ocasiona que el silicato ya deshidratado, vuelva a hidratarse, ocasionando que la película de aglutinante se agriete o presente porosidad, por lo que el corazón presentará resistencias mecánicas menores.

## Caja fría

En la imagen 4.38 se muestra la micrografía que se obtuvo de una muestra de una probeta realizada por el proceso de caja fría con un 2.5% del silicato tipo A y a una condición de humedad relativa del 30%.

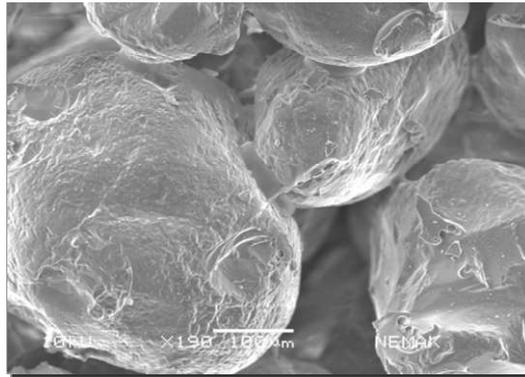


Figura 4.38. Micrografía por SEM. Morfología de los granos de arena por el proceso de caja fría.

En la imagen anterior se observa la morfología de los granos de arena por el proceso de caja fría en condiciones de laboratorio, a una magnificación de 190X. Se puede ver que el silicato de sodio que recubre los granos de arena se encuentra esparcido de una manera desigual o heterogénea.

Esta heterogeneidad es ocasionada por el mecanismo de arrastre que hace que se curen los corazones, lo que provoca que se erosionen las capas de silicato y no se extienda de manera uniforme el aglutinante. Debido a esto, las resistencias disminuirán, por lo que se tendrá la necesidad de utilizar más aglutinante para que haya un mayor recubrimiento de silicato en los granos de arena.

En la imagen 4.39 se muestra una micrografía aumentada a 1000X, donde se aprecia el puente existente entre el grano de arena y el silicato de sodio para el proceso de caja fría y 30% de H.R. a un tiempo de curado de 3 minutos.



Figura 4.39. Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja fría.

En la figura se aprecia la erosión del puente de silicato que une a los granos. Es posible además visualizar pequeñas porosidades entre los granos de arena y el puente de aglutinante, provocado por el mismo mecanismo de arrastre que hace que el silicato no cubra los granos de arena completamente, ocasionando resistencias no tan altas como para el proceso de caja caliente.

La presencia de esas porosidades, aparte del desigual recubrimiento de silicato en los granos provoca también que el desarrollo de resistencias sea parecido a la resistencia inmediata, ya que habrá regiones donde no hubo un secado completo.

En la imagen 4.40 se muestra la micrografía que se obtuvo de una muestra de una probeta realizada por el proceso de caja fría expuesta a una condición de humedad relativa del 90%.

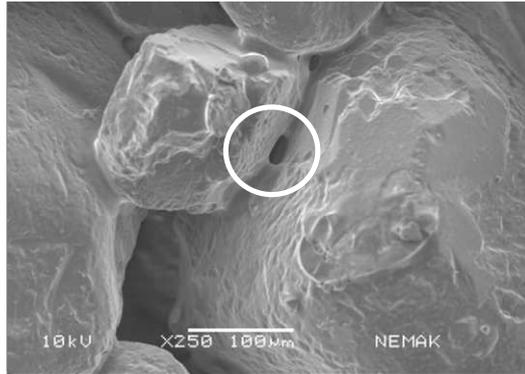


Figura 4.40. Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja fría expuesto a un 90% de humedad.

Así como en la figura 4.39 se observan porosidades debido a la erosión existente en los granos debido al mecanismo de curado, éstas también se deben a la alta presencia de humedad en el ambiente. Se puede presenciar una gran porosidad entre los granos y el puente de silicato, lo que ocasiona resistencias mecánicas muy bajas, como ya se han mostrado en resultados anteriores.

#### 4.8 Distorsión en caliente

Las pruebas de distorsión en caliente ayudan a determinar la deformación del corazón a altas temperaturas. Las probetas para medir la distorsión en caliente son barras delgadas de arena con silicato de sodio las cuales van a ser expuestas a una flama con una relación aire-gas estándar. En esta prueba se obtiene la expansión máxima de dicha barra, su plasticidad y el tiempo máximo de ruptura expuesto en la flama.

Se elaboraron probetas con resina inorgánica base silicato de sodio para evaluar la distorsión en caliente y compararlo con la resina de caja fría (Cold-Box) base fenol-uretano (F.U.). Los resultados son mostrados en la figura 4.41.

Para las probetas inorgánicas se muestra una distorsión máxima de 0.64 mm, mientras que para el proceso orgánico de caja fría es de 0.18 mm.

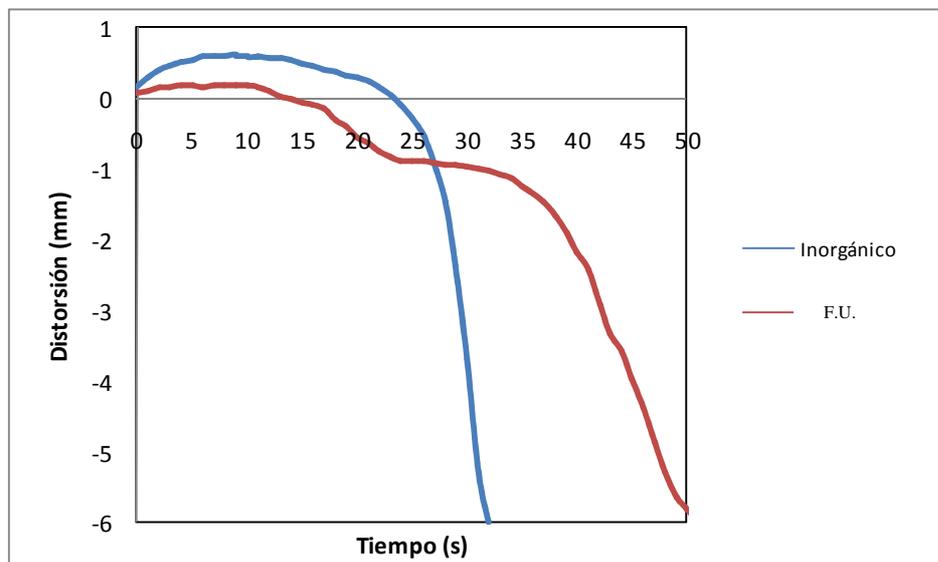


Figura 4.41. Distorsión en caliente para las resinas inorgánicas y fenólicas uretánicas.

Se observa que la distorsión en caliente de la resina fenólica-uretánica es mayor que la resina inorgánica, además que a los 25 segundos las probetas con resina inorgánica tienden a pandearse completamente sin que lleguen a romperse, habiendo un tiempo mayor en que las probetas de la resina fenólica-uretánica resisten térmicamente hasta que se rompen, por lo que la resina F.U. tendrá un mejor desarenado.

La figura 4.42 muestra una probeta con resina inorgánica en el equipo de distorsión térmica, y como ésta llega a doblarse.



Figura 4.42. Prueba de resistencia en caliente.

## 4.9 Evolución de gases

Para evitar defectos por gas de corazón en las piezas, es preferible que la cantidad de gases emitida de los corazones sea mínima. Esta prueba proporciona la cantidad de gas que genera una muestra representativa de corazón.

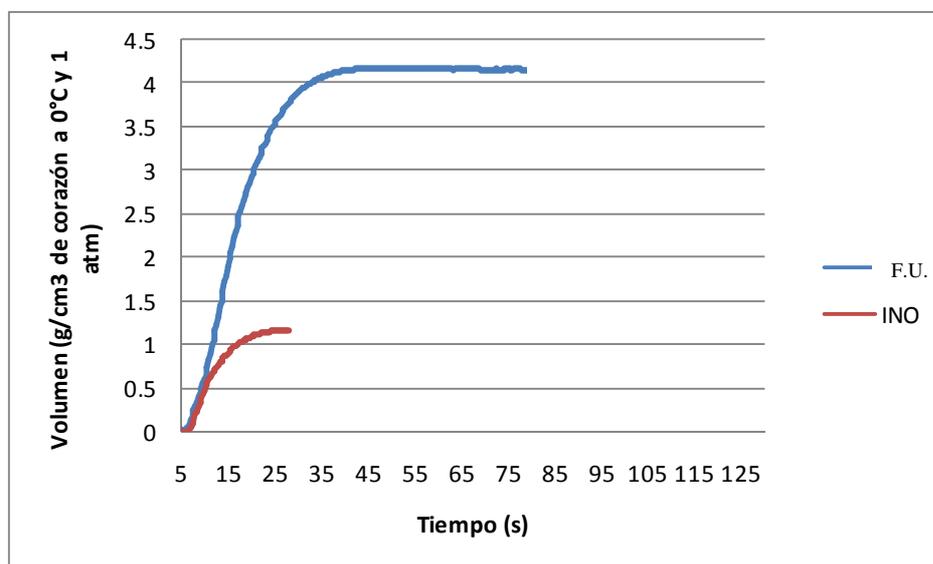


Figura 4.43. Evolución de gases para las resinas F.U. e inorgánica.

La figura 4.43 compara la evolución de gases del sistema clásico fenólico-uretánico con el sistema de aglutinante inorgánico. Como era de esperarse, la resina F.U. (1.2% en la arena) tiene una mayor evolución de gases debido a que es un sistema orgánico, además de que los solventes y aditivos que contienen las resinas también influyen en su comportamiento.

El comportamiento del sistema inorgánico, que contienen un 2.5% total de silicato de sodio en la arena, es muy bajo comparado con el otro sistema, debido a que éste aglutinante es base agua, además de que no contienen aditivos orgánicos, por lo que los gases evolucionados en este sistema es debido a la presencia de compuestos orgánicos que pudiera contener la arena, a parte del agua que haya absorbido el silicato en ese momento.

# CAPITULO 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

En base a los objetivos planteados y a los resultados obtenidos, se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

1) El silicato de sodio trabaja eficazmente como aglutinante de corazones de arena, teniendo no muy amplias relaciones de  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ , por lo que la alcalinidad del silicato proveniente del  $\text{Na}_2\text{O}$  ayuda a tener mejores resultados.

2) El contenido de sólidos del silicato en un rango entre 45-48% promueve buenas resistencias mecánicas del corazón, ya que a una mayor cantidad de agua se tienen resistencias menores.

3) Para tener resistencia inmediata aceptable y tener corazones manejables al momento de salir de la sopladora, es necesario un 2.5% de silicato en la arena, ya que con 1.5% las resistencias son bajas y con 2.0% la resistencia inmediata aun no es lo suficientemente buena. Un contenido de silicato mayor al 2.5% implicaría problemas de desarenado y recuperación de la arena.

4) Se obtienen las mejores resistencias mecánicas a una temperatura de curado de 120°C, aunque para 150°C las resistencias aun son buenas. A 180°C las resistencias disminuyen considerablemente y se obtienen corazones de mala calidad.

5) En cuanto al uso del silicato de sodio, los silicatos A y B muestran resistencia mecánica inmediata y en desarrollo muy parecidas, además que son lo suficientemente altas, contrario al silicato tipo C, que presenta malas propiedades.

6) La fluidez de la mezcla con los silicatos empleados es buena, por lo que no habrá problemas de soplado y llenado.

7) La vida de banco de la mezcla de arena-silicato es de regular a mala, sin embargo, usando un extendedor de vida de banco mejora las propiedades hasta por una hora, sin que este aditivo afecte las propiedades mecánicas de los corazones.

8) A condiciones extremas de humedad, se presentan bajas resistencias mecánicas después de las 6 horas, ya que el silicato tiende a absorber esa humedad, ocasionando que los corazones se agrieten y colapsen.

9) Las resistencias inmediatas y el desarrollo de resistencia de los corazones fabricados por caja fría son mucho menores que por caja caliente, esto debido al mecanismo de curado del proceso de caja fría que ocasiona que el silicato no cubra de una manera uniforme los granos, presentando bajas resistencias tanto en condiciones de humedad bajas como altas.

10) Los corazones con aglutinante inorgánico presentan una menor evolución de gases que el proceso común fenólico-uretánico, el cual prevendrá menos defectos en las piezas como porosidades o inclusiones de gases.

## 5.2 Recomendaciones

A continuación se presentan algunas recomendaciones para un trabajo a futuro acerca de este tema:

1) Establecer un proceso de desarenado de los corazones en las piezas, para ello se puede utilizar un método de desarenado vía húmeda o mecánico.

2) Realizar estudios con diferentes aditivos que ayuden a mejorar las resistencias mecánicas a altas condiciones de humedad relativa.

3) Desarrollar un mecanismo de recuperación de la arena con silicato para poder utilizar ésta sin que afecte las propiedades de los corazones elaborados por el proceso común con resinas orgánicas. Se recomienda el uso de aditivos que ayuden a disminuir el pH de la arena, así como también mecanismos de atrición mecánica para remover las capas de silicato de los granos de arena.

4) Seguir estudiando el proceso de caja fría para corazones con aglutinantes inorgánicos, buscando la manera de que cada parte del corazón se cure.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1].- Feasibility study on pollution control in foundries, BKH Consulting Engineers, 1992.
- [2].- Askeland, Donald. "Ciencia e ingeniería de materials" Thomson, 4a ed. 2004, 381, 382
- [3].- Ramachandra Rao, "Resource Recovery and Recycling from metallurgical wastes" 1a edición, 2006, 431.
- [4].- McDonald, Mike. "Sodium Silicate: a Binder for the 21<sup>st</sup> Century". National Silicates. PQ Corporation. 2008.
- [5].- "Arenas alternativas para la fabricación de moldes y corazones en la fundición de Aluminio". M.C. Lizzet Cedillo.
- [6].- "Mold and Core Test Handbook", American Foundrymen's Society, segunda edición, E.U.A, 1-7.
- [7].- Vallone Flores L, García Vallejo R, "Influencia de la Composición de Resinas y su Concentración en la Resistencia a la Tensión de Corazones de Arena", Programa de Evaluación Final, U de M, México,1999, 5-7.
- [8].- Castro Garcia Pablo; Juan Pablo Velazquez, "Proceso de Corazones Nematik", Nematik S.A. México,1997.
- [9].- Groover, Mikel. "Fundamentos de manufactura moderna" Pearson, 2005, 261-265.
- [10].- Fundamental Core Technology, Cast metals technology, 1976, 5-9.
- [11].- "El Proceso Ashland", Ashland Chemical, México, 1999, 2-9.
- [12].- Paul R. Carey, Practical aspects of resin binder processes, Ashland Chemical Co, Columbus OH, 1995.

- [13].- Greg Sturtz, Sand Binder Systems: Shell Process. Ashland Chemical Co, Columbus OH, 1995.
- [14].- "Chemically bonded Cores & Molds", American Foundrymen's Society, E.U.A, 1987, 8-9, 62.
- [15].- "Inorganic Binders – Situation 2008". Kuhs Consultant, 2008.
- [16].- Wolff, Andreas, "Un proceso de fabricación de corazones compatible con el medio ambiente", revista Giesserei No. 91, 2004, 80-84.
- [17].- Bischoff, Frank. Untersuchungen zum Einsatz eines wasserlöslichen, anorganischen Kernbinders auf Basis von Magnesiumsulfat in einer Aluminium-Leichtmetallgießerei. Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2003.
- [18].- Binder composition. Kaiska y Toeniskoetter. US Patent 3930872. 1965.
- [19].- Inorganic foundry binder systems and their uses. Yunovich, Yuily. US Patent 5390727. 1995.
- [20].- Metal silico-phosphate binders and foundry shapes produced therefrom. Seeney, Charles. US Patent 4390370.1983
- [21].- McDonald, Mike. "Sodium Silicate: a Binder for the 21<sup>st</sup> Century". National Silicates. PQ Corporation. 2008.
- [22].- PQ ® Soluble Silicates in Refractory and Chemical Resistant Cements. Boletín 24-1. PQ Corporation. 2008.
- [23].- Srinagesh, K. "Chemistry of sodium Silicate as a Sand Binder". AFS International Cast Metals journal. 1991.
- [24].- Greg Sturtz, Sand Binder Systems: Silicate CO<sub>2</sub>, silicate no bake, CO<sub>2</sub> cured alkaline phenolic. Ashland Chemical Co, Columbus OH, 1995.

- [25].- Wolff, Andreas, "Un proceso de fabricación de corazones compatible con el medio ambiente", revista Giesserei No. 91, 2004, 80-84.
- [26].- Casting College Part C: Core Manufacturing. Hydro aluminium Deutschland GmbH. 2006,
- [27].- "Silicate bonded molding sand". FOSECO, 2008.
- [28].- Von Emmerich Weissenbek, "BMW-Leichtmetallgießerei setzt auf anorganisch gebundene Kerne", revista Giesserei No. 95, 2008.
- [29].- Paul Carey, Detroit, MI, Fundamentals of Nobake Reclamation, 1978. 63-70.
- [30].- Reclamation of foundry sands. Ashton, Michael. Sheffield, Inglaterra. US Patent 4685973.

# ANEXOS

## A. Resultados estadísticos

### Capítulo 4.1 Propiedades mecánicas

#### 1.5 % Silicato

Inmediata, 1 hora, 2 horas

Temperatura = 120°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.8144	0.0123	0.0301	0.7928	0.7980	0.8032
	B	6	0	0.7653	0.0118	0.0289	0.7308	0.7411	0.7586
	C	6	0	0.6389	0.0177	0.0433	0.5860	0.6015	0.6343
1 hora	A	6	0	1.6304	0.0162	0.0396	1.5856	1.6012	1.6167
	B	6	0	1.5175	0.0279	0.0684	1.4478	1.4736	1.5054
	C	6	0	1.0681	0.0243	0.0596	0.9928	1.0238	1.0532
2 horas	A	6	0	1.5727	0.0171	0.0420	1.5167	1.5270	1.5788
	B	6	0	1.5835	0.0186	0.0457	1.5314	1.5462	1.5719
	C	6	0	1.0275	0.0192	0.0471	0.9514	0.9979	1.0238

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.8287	0.8742
	B	0.7963	0.8066
	C	0.6808	0.6963
1 hora	A	1.6732	1.6891
	B	1.5495	1.6477
	C	1.1306	1.1513
2 horas	A	1.6145	1.6183
	B	1.6287	1.6546
	C	1.0734	1.0824

## Temperatura = 150°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.5636	0.0143	0.0351	0.5138	0.5318	0.5653
	B	6	0	0.55745	0.00956	0.02342	0.53188	0.54145	0.55153
	C	6	0	0.4483	0.0135	0.0330	0.4068	0.4119	0.4520
1 hora	A	6	0	1.3137	0.0220	0.0539	1.2409	1.2616	1.3179
	B	6	0	1.3303	0.0117	0.0288	1.2961	1.3102	1.3237
	C	6	0	1.1438	0.0236	0.0579	1.0479	1.0996	1.1529
2 horas	A	6	0	1.3617	0.0178	0.0435	1.3099	1.3106	1.3719
	B	6	0	1.4013	0.00722	0.0177	1.3788	1.3840	1.4016
	C	6	0	1.2961	0.0130	0.0317	1.2616	1.2720	1.2892
Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum						
inm.	A	0.5929	0.6136						
	B	0.57393	0.59979						
	C	0.4791	0.4895						
1 hora	A	1.3633	1.3788						
	B	1.3530	1.3788						
	C	1.1841	1.2203						
2 horas	A	1.3943	1.4202						
	B	1.4167	1.4271						
	C	1.3202	1.3512						

## Temperatura = 180°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.3642	0.0115	0.0281	0.3378	0.3426	0.3550
	B	6	0	0.3338	0.0113	0.0277	0.3033	0.3061	0.3344
	C	6	0	0.2987	0.0102	0.0249	0.2689	0.2740	0.2999
1 hora	A	6	0	0.9903	0.0139	0.0341	0.9514	0.9617	0.9820
	B	6	0	0.9172	0.0226	0.0552	0.8480	0.8790	0.9006
	C	6	0	0.7836	0.0142	0.0348	0.7515	0.7566	0.7687
2 horas	A	6	0	0.96464	0.00667	0.01633	0.94817	0.95058	0.96173
	B	6	0	0.9964	0.0111	0.0271	0.9652	0.9703	0.9969
	C	6	0	0.8055	0.0165	0.0403	0.7515	0.7566	0.8238

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.3878	0.4136
	B	0.3533	0.3792
	C	0.3171	0.3378
1 hora	A	1.0289	1.0341
	B	0.9738	0.9996
	C	0.8238	0.8342
2 horas	A	0.97724	0.99275
	B	1.0152	1.0410
	C	0.8325	0.8480

## 2.0 % de silicato

Inmediata, 1 hr, 2 hrs

Temperatura = 120°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.8858	0.0154	0.0377	0.8411	0.8411	0.8926
	B	6	0	0.8802	0.0314	0.0769	0.7584	0.8049	0.9067
	C	6	0	0.99635	0.00984	0.02410	0.96518	0.98069	0.98976
1 hr	A	6	0	2.0716	0.0219	0.0538	1.9993	2.0300	2.0648
	B	6	0	2.1366	0.0272	0.0666	2.0682	2.0734	2.1284
	C	6	0	1.5580	0.0394	0.0965	1.4547	1.4547	1.5512
2 hrs	A	6	0	2.0276	0.0293	0.0718	1.9418	1.9591	2.0269
	B	6	0	2.1155	0.0111	0.0272	2.0829	2.0874	2.1199
	C	6	0	1.7622	0.0342	0.0837	1.6201	1.6977	1.7775

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.9204	0.9307
	B	0.9342	0.9652
	C	1.01860	1.03412
1 hr	A	2.1268	2.1372
	B	2.1906	2.2475
	C	1.6577	1.6891
2 hrs	A	2.0855	2.1372
	B	2.1389	2.1441
	C	1.8321	1.8476

## Temperatura = 150°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.6612	0.0178	0.0437	0.6168	0.6299	0.6446
	B	6	0	0.6245	0.0145	0.0356	0.5791	0.5946	0.6186
	C	6	0	0.5677	0.0145	0.0355	0.5244	0.5396	0.5584
1 hr	A	6	0	1.5633	0.0218	0.0534	1.5098	1.5150	1.5565
	B	6	0	1.4337	0.0157	0.0384	1.3843	1.3957	1.4374
	C	6	0	1.3520	0.0110	0.0268	1.3099	1.3254	1.3616
2 hrs	A	6	0	1.7341	0.0212	0.0519	1.6477	1.6994	1.7408
	B	6	0	1.7816	0.0186	0.0455	1.7235	1.7494	1.7683
	C	6	0	1.6065	0.0435	0.1066	1.4478	1.5098	1.6240

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.7049	0.7308
	B	0.6601	0.6756
	C	0.6084	0.6136
1 hr	A	1.6167	1.6270
	B	1.4667	1.4822
	C	1.3696	1.3834
2 hrs	A	1.7687	1.8007
	B	1.8348	1.8375
	C	1.6804	1.7580

## Temperatura = 180°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	7	0	0.4319	0.0160	0.0425	0.3792	0.3980	0.4274
	B	6	0	0.4757	0.0294	0.0719	0.3447	0.4378	0.4826
	C	6	0	0.3910	0.0202	0.0495	0.3378	0.3533	0.3757
1 hr	A	7	0	1.2554	0.0105	0.0278	1.2152	1.2409	1.2437
	B	6	0	1.2134	0.0142	0.0349	1.1513	1.1927	1.2168
	C	6	0	1.1552	0.0473	0.1158	1.0479	1.0686	1.1375
2 hrs	A	7	0	1.1947	0.0336	0.0889	1.1272	1.1375	1.1720
	B	6	0	1.3076	0.0209	0.0512	1.2203	1.2823	1.3099
	C	6	0	1.2356	0.0577	0.1414	1.0962	1.1375	1.2099

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.4550	0.5088
	B	0.5274	0.5584
	C	0.4382	0.4706
1 hr	A	1.2754	1.2961
	B	1.2392	1.2547
	C	1.2123	1.3747
2 hrs	A	1.1858	1.3899
	B	1.3375	1.3788
	C	1.3105	1.4983

## 2.5% Silicato

**Inmediata, 1 hr, 2 hrs**

**Temperatura = 120°C**

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.8909	0.0161	0.0395	0.8273	0.8549	0.8997
	B	6	0	0.9566	0.0142	0.0349	0.9169	0.9273	0.9479
	C	6	0	0.9374	0.0159	0.0389	0.8893	0.9049	0.9300
1 hr	A	6	0	2.2022	0.0308	0.0755	2.1234	2.1337	2.1875
	B	6	0	2.4172	0.0336	0.0823	2.2888	2.3509	2.4222
	C	6	0	1.9840	0.0189	0.0463	1.9235	1.9476	1.9821
2 hrs	A	6	0	2.3159	0.0300	0.0734	2.2475	2.2578	2.2992
	B	6	0	2.4166	0.0247	0.0605	2.3440	2.3440	2.4309
	C	6	0	2.0804	0.00569	0.0139	2.0655	2.0675	2.0786

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.9255	0.9307
	B	0.9953	1.0031
	C	0.9772	0.9928
1 hr	A	2.2785	2.3095
	B	2.4905	2.5164
	C	2.0148	2.0613
2 hrs	A	2.3656	2.4511
	B	2.4750	2.4750
	C	2.0924	2.1027

## Temperatura = 150°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.7182	0.0122	0.0300	0.6894	0.6894	0.7103
	B	6	0	0.6962	0.0122	0.0299	0.6687	0.6739	0.6890
	C	6	0	0.5888	0.0112	0.0273	0.5547	0.5575	0.5963
1 hr	A	6	0	2.1158	0.0182	0.0445	2.0820	2.0820	2.1062
	B	6	0	2.0223	0.0196	0.0481	1.9441	1.9855	2.0234
	C	6	0	1.6693	0.0296	0.0726	1.5774	1.6043	1.6684
2 hrs	A	6	0	2.1732	0.0161	0.0393	2.1303	2.1355	2.1682
	B	6	0	1.9673	0.0200	0.0491	1.8752	1.9372	1.9791
	C	6	0	1.6087	0.0128	0.0312	1.5723	1.5771	1.6098

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.7532	0.7584
	B	0.7153	0.7515
	C	0.6101	0.6205
1 hr	A	2.1379	2.2020
	B	2.0700	2.0751
	C	1.7408	1.7511
2 hrs	A	2.2165	2.2199
	B	2.0027	2.0131
	C	1.6339	1.6546

## Temperatura = 180°C

Variable	Tipo de silicato	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median
inm.	A	6	0	0.4823	0.0165	0.0403	0.4187	0.4459	0.4895
	B	6	0	0.50450	0.00934	0.02288	0.47569	0.48086	0.50695
	C	6	0	0.37688	0.00936	0.02293	0.34471	0.36022	0.37573
1 hr	A	6	0	1.3685	0.0151	0.0369	1.3099	1.3306	1.3823
	B	6	0	1.4125	0.0156	0.0382	1.3719	1.3771	1.4098
	C	6	0	1.2570	0.0142	0.0348	1.2203	1.2306	1.2478
2 hrs	A	6	0	1.4650	0.00921	0.0226	1.4340	1.4443	1.4684
	B	6	0	1.4705	0.0171	0.0419	1.4133	1.4340	1.4684
	C	6	0	1.1996	0.0160	0.0392	1.1513	1.1668	1.1961

Variable	Tipo de silicato	Q3	Maximum
inm.	A	0.5153	0.5308
	B	0.52568	0.53085
	C	0.39296	0.41365
1 hr	A	1.3961	1.4064
	B	1.4476	1.4616
	C	1.2858	1.3168
2 hrs	A	1.4840	1.4891
	B	1.5122	1.5236
	C	1.2409	1.2409

## B. Listado de figuras

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
2.1	Expansión térmica de diferentes tipos de arena	8
2.2	Diagrama de Krumbein	9
2.3	Morfología de grano redondo, sub-angular y angular de la arena sílica.	9
2.4	Moldes y corazones de arena	12
2.5	Resinas utilizadas en el proceso de caja fría	17
2.6	Reacción del proceso fenólico / uretánico	18
2.7	Producción de piezas de aluminio y formación de emisiones usando corazones orgánicos (izquierda) y corazones inorgánicos (derecha).	20
2.8	Diagrama de fases del silicato de sodio	25
2.9	Estructuras del silicato	26
2.10	Diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo de del contenido de agua	27
2.11	Silicato de sodio en presentaciones sólida y líquida	29
2.12	Reacciones del proceso silicato / éster	31
2.13	Reacciones del proceso silicato / CO <sub>2</sub>	33
2.14	Proceso de deshidratación del aglutinante base silicato	34
2.15	Almidón de papa utilizado como aglutinante y/o aditivo en la fabricación de corazones.	36
2.16	Sistema atricionador de arena que combina el impacto y redondeo del grano.	40
3.1	Aspecto físico que presentan los silicatos de sodio tipo A, B y C	46
3.2	Agitador de mallas Simpson utilizado para realizar el análisis Granulométrico	48
3.3	Estereoscopio Olympus SZH10	49
3.4	Comportamiento de la viscosidad en función a la relación en peso SiO <sub>2</sub> :Na <sub>2</sub> O.	51

3.5	Viscosímetro portátil Viscolite VL700	51
3.6	Equipo para medir pH Thermo Orion	52
3.7	Analizador termogravimétrico 50 Shimadzu	54
3.8	Mezclador de arena – resina Hobart	54
3.9	Procedimiento de elaboración de probeta	55
3.10	Sopladora Redford de caja caliente para la elaboración de Probetas	56
3.11	Probetas de tensión	59
3.12	Tensómetro digital para corazones Simpson Gerosa	60
3.13	Probeta de distorsión en caliente (ensayo BCIRA)	61
3.14	Diagrama de prueba de distorsión en caliente	61
3.15	Esquema de distorsión en caliente	62
3.16	Cámara Húmeda	63
3.17	Equipo DISA George Fisher para la medición de la evolución de gases	64
3.18	Microscopio electrónico de barrido	65
4.1	Distribución granulométrica de la arena	68
4.2	Morfología de los granos de arena	69
4.3	pH de los diferente tipos de silicatos	71
4.4	Porcentaje de sólidos	72
4.5	Viscosidades de los tipos de silicatos	72
4.6	Descomposición térmica del aditivo EVB	73
4.7	Resistencia mecánica inmediata para un 1.5% de silicato	75
4.8	Desarrollo de resistencia a 1 hora para un 1.5% de silicato	76
4.9	Desarrollo de resistencia a 2 horas para un 1.5% de silicato	77
4.10	Resistencias con diferentes silicatos para un 1.5%.	78
4.11	Resistencias de los silicatos a diferentes temperaturas de curado para un 1.5%.	79
4.12	Resistencia mecánica inmediata para un 2.0% de silicato	80
4.13	Desarrollo de resistencia a 1 hora para un 2.0% de silicato	81
4.14	Desarrollo de resistencia a 2 horas para un 2.0% de silicato	82

4.15	Resistencias con diferentes silicatos para un 2.0%	83
4.16	Resistencias de los silicatos a diferentes temperaturas de curado para un 2.0%	84
4.17	Resistencia mecánica inmediata para un 2.5% de silicato	85
4.18	Desarrollo de resistencia a 1 hora para un 2.5% de silicato	86
4.19	Desarrollo de resistencia a 2 horas para un 2.5% de silicato	86
4.20	Resistencias con diferentes silicatos para un 2.5%	87
4.21	Resistencias de los silicatos a diferentes temperaturas de curado para un 2.5%	88
4.22	Aspecto de una probeta arenosa y lisa	91
4.23	Vida de banco de la mezcla sin el EVB. Resistencias inmediatas	94
4.24	Vida de banco de la mezcla sin el EVB. Resistencias a 1 hora	95
4.25	Aspecto de la arena mas silicato al momento en que se ha secado	95
4.26	Vida de banco de la mezcla con el EVB. Resistencias inmediatas	96
4.27	Vida de banco de la mezcla con el EVB. Resistencias a 1 hora	97
4.28	Vida de banco para una muestra con y sin EVB	98
4.29	Desarrollo de resistencia de 24 horas a 30, 60 y 90% de humedad relativa para el proceso de caja caliente	100
4.30	Probetas después haber estado a altas condiciones de humedad	101
4.31	Comparación del proceso de caja caliente contra caja fría para resistencias inmediatas y desarrollo de resistencia	103
4.32	Desarrollo de resistencia de 24 horas a 30, 60 y 90% de humedad relativa para el proceso de caja fría	104
4.33	Desarrollo de resistencia a 24 horas a un 30% de H.R. para los procesos de caja caliente y caja fría	105
4.34	Desarrollo de resistencia a 24 horas a un 90% de H.R. para los procesos de caja caliente y caja fría	106
4.35	Micrografía por SEM. Morfología de los granos de arena por el proceso de caja caliente	107
4.36	Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja caliente	108

4.37	Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja caliente expuesto a un 90% de humedad	109
4.38	Micrografía por SEM. Morfología de los granos de arena por el proceso de caja fría	110
4.39	Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja fría	111
4.40	Micrografía por SEM. Puentes entre los granos de arena y el silicato por el proceso de caja fría expuesto a un 90% de humedad	112
4.41	Distorsión en caliente para las resinas inorgánicas y F.U.	113
4.42	Prueba de resistencia en caliente	114
4.43	Evolución de gases para las resinas F.U.e inorgánica	115

### C. Listado de tablas

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
2.1	Constituyentes de la arena sílica	5
2.2	Tipos de procesos de fabricación de corazones	15
2.3	Sistemas de aglutinación de acuerdo a su mecanismo de curado	16
2.4	Principales aplicaciones de los silicatos	24
3.1	Diseño de experimentos	45
4.1	Distribución granulométrica de la arena recuperada de caja fría	67
4.2	Características fisicoquímicas de los silicatos de sodio	70
4.3	Porcentaje de sólidos de las distintas soluciones de silicato de sodio	70
4.4	Factores y variables a medir del diseño de experimentos	74
4.5	Características de las probetas y de la mezcla de arena	90